

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

На правах рукописи

Беликов Артем Артурович



ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОЛЯНЫХ
ПОРОД И ЕЁ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПРОГНОЗА НАПРЯЖЁННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ ПРИ
РАЗРАБОТКЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАМЕННЫХ СОЛЕЙ

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук
Беляков Н.А.

Санкт-Петербург – 2024 год

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОЛЯНЫХ ПОРОД	10
1.1 Особенности геомеханических условий при подземной разработке месторождений каменных солей	10
1.2 Оценка устойчивости горной выработки.....	16
1.3 Геомеханические процессы формирования зоны водопрводящих трещин	18
1.4 Существующие методы определения безопасной подработки ВЗТ	22
1.5 Мониторинг за деформациями очистных камер и земной поверхности.....	30
1.6 Геомеханические модели деформирования соляных пород.....	33
1.7 Геомеханическая модель хрупкого разрушения горных пород	38
1.8 Выводы по I главе	41
ГЛАВА 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД В ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ	42
2.1 Лабораторные испытания образцов горных пород.....	43
2.2 Мгновенные прочностные и деформационные свойства горных пород	54
2.3 Определение параметров модели хрупкого разрушения пород ВЗТ	61
2.4 Поверхность текучести и реологические свойства соляных пород	66
2.5 Результаты инструментальных наблюдений за деформациями породного контура горных выработок	67
2.6 Определение параметров реологических моделей соляных пород.....	69
2.7 Выводы по II главе	75
ГЛАВА 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД, СКЛОННЫХ К ПРОЯВЛЕНИЮ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ	77
3.1 Метод исследований	77
3.2 Первый этап моделирования.....	79
3.3 Анализ многовариантного моделирования	83
3.4 Второй этап моделирования и анализ результатов.....	86
3.5 Метод прогноза НДС междукамерных целиков, закреплённых податливой тросовой крепью	90
3.6 Выводы по III главе.....	99

ГЛАВА 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД, ПОДРАБАТЫВАЕМОЙ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ.....	101
4.1 Метод исследования	101
4.2 Анализ увеличения несущей способности МКЦ	103
4.3 Анализ результатов прогноза НДС ВЗТ	106
4.4 Выводы по IV главе	116
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	117
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	119
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акт об использовании результатов кандидатской диссертации	129
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патент на изобретение.....	131

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Российская Федерация занимает одну из лидирующих позиций в мире по добыче калийных руд, которые встречаются в виде сильвинита и карналлита. Добыча этих минералов стратегически важна для экономики страны, поскольку они широко используются в химической промышленности, а мировое потребление калия от года к году увеличивается. В связи с этим, обеспечение сырьевой безопасности является приоритетным направлением научных исследований. Решение этой задачи невозможно без обеспечения геомеханически безопасной разработки рудных месторождений полезных ископаемых.

Ввиду способности соляной породы к выщелачиванию подобные рудники оказываются наиболее чувствительными к малейшему притоку воды. С течением времени размеры водопродящих каналов расширяются, обеспечивая постоянное увеличение водопритока. Согласно существующей тенденции, прорыв надсолевых вод в рудник, как правило, приводит к его частичному или полному затоплению.

Прогноз напряжённо-деформированного состояния (НДС) водозащитной толщи (ВЗТ) при разработке месторождения каменных солей осложняется в условиях реализации реологических процессов в горном массиве и с течением времени может происходить нарушение сплошности ВЗТ с возможным формированием в ней гидравлически связанных водопродящих трещин. Возникшие в последние десятилетия крупные аварии на ряде отечественных и зарубежных горных предприятиях определяют актуальность задачи. С учетом этого, безопасность подработки ВЗТ может быть обеспечена повышением достоверности геомеханического прогноза на основании использования корректной модели деформирования массива соляных пород.

В настоящее время обоснование безопасных параметров разработки на калийно-магниевого рудниках (Верхнекамском, Старобинском, Гремячинском и Нивенском и др.) осуществляется согласно действующим «Указаниям...» и «Инструкциям...». Анализ этих нормативных документов показал, что они во многом основаны на результатах геодезических наблюдений за сдвигами земной поверхности и слабо учитывают геомеханические процессы в горном массиве. Применяемые на горных предприятиях системы разработки не позволяют полностью исключить возможность прорыва надсолевых вод в горные выработки, о чём свидетельствуют многочисленные примеры подобных аварий по всему миру.

Предлагаемая в работе методика прогноза целостности ВЗТ на основе численного моделирования её НДС с учетом достоверной реологической модели деформирования

соляных пород продуктивной толщи дает возможность детально исследовать происходящие в ней геомеханические процессы и в целом повысить достоверность прогноза НДС.

Степень разработанности темы исследования:

Большой вклад в развитие аналитических методик исследования геомеханических процессов, использующих упруго-пластические и вязко-упруго-пластические модели деформирования массива горных пород внесли именитые ученые и специалисты: Д. Даниэл, О. Домк, Ф. Мор, Г. М. Саркисов, М. В. Самойловский, М. Худека, Н. С. Булычев, и др., а также научные и производственные коллективы: Шахтспецстрой, ВНИИОМШС, НИЦ шахтного строительства Польши (ВИДОКОР), ВНИМИ.

Вопросами мониторинга НДС междукамерных целиков (МКЦ) и состояния ВЗТ на калийных рудниках посвящены работы С. П. Мозера, О. В. Ковалёва, И. Ю. Тхорикова, М. И. Шимана, И. С. Ломакина, А. А. Баряха, И. Л. Панькова, В. А. Асанова, А. Ю. Шумихина, В. Н. Токсарова, С. Ю. Лобанова, А. В. Евсеева, С. Ю. Любанова, А. К. Федосеева, Е. А. Телегиной, ВНИИГ и др.

Моделированием свойств массива соляных пород занимались такие авторы, как А. А. Барях, Ю. А. Кашников, А. О. Ермашов, А. К. Федосеев, Б. З. Амусин, А. М. Линьков, Н. А. Самоделкина, П. А. Вармеер, В. Ф. Чен и др.

Разработке вязкоупругих и вязко-упруго-пластических моделей посвящены работы таких ученых как Д. К. Максвелл, Ф. Х. Нортон, В. Герман, Ч. Д. Друкер и В. Прагер, В. Фойга и У. Т. Кельвин, Я. М. Бюргер, и др.

Актуальной областью развития геомеханики является обоснование численных методов прогноза формирования и развития водопроводящих трещин в подрабатываемой толще с учетом реологических свойств продуктивной толщи.

Объект исследования – массив соляных пород, водозащитная толща и геомеханические процессы, происходящие при их деформировании.

Предмет исследования – прочностные и деформационные свойства массива соляных пород, закономерности их изменения во времени, а также напряженно-деформированное состояние пород водозащитной толщи.

Цель работы – разработка метода обеспечения геомеханической безопасности при подработке водозащитной толщи на основе взаимоувязанного решения задачи прогноза её напряженно-деформированного состояния и длительного деформирования соляных пород.

Идея работы: прогноз геомеханических процессов в массиве пород ВЗТ и соляных породах продуктивного пласта должен последовательно выполняться на основе двух моделей деформирования:

- модели деформирования соляного массива, учитывающей реологические особенности процесса деформации;
- модели деформирования пород ВЗТ, обеспечивающей процесс хрупкого разрушения посредством образования трещин отрыва и сдвига.

Основные задачи исследования:

1. Анализ существующих методик расчёта напряженно-деформированного состояния горных пород при разработке месторождений каменной соли и методик прогноза напряженно-деформированного состояния пород водозащитной толщи.
2. Анализ результатов лабораторных исследований физико-механических свойств образцов соляных пород и пород, слагающих ВЗТ.
3. Обоснование реологической модели поведения соляных пород и ее параметров по результатам обработки лабораторных испытаний образцов и натурных измерений конвергенции породного контура горных выработок.
4. Обоснование упруго-пластической модели деформирования пород ВЗТ и её параметров на основе анализа результатов лабораторных испытаний слагающих её пород.
5. Разработка методики численного моделирования напряженно-деформированного состояния пород, склонных к проявлению реологических свойств.
6. Разработка методики оценки геомеханически безопасных параметров подработки водозащитной толщи при отработке месторождения каменной соли.

Научная новизна работы:

1. Обоснована реологическая модель деформирования массива соляных пород Верхнекамского месторождения, с применением которой разработана методика построения численной модели, обеспечивающая достоверный прогноз НДС в окрестности одиночной горной выработки.
2. Получены зависимости продолжительности податливого и жёсткого режима работы тросовой крепи междукамерных целиков от диаметра используемого каната.
3. Получены зависимости относительного горизонтального смещения породного контура закреплённого целика от диаметра каната податливой крепи.
4. Обоснована упруго-пластическая модель деформирования пород ВЗТ Верхнекамского месторождения, на основе которой получена методика оценки целостности ВЗТ.

Полученные результаты **соответствуют паспорту научной специальности** по пунктам:

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.

2. Геомеханическое обеспечение открытой и подземной добычи полезных ископаемых, разработка методов управления горным давлением, удароопасностью, креплением, сдвижением горных пород, устойчивостью бортов карьеров, разрезов, отвалов и подземных выработок.

5. Теоретические основы, математические модели и способы управления состоянием и поведением массивов горных пород и грунтов с целью обеспечения устойчивости горных выработок, подземных и наземных сооружений, предотвращения проявлений опасных горно-геологических явлений.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработан и запатентован способ податливого крепления междукамерных целиков в соляных породах.

2. Разработана методика построения численной модели массива соляных пород с учетом реологического характера их деформирования.

3. Разработана методика оценки целостности ВЗТ, основанная на численном моделировании процесса хрупкого разрушения слагающих её пород.

4. Результаты диссертационной работы использованы в производственной деятельности ООО «СПб-Гипрошахт» для повышения качества проектирования подземных горных работ, акт внедрения от 16.10.2023 г. (Приложение А).

5. Результаты диссертационной работы отражены в свидетельстве о государственной регистрации Патент № 2788185 С1 «Способ податливого крепления междукамерных целиков в соляных породах» от 17.01.2023 г. (Приложение Б).

Методология и методы исследования

Анализ литературных источников по вопросам прогноза НДС массива горных пород в окрестности горных выработок, пройденных в соляных породах, а также подработанного массива. Анализ результатов лабораторных испытаний образцов пород продуктивного пласта и результатов натурных измерений конвергенции породного контура горных выработок для построения вязко-упруго-пластической модели соляных пород. Анализ результатов лабораторных испытаний пород ВЗТ для построения упругопластической модели деформирования пород подрабатываемой ВЗТ. Экспериментальные исследования эффективности метода прогноза целостности ВЗТ на основе результатов численного моделирования.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Прогноз НДС массива соляных пород в окрестности одиночной горной выработки следует выполнять на основе конечно-элементных моделей с использованием модели деформирования Друкера-Прагера, которые должны удовлетворять следующим требованиям: расстояние от контура выработки до границ модели должно определяться наибольшим линейным размером её поперечного сечения и превышать его не менее чем в 16 раз; наибольший размер конечного элемента должен определяться наименьшим радиусом кривизны контура выработки и составлять не более 1/6 от него.

2. Прогноз НДС междукамерных целиков, закреплённых податливой тросовой крепью, и определение её параметров должны быть основаны на методике, учитывающей применение вязко-упруго-пластической модели деформирования соляных пород, степень нагружения целиков, величину реакции крепи в податливом режиме работы, пластическую деформацию троса в жестком режиме работы крепи и выявленную степенную зависимость относительного горизонтального смещения породного контура от диаметра тросовой крепи.

3. Методика прогноза НДС ВЗТ при разработке соляных месторождений должна основываться на использовании модели деформирования с накоплением повреждений, учитывать длительные прогнозные вертикальные смещения по её подошве и возможность возникновения гидравлической связи с грунтовыми водами посредством первичной трещины, формирование которой происходит на расстоянии, определяемом линейной зависимостью от мощности ВЗТ, и отмеряемом от середины участка, наклон которого достигает значений $i = a \cdot m_{\text{ВЗТ}}^c$.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается сходимостью результатов численного моделирования НДС междукамерных целиков с натурными наблюдениями за конвергенцией породного контура очистных камер, и процесса деформирования и разрушения пород ВЗТ с результатами лабораторных испытаний.

Апробация результатов. Результаты работы докладывались на следующих научных конференциях и симпозиумах: IV Международная научно-практическая конференция «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование» (г. Санкт-Петербург, 2021 г.); Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы науки и практики» (г. Уфа, 2022 г.); Международная научно-практическая конференция «Инновационный потенциал развития науки в современном мире: достижения и инновации» (г. Уфа, 2023 г.); XXXII Международный научный симпозиум «Неделя горняка» (г. Москва, 2024 г.).

Личный вклад автора заключается в анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, в результате которого обозначены перспективные

направления исследования для повышения точности прогноза НДС ВЗТ. Проведение экспериментальных исследований НДС междукамерных целиков и подработанной ВЗТ посредством численного моделирования, в результате которых обоснованы параметры реологической модели Друкера-Прагера для соляных пород и параметры упругопластической модели пород ВЗТ. Разработана методика построения численной модели массива соляных пород с учетом реологического характера их деформирования. Разработана методика оценки целостности ВЗТ, основанная на численном моделировании процесса хрупкого разрушения слагающих её пород. Разработан и запатентован способ податливого крепления междукамерных целиков в соляных породах.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 6 печатных работах (пункты списка литературы № 78, 79, 13, 14, 15, 16), в том числе 2 статьи - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), 2 статьи - в изданиях, входящих в международные базы данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент (пункт списка литературы № 55, Приложение Б).

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка, содержит 131 страницу машинописного текста, 80 рисунков, 10 таблиц, список литературы из 108 наименований и 2 приложения на 3 страницах.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность кандидату технических наук, Белякову Никите Андреевичу за научное руководство над работой. За ценные научные консультации благодарность всему коллективу кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СОЛЯНЫХ ПОРОД

1.1 Особенности геомеханических условий при подземной разработке месторождений каменных солей

Одним из самых распространённых явлений на горнодобывающих предприятиях является водоприток. Ввиду способности соляной породы к выщелачиванию подобные рудники оказываются наиболее чувствительными к малейшему притоку воды. Возникает опасность его резкого увеличения за счет увеличения в размерах водопроницающих трещин. Согласно существующей тенденции, прорыв надсолевых вод в рудник, как правило, приводит к его частичному или полному затоплению [17, 16].

Кроме потери запасов полезного ископаемого и самого рудника прорыв грунтовых вод в выработанное пространство вызывает также и деформирование земной поверхности, что представляет опасность для объектов инженерной инфраструктуры и сооружений, находящихся на ней [33, 39, 57].

Пласты полезного ископаемого изолированы от водоносных горизонтов слоями нерастворимых пород, однако в природе встречаются естественные зоны трещиноватости и, что также является редкостью, зоны крупных разломов в окрестностях геологических нарушений. Подобные опасные участки должны быть в полной мере выявлены геологической разведкой месторождения для своевременного принятия мер по охране и защите рудника от затопления [67, 47].

Безопасная разработка месторождения соляных пород главным образом зависит от предупреждения образования гидравлически связанной системы трещин между водоносным горизонтом или водными объектами и выработанным пространством. Высокая растворимость минеральных солей с появлением подобной системы трещин обеспечивает опасность обводнения. С течением времени размеры водопроницающих каналов расширяются, обеспечивая постоянное увеличение водопритока. Как только используемые средства водоотвода перестают справляться с возникшим водопритоком, затопление рудника становится практически неконтролируемым. С увеличением скорости потока уменьшается насыщение рассола в водопроницающих каналах, вследствие чего их ширина увеличивается с возрастающей скоростью. Таким образом процесс увеличения водопритока носит лавинообразный характер [80].

Обеспечение безопасной подработки ВЗТ, то есть сохранение целостности водоупорного целика, отделяющего водоносные горизонты от выработанного пространства, достигается соответствием геологических особенностей конкретного участка

месторождения с принимаемой системой разработки. Целостность ВЗТ должна обеспечиваться не только в процессе добычи полезного ископаемого, но и после полной реализации сдвижения земной поверхности, что является следствием его эксплуатации. Таким образом исключается возможность возникновения кастовых провалов, как это повсеместно происходит на территориях г. Березники и г. Соликамска [1, 72, 32, 56]. Последствия затопления рудника БРУ-1 представлены на (Рисунок 1.1)



Рисунок 1.1 – Обрушение земной поверхности на территории рудника БРУ-1 ПАО «Уралкалий», Березники

Безопасное нахождение рабочих в выработках обеспечивается главным образом камерной системой разработки с междукамерными целиками, которые в силу физико-механических свойств породы являются податливыми. Реже применяется столбовая система разработки, там выработанное пространство под защитой передвижной механизированной крепи. Потери полезного ископаемого на сегодняшний момент как правило составляют 60 %. Для увеличения извлечения каменной соли необходимо найти новые способы поддержания кровли в устойчивом состоянии [47]. Решение о принятии той или иной системы разработки на месторождении должно основываться на исключении образования гидравлически связанных систем трещин [13, 15].

Геологическая разведка месторождения посредством скважин приводит к необходимости оставления околоскважинных целиков и тампонажу самих скважин. Они являются потенциальными каналами проникновения грунтовых и поверхностных вод в выработанное пространство. Подобные меры охраны приводят к еще большим потерям и «разцеличиванию» рудника [35, 32].

С другой стороны, недостаточно полная и не содержащая прогнозных сведений геологическая характеристика опасных участков рудного поля может стать основной причиной аварии. Как, например, на калийных рудниках Германии [47]. Опасность

катастрофического исхода водопритока уменьшается по мере повышения качества гидрогеологических и геологических исходных данных. Оценивая результаты проводившихся мероприятий на рудниках "Пеншнс Лейк", "Роканвилль" и "Джеральд (К2)" следует отметить, что своевременно не была разработана и осуществлена программа прогнозирования локальных геологических особенностей для перспективных конкретных участков шахтных полей.

Неожиданные водопритоки на рудниках являются серьезной проблемой, вызывающей значительные разрушения и затрудняющей дальнейшую эксплуатацию. Эти события часто обусловлены недостатком точных прогнозов и постоянного мониторинга состояния горных пород. На рудниках в Закарпатской области Украины и Оренбургской области России, внезапные водопритоки стали следствием отсутствия точных прогнозов изменения устойчивости целиков и потолочин с течением времени. Катастрофа на БКПРУ - III в Пермском крае России, вызванная недостаточным пониманием процессов, происходящих в толще пород между водоносным горизонтом и горными выработками, привела к полному затоплению рудника. Неконтролируемые изменения в структуре пород способствовали образованию подземных пустот, что, в свою очередь, привело к масштабным обрушениям и притоку воды, окончательно затруднившим дальнейшую эксплуатацию шахты [47].

Проблемы на этих рудниках иллюстрируют критическую важность точных прогнозов и постоянного мониторинга состояния горных пород. В случае Березниковского рудника, отсутствие детального анализа и прогноза поведения пород между водоносными горизонтами и выработками сыграло ключевую роль в катастрофе. В результате, неконтролируемые изменения в структуре пород привели к образованию пустот и крупным обрушениям, что стало причиной значительного притока воды и затопления шахты. Такие инциденты подчеркивают необходимость внедрения современных методов геомеханического анализа и мониторинга для предотвращения подобных аварий в будущем. Эти меры помогут обеспечить более безопасную и стабильную эксплуатацию рудников, минимизируя риски возникновения внезапных водопритоков и обрушений. [10, 47, 30, 108].

Истории известны случаи, когда аварийные водопритоки возникали даже после детальной геологической информации. В большинстве случаев причиной возникновения подобных аварийных ситуаций служила принятая система разработки: возможное изменение НДС ВЗТ с течением времени недооценивалось [72]. Таким образом, поиск методик определения максимального извлечения полезного ископаемого и соответствующих систем разработки, не приводящих к появлению гидравлически связанных

систем трещин, остаётся актуальным наряду с получением достоверной геологической информацией.

В работе [45] было выявлено расхождение в параметрах кривых длительной прочности, построенными на основе анализа прогнозных графиков нарастания оседаний земной поверхности, и результатами маркшейдерских наблюдений [35]. Это несоответствие обусловлено тем, что при оценке долговременной несущей способности целиков по фактическим графикам нарастания оседаний земной поверхности необходимо учитывать не только проявление реологических свойств соляных пород, но и изменение их степени нагружения вследствие техногенных процессов. Анализ прогнозных графиков оседаний и маркшейдерских данных показывает, что реологические свойства соляных пород значительно влияют на долговременную устойчивость горных массивов. Однако техногенные процессы, такие как добыча полезных ископаемых и изменения в горнотехнических условиях, также играют важную роль. Эти процессы изменяют степень нагружения пород, что должно быть учтено при построении кривых длительной прочности.

Пренебрежение техногенными факторами может привести к ошибочным оценкам несущей способности целиков, что в свою очередь увеличивает риск аварий и обрушений. Поэтому для получения точных и надежных данных необходимо интегрировать результаты маркшейдерских наблюдений с прогнозными графиками, учитывая все возможные факторы, влияющие на состояние пород.

Таким образом, для более достоверной оценки долговременной несущей способности целиков следует применять комплексный подход, включающий как анализ реологических свойств соляных пород, так и учет изменений их нагружения под воздействием техногенных процессов. Такой подход обеспечит более точные прогнозы и повысит безопасность горных работ. Техногенное воздействие на междукамерные целики выражается в постепенном разрушении их краевых частей, обрушении кровли и технологического междупластья. Это приводит к изменению размеров целиков и, как следствие, степени их нагружения. Согласно модифицированной методике Турнера – Шевякова (1.1), (1.2) она обратно пропорциональна коэффициенту формы целика [6]:

$$C = \xi \frac{\gamma \cdot (a + b) \cdot H_0}{b \cdot \sigma_m \cdot k_f}, \quad (1.1)$$

где C – степень нагружения целиков, γ – объёмный вес породы, Н/м³; H_0 – глубина залегания, м; a – ширины камеры, м; b – ширина целика, м; σ_m – прочность горной породы в массиве, Па; ξ – учёт дополнительных факторов увеличения нагрузки; k_f – коэффициент формы целика.

$$C \propto \frac{1}{k_f} \quad (1.2)$$

Коэффициент формы целиков для соляных пород прямо пропорционален соотношению ширины целика к его высоте (1.3) [6].

$$k_f \propto \frac{b}{m}, \quad (1.3)$$

где m – высота междукammerного целика.

Чем выше становится целик и чем меньше его ширина, тем сильнее увеличивается его степень нагружения. Для анализа данных процессов были выполнены численные расчеты с использованием математического моделирования НДС пород, окружающих камеры, что позволило выявить закономерности и разработать критерии разрушения технологического междупластья [44]. Эти расчеты учитывали изменения степени нагружения целиков и позволили определить основные факторы, влияющие на устойчивость конструкции [8]. Численные эксперименты показали, что краевые части междукammerных целиков разрушаются преимущественно под действием горизонтальных растягивающих напряжений. Это разрушение оказывает значительное влияние на целостность кровли выработки, создавая повышенные риски обрушения. В свою очередь, такое изменение существенно снижает несущую способность целиков, что может привести к нарушению стабильности всей горной выработки и увеличению вероятности аварийных ситуаций. Изменение степени нагружения целиков является результатом этих процессов, и его можно описать с помощью интегральной характеристики напряженного состояния целиков. Эта характеристика не имеет прямой зависимости от распределения компонентов тензора напряжений в массиве, что делает её более универсальной. Она учитывает суммарное влияние всех напряжений, действующих на целик, и позволяет лучше понять его поведение под воздействием различных нагрузок. Это, в свою очередь, помогает предсказать возможные изменения их прочности и устойчивости, что особенно важно для планирования и обеспечения безопасности горных выработок. Использование интегральной характеристики напряженного состояния дает возможность более точно оценить риски разрушения целиков и принять необходимые меры для предотвращения аварий. Со временем нагружение целиков становится более интенсивным, что может привести к увеличению рисков их разрушения. Исследования показали, что такие процессы требуют постоянного мониторинга и корректировки моделей для обеспечения стабильности и безопасности горных выработок. Подобные данные подчеркивают необходимость применения комплексного подхода, учитывающего как текущее состояние пород, так и их поведение в долгосрочной перспективе, для предотвращения аварий и повышения

эффективности эксплуатации месторождений. Таким образом, этот фактор безусловно должен учитываться при разработке безопасных параметров подработки ВЗТ [44].

К подобному результату привёл анализ оседаний земной поверхности в работе [73]. Полученные согласно [35] при расчетной степени нагружения целиков, прогнозные значения оказались существенно меньше фактических. Причиной такого расхождения в оседаниях считается снижение их несущей способности по отношению к нормативной.

Без использования критериев разрушения слагающих ВЗТ пород невозможно математическое описание задачи об её целостности. Эксперимент должен являться основанием для выбора достоверного критерия, но, к сожалению, его ограниченность, сложность математического аппарата, а также неопределенность в сходимости натуральных данных с лабораторными приводит к тому, что окончательное решение остается за исследователем.

В работе [68] приведено сравнение критериев разрушения Кулона-Мора [81] и Друкера-Прагера [102] для описания процессов деформирования и разрушения ВЗТ. Установлено, что оба подхода в качественном и, по большому счету, в количественном выражении в равной степени определяют процесс разрушения пород ВЗТ. Исходя из этого, выделить одну из этих теорий не представляется возможным. То же самое касается соответствующих критериев разрушения.

В работе [66] автор сравнивает две камерные системы разработки: с постоянным размером камер и с оставлением целиков переменных размеров. Для данных вариантов выполнялась сравнение условий подработки ВЗТ при одинаковом уровне извлечения руды из недр. Математическое моделирование осуществлялось на двухмерной упругопластической модели плоского деформированного состояния. Критерии Кулона-Мора и предельных растягивающих напряжений использовались для прогноза НДС ВЗТ. В случаи применения целиков с переменным размером из-за наличия широких опорных целиков по окончанию процесса сдвижения, образуется неоднородное поле перемещений, а значит и нарушение сплошности ВЗТ, в зоне полной подработки. Применение целиков постоянной ширины требует тщательного мониторинга и корректировок в процессе разработки для предотвращения критических ситуаций и поддержания стабильности ВЗТ, поскольку приводит к нарушению сплошности ВЗТ на краевой зоне подработки. Таким образом, камерная система разработки с целиками переменных размеров существенно повышает техногенную нагрузку на ВЗТ и создает угрозу безопасным условиям ее подработки.

1.2 Оценка устойчивости горной выработки

Достоверную оценку устойчивости горной выработки или прогноз НДС ВЗТ возможно произвести посредством математического моделирования методом конечных элементов. На сегодняшний день на рынке существует множество программных продуктов, позволяющих производить подобные расчёты, к примеру, Abaqus CAE, Plaxis 3D и Ansys.

Проектирование корректной расчётной модели является первым шагом в подобных расчетах [28, 91, 94, 95]. Далее необходимо произвести дискретизацию модели на конечные элементы второго порядка. Каждый такой элемент имеет относительно простую форму: квадрат при плоской постановке задачи или куб при расчетах в объёмной постановке. Каждый конечный элемент модели рассчитывается отдельно, учитывая его уникальные свойства и условия нагрузки. Узлы, связывающие элементы, обеспечивают передачу информации и взаимодействие между ними, что позволяет модели функционировать как единое целое. Этот метод позволяет учитывать локальные изменения и специфические особенности каждой части модели, обеспечивая точность и надежность общего решения. Совокупность этих локальных решений формирует комплексное понимание поведения всей системы. Подобный метод дискретизации называется сеткой, плотность которой напрямую зависит от количества элементов.

Одной из основных переменных в подобном расчете является узловое перемещение. После его определения программа рассчитывает деформации в элементе и согласно математическим моделям физико-механических свойств среды, определяет напряжения. Таким образом отстраивается поле распределения напряжений в модели. На границах расчётной модели также необходимо задать граничные и кинематические условия её элементов. В результате расчётов во всех конечных элементах определяются все компоненты тензоров деформаций и напряжений.

В результате моделирования возможно выявление области запредельного деформирования (ОЗД), которой характерно превышение деформаций ползучести вмещающих пород критической величины [90].

С течением времени каменная соль под нагрузкой способна изменять свои физико-механические свойства, что приводит к изменению НДС породы в окрестности горной выработки и ВЗТ. Во многом этот процесс связан с наличием реологических свойств в полезном ископаемом. Реологические свойства – это способность породы с течением времени изменять НДС в поле действия механических сил [64].

Следовательно, изучение физико-механических свойств соляных пород и построение их корректной геомеханической модели являются актуальными вопросами. Особое внимание необходимо уделить реологическим свойствам породы ввиду

обеспечения целостности ВЗТ на длительный период. Срок эксплуатации рудника может достигать 80 лет, а реализация оседания земной поверхности после полной отработки – еще 100 лет [1, 32, 56, 72].

Помимо изучения ФМС пород при создании геомеханической модели как для разрушения междукамерных целиков, так и для породного обнажения выработки важную роль играют натурные инструментальные наблюдения за процессом деформирования породного контура горных выработок и самих МКЦ. По натурным данным, собранным в течении нескольких лет, производится окончательная корректировка параметров модели и соответствующая её верификация [30, 49, 50].

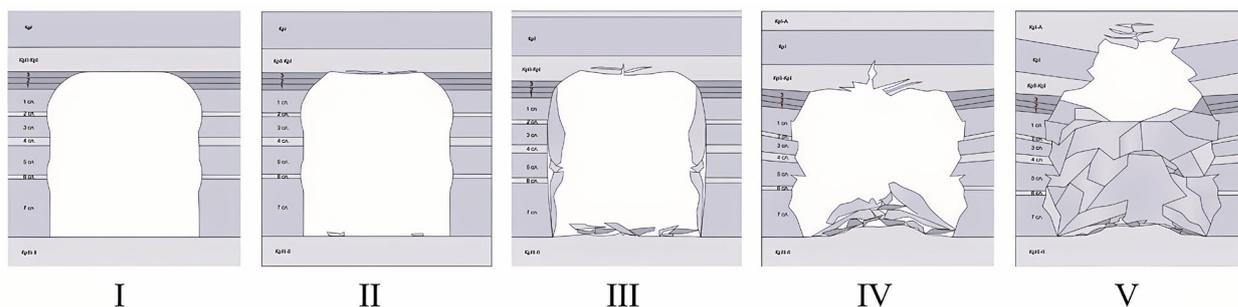


Рисунок 1.2 – Стадии разрушения выработок

В указаниях [34] приводятся стадии разрушения выработок вследствие влияния горного давления (Рисунок 1.2).

I стадия. Кровля – местами небольшие отслоения. Почва и стенки без видимых проявлений горного давления.

II стадия. Кровля – местами небольшие отслоения вышележащих пластов по глинистым прослоям, незначительные обрушения. Стенки – местами небольшие трещины и отслоения. Почва – местами пучения до 0,3 м и трещины с раскрытием 1-3 см.

III стадия. Кровля – отслоения вышележащих пластов по глинистым прослоям, частичное обрушение пород кровли, продольная трещина по центру кровли, заметный прогиб кровли. Стенки – значительные отслоения части стенок выработки, трещины. Почва – пучения до 1 м и трещины с раскрытием более 3 см, местами выворачивание глыб из почвы.

IV стадия. Кровля – обрушение пород кровли более 0,7 м, местами до КрI. Стенки – обрушение и осыпание пород из стенок, многочисленные трещины. Почва – пучение более 1 м, выворачивание глыб по напластованию.

V стадия. Выработка заполнена обрушенной породой, стенки сближены, кровля сомкнулась с почвой.

Одновременная разработка сближенных пластов в условиях высокого содержания глины в соляном массиве может привести к ускоренному расслоению и обрушению

междупластья, о чём свидетельствует многолетний опыт ведения работ на Верхнекамском месторождении. Потеря несущей способности междупластья приводит к формированию общего целика между пластами АБ и КрII неустойчивой формы со степенью нагружения, превышающей $C = 0,40$ [35], и к росту скоростей деформационных процессов, опасных для ВЗТ. Процесс разрушения междупластья отображён на (Рисунок 1.3).

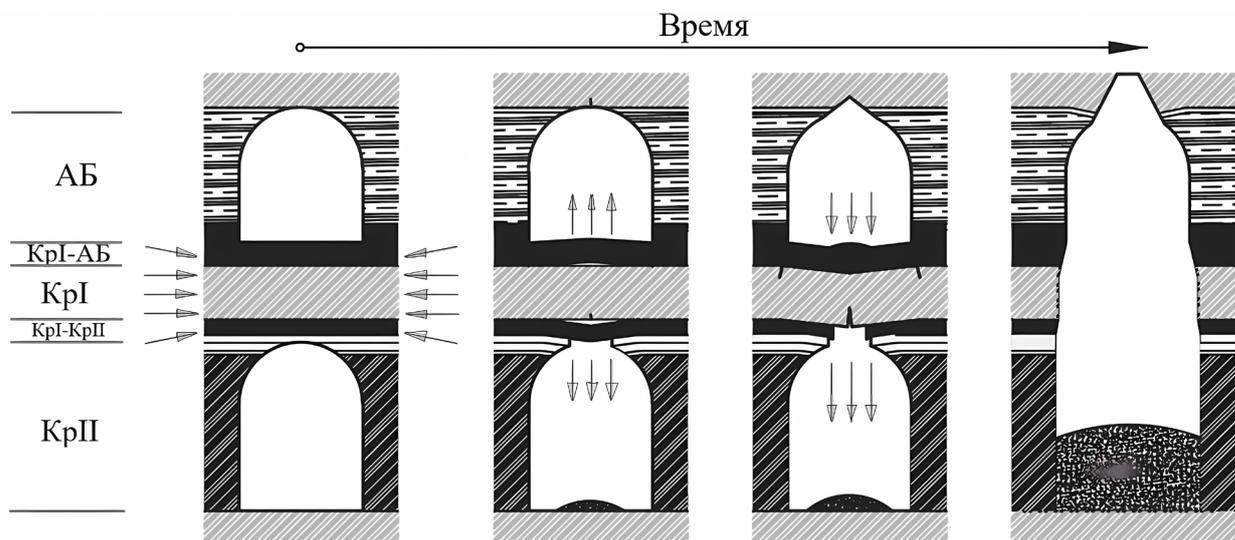


Рисунок 1.3 – Процесс разрушения технологического междупластья в условиях ВКМКС

1.3 Геомеханические процессы формирования зоны водопроводящих трещин

Техногенные водопроводящие трещины формируют сложную сеть [16, 25, 26, 58, 67, 89]. Трещины расслоения возникают вдоль горизонтальных межслоевых контактов вследствие сдвига геологических элементов при их изгибе, чаще всего на глубинах непосредственно ниже зоны горных выработок. Эти трещины обычно образуются из-за горизонтальных сдвиговых напряжений, приводящих к разделению пластов. Нормальносекущие трещины, возникающие в ответ на максимальные значения кривизны, проявляются вертикально, пересекая геологические разности в зонах наибольшего изгиба. Эти вертикальные разломы взаимодействуют с уровнями деформации кривизны, и если они не проникают полностью через породу, сохраняют водоупорные свойства, изолируя водные пути между верхними и нижними слоями. С увеличением изгиба пород, особенно в геологических слоях, находящихся ближе к центру горной выработки, нормальносекущие трещины могут проникать через весь геологический элемент, соединяясь с трещинами расслоения и создавая гидравлически связанную систему каналов. Эта система обеспечивает перемещение воды к выработанному пространству, увеличивая риск подтопления и влияя на эксплуатационную безопасность. Эти процессы происходят на значительных глубинах, что делает их влияние критическим для сохранения структурной целостности всей выработки.

Первый геологический элемент, в котором сохранена целостность, определяется как граница зоны водопродящих трещин (ЗВТ). Его кривизна известная как граничная кривизна [26], значительно меньше по сравнению с кривизной пластов, расположенных выше этой границы. Это уменьшение кривизны предотвращает полное проникновение вертикальных трещин в более высоко расположенные геологические разности, сохраняя их водоупорные свойства. Таким образом, верхние геологические слои остаются защищенными от прямого водного воздействия, обеспечивая стабильность и целостность верхних структур.

Благодаря этому механизму, геологические элементы, находящиеся ближе к поверхности Земли, не подвергаются непосредственному влиянию водопродящих трещин. Это позволяет избежать нежелательных гидравлических связей и сохраняет водоизоляционные характеристики верхних слоев, что имеет критическое значение для предотвращения подтоплений и обеспечения общей безопасности горных выработок.

Если ЗВТ пересекает водоносный горизонт, то возникает риск появления водопритоков. При таких условиях разуплотненный массив становится более податливым, что способствует быстрому образованию водопродящих каналов. В то же время, развитие трещин в почве выработанного пространства и вокруг других типов выработок остается относительно незначительным, особенно в условиях пологого и наклонного залегания пород. Это существенно снижает риск образования вторичных водопродящих каналов, которые могли бы увеличить объем водопритоков. Подобная геологическая стабильность в этих условиях играет важную роль в обеспечении безопасности горных работ и минимизации риска внезапных затоплений [25, 26, 89].

Подстилающий геологический элемент демонстрирует более интенсивное изгибание по сравнению с вышележащим пластом, что связано с тем, что степень кривизны деформированных пород обратно пропорциональна квадрату их расстояния от разрабатываемого пласта. Это явление вызывает увеличение напряжений в подстилающих слоях, усиливая их подверженность деформациям. В результате в толще пород формируется зона с нарушенной целостностью, где происходит утрата сплошности, а также зона, где сплошность сохраняется (Рисунок 1.4).

Различие в кривизне слоёв вызывает их расслоение, что приводит к формированию полостей отслоения в породах и способствует разуплотнению горного массива. Эти полости могут служить каналами для миграции подземных вод, что значительно увеличивает риск подтопления горных выработок и нарушения их эксплуатационной безопасности. Процесс разуплотнения имеет схожий характер распределения с кривизной деформированных пород, так как их происхождение взаимосвязано: наибольшие значения наблюдаются около

разрабатываемого пласта (Рисунок 1.4, б) и постепенно уменьшаются к земной поверхности (Рисунок 1.4, а).

Наблюдаемое разуплотнение не только изменяет физические свойства пород, делая их более пористыми и податливыми, но также может вызывать изменения в локальном геологическом балансе. Это приводит к дополнительным геологическим нарушениям и сдвигам, что может ухудшить условия эксплуатации и устойчивость горных выработок. В конечном счете, эти процессы требуют тщательного мониторинга и управления для минимизации рисков и обеспечения безопасности горнодобывающих операций.

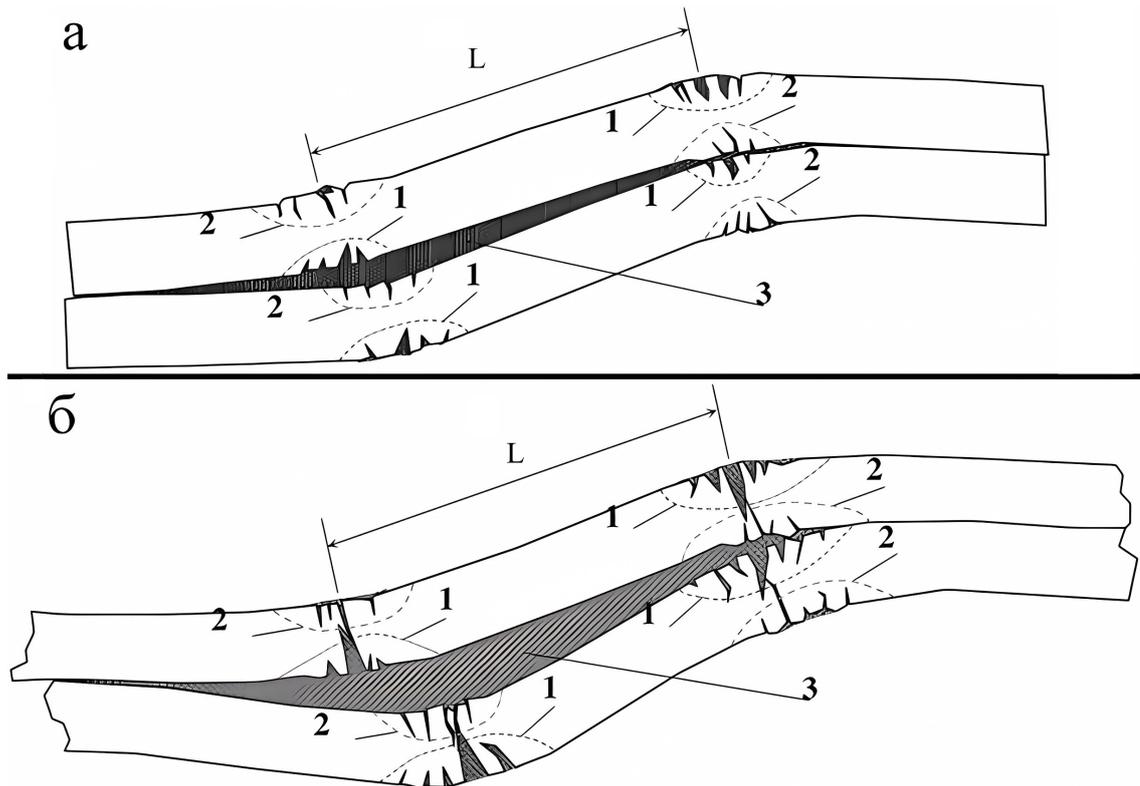


Рисунок 1.4 – Схема образования техногенных трещин в слоях
а – слои расположены вблизи пласта; б – на некотором удалении от него; 1 – зона растяжения; 2 – зона сжатия; 3 – полость отслоения; L – размер блока

В процессе подвигания забоя и реализации оседаний поверхности в слоях пород изгибы противоположной кривизны сменяют друг друга. При возникновении кривизны определённой величины в слое или в пачке слоёв образуются нормально секущие трещины разрыва. Процесс формирования нормально секущих трещин в слоях пород схож с таковым в балках, работающих на изгиб. В области действия растягивающих напряжений наблюдается возникновение и последующее раскрытие трещин (Рисунок 1.4). При изменении кривизны слоя в рассматриваемой зоне растягивающие напряжения сменяются сжимающими, образовавшиеся трещины закрываются. При этом в тех зонах, где действовали сжимающие напряжения вследствие деформации слоя возникают растягивающие – процесс формирования трещин разрыва повторяется. Закрытые трещины

не «залечиваются», а остаются в слое. Знакопеременные изгибы, как и нормально секущие трещины повторяются в слоях с шагом равным a . [25, 26, 89]

Со временем описанный выше процесс способствует развитию нормально секущих трещин, которые распространяются навстречу друг другу, что может привести к их полному проникновению через всю толщину деформируемого геологического элемента. Проникновение и раскрытие трещин зависят от кривизны данного слоя, поэтому в окрестностях зоны обрушения деформированный пласт разбивается нормально секущими трещинами на всю мощность, а их интенсивность уменьшается по мере удаления от разрабатываемого пласта. В результате формирования трещин вблизи зоны обрушения слой разбивается на отдельные сегменты, что значительно влияет на его целостность.

Когда рабочий забой продвигается вперед, кривизна деформируемых слоёв вышележащих пород постепенно уменьшается и становится примерно равной нулю, что приводит к формированию участка дна мульды. В этом процессе слои постепенно стабилизируются, и деформации уменьшаются. Тот геологический элемент, в котором нормально секущие трещины не проникли на всю его толщину, сохраняет свои водоупорные свойства. Таким образом, этот слой служит верхней границей ЗВТ. Это позволяет сохранить водоупорные характеристики верхних пластов, предотвращая проникновение воды через них и обеспечивая стабильность и безопасность горных работ [16, 25, 26, 30, 35, 58, 66, 67, 89]. Ниже водоупорного слоя располагается ЗВТ, состоящая из гидравлически связанной системы трещин: сквозные нормально секущие трещины и трещины расслоения. Если ЗВТ пересечёт водоносный горизонт, то в выработанное пространство будет поступать вода по системе техногенных трещин. Первоначальный водоприток в выработки в полной мере зависит от величины проникновения ЗВТ в водоносный горизонт или водный объект. В слоях выше ЗВТ в середине остается ненарушенный нормально секущими трещинами участок и по мере удаления от разрабатываемого пласта уменьшается проникновение трещин. Следовательно, с уменьшением глубины мощность водоупорного участка в слоях возрастает. Учитывая то, что по мере удаления от разрабатываемого пласта уменьшаются трещины расслоения, то возможность образования гидравлической связи между ними исключается.

Описанные геомеханические процессы, связанные с формированием пластов техногенных ЗВТ над выработанным пространством, служат основой для прогнозных расчётов её высоты. Описанное НДС учитывает развитие трещин, их проникновение и взаимодействие, а также влияние различных напряжений и деформаций на формирование и стабильность зоны трещин. Прогнозирование высоты ЗВТ позволяет определить

потенциальные риски подтопления и утечек воды, что является критически важным для планирования и проведения безопасных горных работ [25, 16].

1.4 Существующие методы определения безопасной подработки ВЗТ

Мероприятия защиты рудников от затопления являются мероприятия, включающие в себя планирование, ведение горных работ с соблюдением условий, обеспечивающих предотвращение проникновения (или прорыва) вод в подземное пространство рудников.

Инфильтрация может происходить по нескольким путям, каждый из которых представляет собой серьезную угрозу для стабильности и безопасности горных выработок. Одним из наиболее значимых путей являются техногенные трещины. Ещё одним важным фактором является естественная трещиноватость горных пород в разломных зонах, которая также способствует проникновению воды. Вода может просачиваться через скважины. В случае затопления смежного рудника трещины в целиках могут стать каналами для проникновения воды, что усугубит ситуацию в текущем руднике. Наконец, шахтные стволы сами по себе могут служить путями проникновения воды, особенно если они пересекают водоносные горизонты. Эти различные пути проникновения агрессивных вод требуют тщательного мониторинга и управления, чтобы минимизировать риски и обеспечить безопасность подземных горных работ.

Основными факторами, влияющими на параметры, которые характеризуют воздействие подземных работ на состояние зоны водопроницаемых трещин (ВЗТ), являются многочисленные и разнообразные. Одним из ключевых факторов является глубина ведения горных работ, поскольку с увеличением глубины растет и напряжение в горных породах, что усиливает влияние на ВЗТ. Число и выемочная мощность обрабатываемых пластов также играют важную роль, так как от этого зависит объем извлеченной рудной массы и степень деформации массива.

Система разработки, выбранная для ведения горных работ, определяет подход к выемке и поддержанию выработок, что напрямую влияет на стабильность ВЗТ. Параметры очистной выемки, такие как ширина и высота очистных забоев, также оказывают значительное влияние на состояние пород. Степень извлечения из недр рудной массы и степень подработанности горного массива определяют, насколько сильно массив подвергнется изменениям. Продолжительность остановки границ очистной выемки, очередность отработки пластов и мощность, а также строение ВЗТ, все эти факторы влияют на устойчивость и целостность зоны. Наличие или отсутствие закладки выработанного пространства является еще одним важным фактором: при отсутствии закладки риск обрушения и образования трещин значительно возрастает. Размеры оставляемых в

выработанном пространстве неотработанных участков могут служить буфером, снижая нагрузку на окружающие породы и помогая сохранить стабильность.

Все эти факторы взаимосвязаны и требуют комплексного учета для обеспечения безопасности и эффективности подземных горных работ, а также для минимизации негативного воздействия на зону водопрводящих трещин. Эти различные источники проникновения воды требуют тщательного мониторинга и эффективного управления для предотвращения нежелательного проникновения агрессивных вод. Обеспечение безопасности подземных горных работ зависит от своевременного выявления и контроля этих потенциальных путей проникновения воды, что позволяет минимизировать риски и поддерживать устойчивость выработок. Обеспечение мер защиты рудников от затопления при деформировании породного массива достигается соблюдением условий безопасной подработки ВЗТ. Рассмотрим актуальные методы определения безопасной подработки ВЗТ на отечественных калийных рудниках.

Старобинское месторождение

Условия геомеханически безопасной подработки ВЗТ Старобинского месторождения (1.4) заключаются в обеспечении сохранности над выработанным пространством минимально необходимой мощности предохранительной водозащитной потолочины (ПВП) [58].

$$M_n \leq [M], \quad (1.4)$$

где M_n – нарушенная мощность ВЗТ, определяемая по формуле (1.5), м; $[M]$ – минимальная необходимая мощность предохранительной водозащитной потолочины (ПВП), м.

$$M_n = M_{ВЗТ} - H_T, \quad (1.5)$$

где $M_{ВЗТ}$ – мощность ВЗТ над рассматриваемым пластом, м; H_T – расчетная высота распространения зоны техногенных водопрводящих трещин над выработанным пространством, м.

Исходя из имеющегося опыта научно-исследовательских, геологоразведочных и горных работ в условиях Старобинского месторождения, минимальная необходимая мощность предохранительной водозащитной потолочины (ПВП) принимается $[M] = 35$ м.

Расчет высоты ВЗТ распространяющейся над выработанным пространством, существенно зависит от количества обрабатываемых пластов и выбранной системы разработки. Эти параметры играют ключевую роль в определении степени распространения и характеристик трещинных зон. Для иллюстрации рассмотрим ситуацию, когда осуществляется разработка одного калийного пласта при использовании камерной системы разработки без закладки выработанного пространства. В данной системе разработки, после

извлечения полезного ископаемого, оставленные пустоты не заполняются, что может привести к более интенсивному образованию трещин и увеличению их распространения. При этом важно учитывать, что без закладки выработанного пространства напряжения в горных породах перераспределяются, усиливая деформации и способствуя образованию водопроводящих трещин. Этот процесс может значительно повлиять на эксплуатационную безопасность и требует тщательного мониторинга и прогноза для предотвращения возможных негативных последствий.

Высота распространения техногенных водопроводящих трещин H_T определяется по формуле (1.6):

$$H_T = d \cdot m_{\text{пр}}, \quad (1.6)$$

где d – эмпирический параметр, зависящий от системы разработки и глубины ведения работ; $m_{\text{пр}}$ – приведённая вынимаемая мощность.

При камерной системе разработки параметр d определяется по формуле (1.7):

$$d = 26 - 0.01 \cdot H, \quad (1.7)$$

где H – глубина ведения горных работ в пределах от 350 до 1000 м; при глубине ведения горных работ более 1000 метров H принимается равной 1000 или устанавливается отдельными рекомендациями отраслевого института.

Приведенная вынимаемая мощность пласта $m_{\text{пр}}$ определяется по формуле (1.8):

$$m_{\text{пр}} = m_{\text{в}} \cdot k_{\text{и}} \cdot k, \quad (1.8)$$

где $m_{\text{в}}$ – вынимаемая мощность пласта, м; $k_{\text{и}}$ – коэффициент извлечения рудной массы в пределах вынимаемой мощности; k – коэффициент, учитывающий размер выработанного пространства.

Прогноз максимальной высоты ЗВТ косвенно учитывает степень нагружения междукамерных целиков посредством использования коэффициента извлечения (1.8). Проверка по фактической степени нагружения целиков в использованной системе разработки не выполняется.

Верхнекамское месторождение

Условия геомеханически безопасной подработки ВЗТ верхнекамского месторождения схожи с таковыми на Старобинском (1.4) [67]. Для определения мощности ПВП, используется анализ величины прогиба слоев ВЗТ, и удалённость от отрабатываемого пласта. Величина прогиба, V_m , является критическим параметром, указывающим на степень изгиба и деформации водозащитной толщи. Расстояние влияет на распределение напряжений и, следовательно, на вероятность возникновения трещин.

Значение расчетной мощности m_j , сохраняет свою целостность, определяется ординатой пересечения отрезка $h = h_j$ с прямой $V_m = const$. Это означает, что для каждого слоя каменной соли существует определенная мощность, при которой слой остается целостным и не подвергается разрушению. На (Рисунок 1.5) приводится графическое представление этой зависимости, что помогает визуализировать взаимосвязь между прогибом, мощностью слоя и отсутствием трещин.

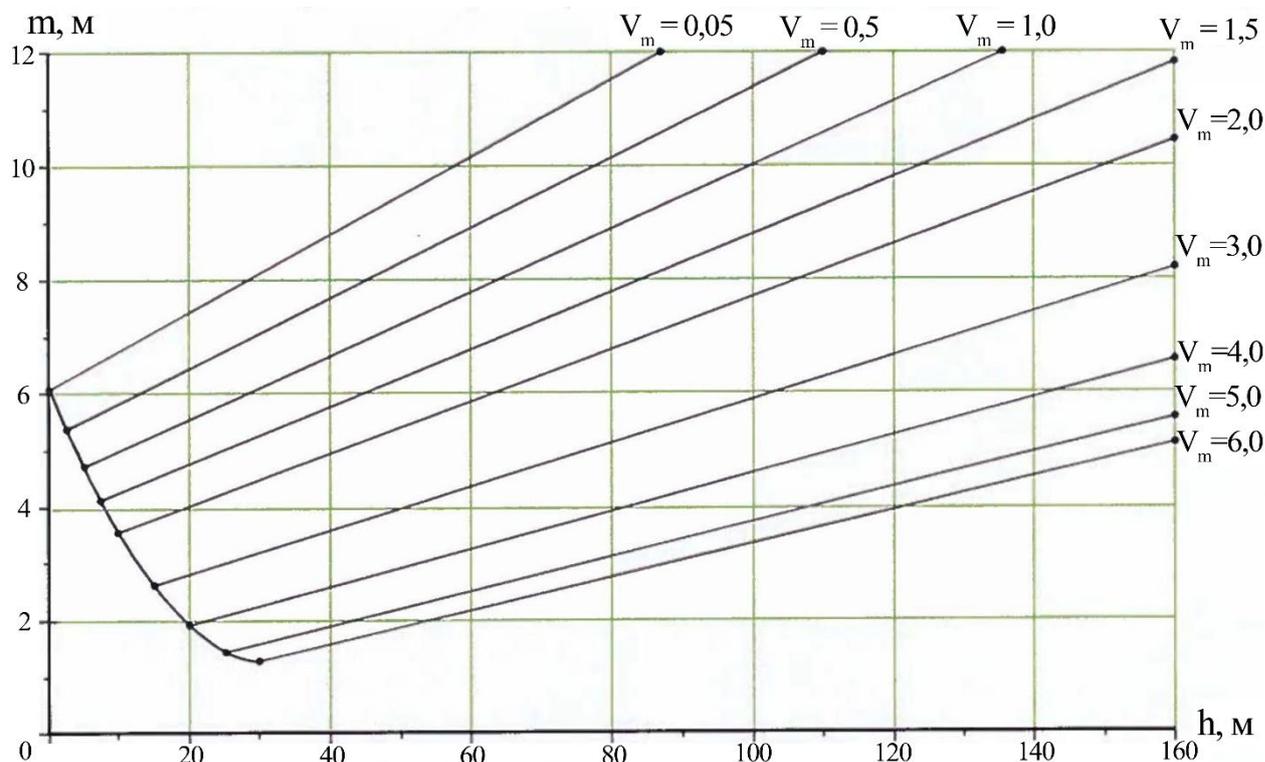


Рисунок 1.5 – Диаграмма для определения безопасных параметров разработки

Таким образом, условие (1.4) отражается в формуле прогибов слоёв ВЗТ(1.9):

$$V_m \geq [V_m], \quad (1.9)$$

где V_m – расчетное значение максимального прогиба, м; $[V_m]$ – величина допустимого прогиба слоёв, м.

Расчетное значение прогиба слоёв ВЗТ V_m определяется суммированием соответствующих значений V_{omi} , вызванных отработкой каждого из пластов (1.10):

$$V_m = \sum_{j=1}^n V_{omi}, \quad (1.10)$$

где V_{omi} – расчетное значение максимального прогиба слоёв водозащитной толщи от отработки i -го пласта; n – количество обрабатываемых пластов.

На заданный период времени t расчетное значение максимального прогиба слоёв ВЗТ, определяется из выражения (1.11):

$$V_{om} = k_t \cdot V_{ok}, \quad (1.11)$$

где k_t – эмпирический временной коэффициент; V_{ok} – расчетное значение максимального прогиба на период окончания процесса сдвижения земной поверхности, м.

Степень нагружения МКЦ сильвинитового пласта $C < 0.32$ коэффициент k_t при прогнозе до 200 лет определяется из линейной зависимости (1.12):

$$k_t = 0.2 \cdot \frac{t}{100}, \quad (1.12)$$

где t – заданный период времени, лет.

Степень нагружения МКЦ сильвинитового пласта $C \geq 0.32$ определяет коэффициент k_t по формуле (1.13):

$$k_t = \beta_z \cdot \left(\frac{t}{100} \right)^{a_z}, \quad (1.13)$$

где β_z и a_z – эмпирические параметры.

Расчетное значение максимального прогиба слоев водозащитной толщи от отработки одного сильвинитового пласта на период окончания процесса сдвижения определяется по формулам (1.14) и (1.15):

1. при степени нагружения междукламерных целиков $C < 0.32$

$$V_{ok} = 0.9 \cdot \omega \cdot m_0 \cdot p \cdot \left(\frac{C}{0.32} \right)^2, \quad (1.14)$$

2. при степени нагружения междукламерных целиков $C \geq 0.32$

$$V_{ok} = 0.9 \cdot \omega \cdot m_0 \cdot p, \quad (1.15)$$

где ω – расчетный коэффициент извлечения; m_0 – вынимаемая мощность при отработке пласта, м; p – параметр, учитывающий влияние закладки очистных камер; C – степень нагружения междукламерных целиков.

Расчетная степень нагружения МКЦ определяется по формуле (1.16):

$$C = \frac{\lambda_0 \cdot l}{b \cdot k_f}, \quad (1.16)$$

где λ_0 – параметр, характеризующий горнотехнические условия отработки рассматриваемого пласта; l – межосевое расстояние, м; b – расчетная ширина междукламерных целиков, м; k_f – коэффициент формы.

Горнотехнические условия отработки определяются по формуле (1.17):

$$\lambda_0 = \xi \frac{\gamma \cdot H_0}{\sigma_{om}}, \quad (1.17)$$

где ξ – коэффициент, учитывающий влияния горнотехнических факторов; γ – объемный вес налегающей толщи пород, Н/м³; H_0 – глубина залегания обрабатываемого

пласта, м; σ_{om} – агрегатная прочность пород в массиве в пределах расчетной высоты междукамерных целиков, Па.

Расчёт суммарной мощности ненарушенных слоев пород, слагающих ВЗТ основан на сопоставлении мощности деформированного слоя и его отдалённости от разрабатываемого пласта с прогнозными максимальными значениями прогиба и оседаний земной поверхности (Рисунок 1.5), (1.17) и (1.18). Для прогнозирования развития оседаний земной поверхности во времени используется метод типовых кривых. Этот метод включает обработку графиков, которые отображают нарастание относительных величин оседаний земной поверхности в зависимости от степени нагружения междукамерных целиков. Анализ этих графиков позволяет определить динамику изменений и предсказать дальнейшее развитие оседаний.

Гремячинское месторождение

Нормативная документация Гремячинского месторождения дополняет выше приведённые определением высоты распространения зоны техногенных водопроводящих трещин с запасом для условий с неизученным характером процессов сдвижения рассчитывается по формуле (1.18) [46]:

$$H_{тр} = 0.28 \cdot \frac{\eta_0}{\varepsilon_{кр}} \cdot k_t, \quad (1.18)$$

где η_0 – величина максимального оседания на рассматриваемом участке, м;
 $\varepsilon_{кр} = 6 \cdot 10^{-3}$ – критическая деформация; $k_t = 0.5$ – коэффициент, учитывающий уменьшение скорости деформирования подрабатываемой толщи горных пород при камерной отработке.

Величина максимального оседания определяется из выражения (1.19):

$$\eta_0 = \omega \cdot m_0 \cdot p \cdot q_0, \quad (1.19)$$

где ω – коэффициент извлечения из недр; m_0 – выемочная мощность пласта; p – коэффициент, учитывающий влияние закладки; $q_0 = 0.9$ – относительная величина максимального оседания.

Условия безопасной подработки (1.20) ВЗТ определяются по соотношению высоты ВЗТ и мощности ВЗТ:

$$h_0 > H_{тр}, \quad (1.20)$$

$$h_0 = h_B - [\Delta h] - h_{ВП}, \quad (1.21)$$

где h_0 – расстояние от кровли отработываемого пласта до нижней границы ВП, определяется по формуле (1.21); h_B – минимально необходимая мощность ВЗТ, м; $[\Delta h] = 10$ м – возможная погрешность определения ВЗТ; $h_{ВП} = 15$ м – мощность ВП; $H_{тр}$ – высота ВЗТ, м.

Прогноз максимальной высоты ЗВТ косвенно учитывает степень нагружения междукамерных целиков посредством использования коэффициента извлечения(1.19). Дополнительно производится проверка по степени нагружения междукамерных целиков.

Определение высоты ЗВТ по граничной кривизне

Методика профессора В. Н. Гусева [24 – 26], основанная на деформационном параметре, определяемом по содержанию глинистых пород в деформируемом слое, представляет собой важный подход к расчету высоты водопродящих трещин. Натурные исследования показали, что высота зоны водопродящих трещин увеличивается с уменьшением содержания глинистых пород, таких как алевролиты, аргиллиты и глинистые сланцы. Эта зависимость учитывается через параметр граничной кривизны $K_{Г}$, который обозначает максимальную кривизну на верхней границе зоны водопродящих трещин и зависит от литологического состава подрабатываемой толщи пород. Физико-механические свойства пород, принадлежащих к одной литологической разности, а также их различное положение относительно обрабатываемого пласта, существенно влияют на распределение $K_{Г}$. Согласно методике высота ЗВТ определяется по формуле (1.22):

$$H_T = 2 \sqrt{\frac{m}{K_{Г}c}}, \quad (1.22)$$

где H_T – высота ЗВТ, м; m – вынимаемая мощность, м; $K_{Г}$ – граничная кривизна m^{-1} , c – относительный центр распределения пород подработанной толщи.

В общем виде зависимость граничной кривизны от литологического состава выражается следующим образом. Эта зависимость позволяет определить, как изменения в литологическом составе влияют на максимальную кривизну верхней границы ЗВТ. Далее в тексте представлена формула (1.23), которая количественно описывает эту зависимость:

$$K_{Г} = ae^{bA}10^{-3}[m^{-1}], \quad (1.23)$$

Относительный центр распределения пород определяется с помощью следующей формулы. Этот показатель помогает понять, как распределены массы (мощности) слоев относительно их фактического центра. Формула (1.24) выглядит следующим образом:

$$c = \frac{L_{\phi}}{L}, \quad (1.24)$$

где L_{ϕ} – расстояние от пласта до фактического положения центра распределения масс слоев, м; L – расстояние до центра масс слоев в случае их равномерного распределения в пределах рассматриваемой толщи, м.

Приведённая методика показала свою эффективность на месторождениях со слоистой структурой ВЗТ, в породах которой присутствуют прослойки глинистых структур.

Тем не менее, для корректного прогноза необходимо иметь достоверные данные о строении пород ВЗТ и содержании в них глинистых частиц. Это позволяет учитывать все возможные вариации в литологическом составе и физико-механических свойствах пород, что критически важно для обеспечения безопасности и эффективности горных работ.

Методика прогноза оседаний земной поверхности

В упомянутых указаниях [46, 58, 67] прогноз оседаний земной поверхности осуществляется эмпирическим методом типовой кривой. Анализ оседаний земной поверхности в данных подходах служит важным критерием для оценки целостности ВЗТ. Теория линейной вязкоупругости нашла своё отражение в прогнозе оседаний поверхности [10] при отработке продуктивной толщи пород, склонных к проявлению реологических свойств.

Эта теория получила широкое признание для описания длительных деформаций. Основная идея теории заключается в том, что деформации, зависят не только от текущих напряжений, но и от всех предыдущих деформаций. Это учитывается по принципу суперпозиции Больцмана [10, 9, 19, 29, 61], что обеспечивает более точное моделирование поведения горных пород в условиях длительного воздействия нагрузок.

Такой подход позволяет учитывать накопленные эффекты деформации, что критически важно для точного прогноза и предотвращения возможных негативных последствий оседаний земной поверхности. Это в свою очередь помогает в планировании и реализации более эффективных и безопасных горных работ.

Данная теория описывается следующим интегральным уравнением Вольтерра второго рода (1.25) [103]:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \frac{1}{E} \int_0^t K(t - \tau) \sigma(\tau) d\tau, \quad (1.25)$$

где $\sigma(t), \sigma(\tau)$ – текущие напряжения и деформации; $K(t - \tau)$ – ядро наследственности (ползучести), отражающее влияние на деформацию в момент времени t нагрузки, приложенной в момент времени τ ; E – модуль упругости.

Наибольшее распространение в задачах геомеханики, связанных с описанием ползучести пород, склонных к проявлению реологических свойств, получила модель Абелева Ядра (1.26). Эта модель широко используется для описания поведения соляных пород под длительными нагрузками, так как она позволяет учитывать временные изменения в деформациях и предсказывать долговременную стабильность горных выработок. Абелево Ядро предоставляет точные инструменты для моделирования процесса ползучести, что

является ключевым для разработки эффективных стратегий управления и поддержания устойчивости соляных рудников [7, 9, 41, 62]:

$$K(t - \tau) = \delta(t - \tau)^{-\alpha}, \quad (1.26)$$

где α, δ – параметры Абелева ядра ползучести ($0 < \alpha < 1; \delta > 0$).

Опыты с соляными породами, указывают на зависимость параметров ядра ползучести Абеля от нагрузки. В результате этих исследований было выявлено, что ползучесть каменной соли можно более точно моделировать, учитывая нагрузку, что значительно улучшает точность прогнозов.

Согласно методике [10] кривые ползучести заменяются графиками оседаний земной поверхности. Эти графики позволяют визуализировать изменения во времени, что облегчает анализ и прогнозирование. Далее в тексте представлена формула (1.27), которая используется для определения развития оседаний поверхности:

$$v(t) = v_0 \cdot (1 + \Phi(t)), \quad (1.27)$$

где v_0 – упругие смещения, $\Phi(t)$ – функция ползучести.

Наращение оседаний земной поверхности описывается степенной функцией ползучести (1.28):

$$\Phi(t) = \frac{\delta \cdot t^{1-\alpha}}{(1 + e^{\rho-\beta \cdot t})}, \quad (1.28)$$

где $\alpha, \beta, \delta, \rho$ – эмпирические реологические параметры.

Учет реологических свойств в математической модели осуществляется по принципу Вольтера [10, 103]. В модели изменяемым параметром принят модуль упругости отрабатываемого пласта. Таким образом, параметры реологической модели приняты на основе инструментальных наблюдений. На сегодняшний день, представленная математическая модель применяется на ВКМКС.

1.5 Мониторинг за деформациями очистных камер и земной поверхности

Инструментальные наблюдения за деформациями очистных камер включают измерение вертикальных и горизонтальных перемещений контурных реперов в течение времени. Эти измерения позволяют детально отслеживать изменения и выявлять потенциальные риски. Конвергенция выработки оценивается на основе двух ключевых показателей. Первый – это горизонтальная составляющая конвергенции, которая определяется путем измерения расстояния между реперами, установленными в противоположных боковых стенках камеры. Второй показатель – вертикальная составляющая конвергенции, измеряемая по расстоянию между реперами, установленными в кровле и в почве камеры. Эти данные позволяют получить полное представление о

деформационных процессах и обеспечить своевременные меры для поддержания устойчивости и безопасности горных выработок.

Наблюдательная станция, состоящая из контурных реперов, представляет собой пару деревянных пробок (репера), которые закладываются в противоположных боковых стенках очистной камеры (Рисунок 1.6. а). Каждый репер оборудуется биркой с названием репера. В качестве критерия перехода междукамерных целиков в стадию прогрессирующей ползучести, по рекомендации ГИ УрО РАН, используется увеличение скорости их поперечного деформирования до 50 мм/м в год. При выполнении измерения по контурным реперам большая по величине скорость конвергенции может быть вызвана не только разрушением всего целика, но и локальным отслоением краевой части. Поэтому, при достижении скорости деформирования от 15 до 20 мм/м в год, принимается решение о продолжении наблюдений на существующей наблюдательной станции или о создании на контролируемом участке наблюдательной станции, в состав которой входят глубинные репера, закладываемые в стенки выработки на глубину 0,5 м, 1 м и 2 м. Последующее измерение конвергенции проводится между соответствующими глубинными реперами. Схема глубинной наблюдательной станции отражена (Рисунок 1.6. б).

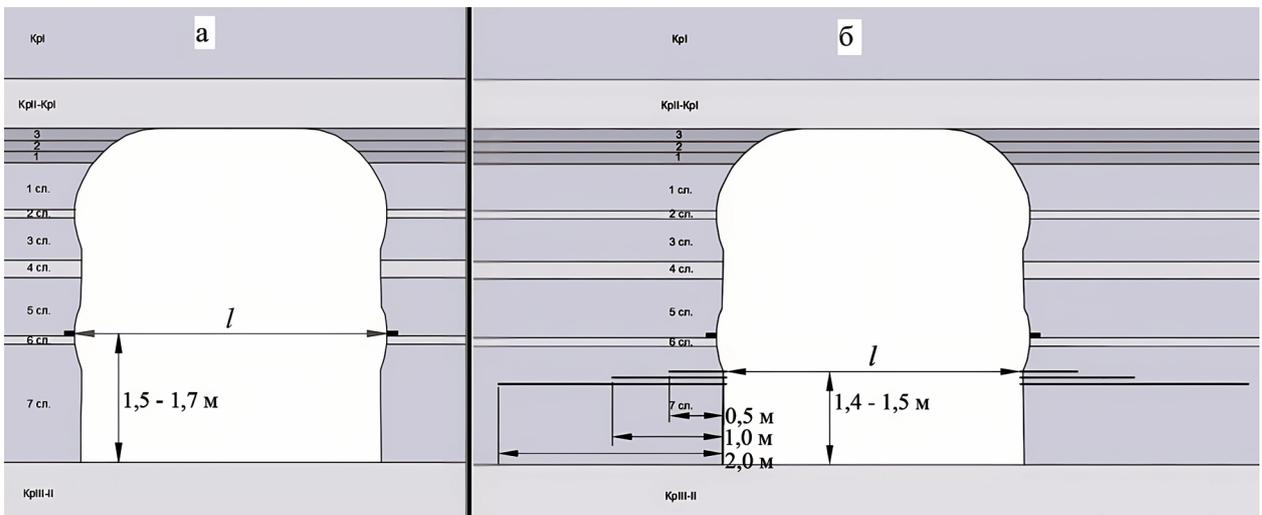


Рисунок 1.6 – Конструкция наблюдательной станции для контроля устойчивости междукамерных целиков

Периодические измерения горизонтальной конвергенции очистных камер проводятся:

- для оценки состояния конструктивных элементов системы разработки;
- для определения скорости поперечного деформирования междукамерных целиков;
- для выявления и уточнения закономерностей развития процесса сдвижения в различных условиях.

Мероприятия позволяют:

- оценить влияние добычных работ на состояние горного массива;
- оценить эффективность принятых мер охраны и предупреждения опасных деформаций в геомеханической системе «камера – целик»;
- своевременно определить зоны, в которых необходимо выполнить закладку выработанного пространства до полного разрушения междукамерных целиков и других элементов системы разработки.

Обработав результаты инструментальных наблюдений за деформированием МКЦ, составляется карта относительных скоростей горизонтальных деформаций целиков. (Рисунок 1.7, а).

Наблюдения за изменением мульды сдвижения являются основой для разработки мероприятий по защите рудников. На основании результатов мониторинга за вертикальными и горизонтальными смещениями земной поверхности выполняется анализ процесса сдвижения земной поверхности на площади рудника и оценка принятых горных мер охраны ВЗТ и подработанных объектов.

С целью выявления характера процесса развития мульды сдвижения при различных горно-геологических условиях отработки и его влияния на объекты земной поверхности шахтного поля, закладываются профильные линии, их ориентируют нормально друг к другу. Среднее расстояние между рабочими реперами принимается порядка 20 – 40 м. По реперам геодинимического полигона производится нивелирование в соответствии с точностью II класса. На (Рисунок 1.7, б) представлены профильные линии 3,4 и 5.

Результатом наблюдений являются графики оседаний и скоростей оседаний земной поверхности (Рисунок 1.7, в). По ним явно выделяются участки повышенного риска по возникновению гидравлически связанной системы трещин в ВЗТ. Фактические скорости оседаний поверхности служат индикатором состояния междукамерных целиков. Согласно методике, представленной в [67], по скоростям оседаний возможно рассчитать соответствующую степень нагружения целиков.

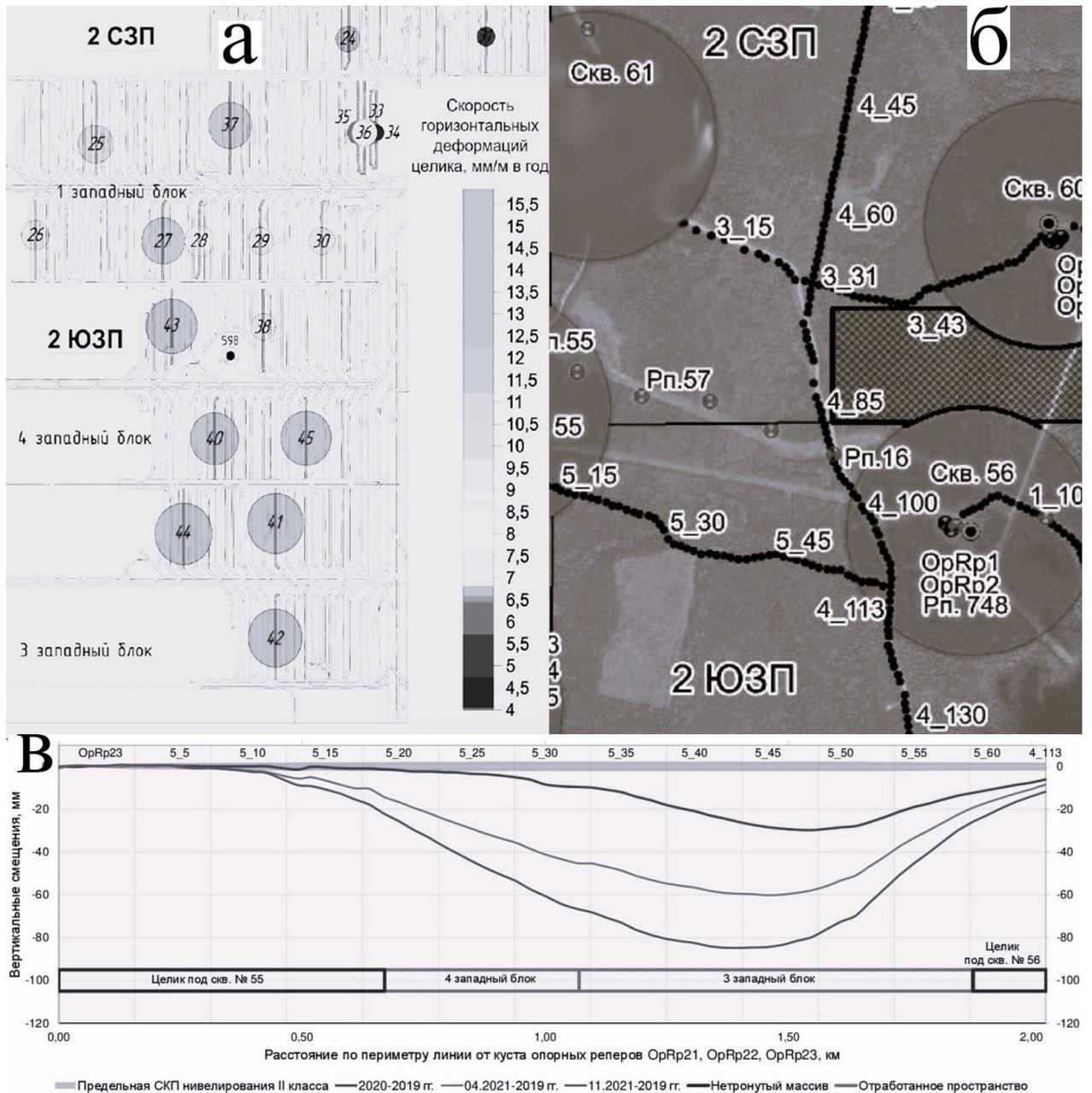


Рисунок 1.7 – Результаты инструментальных наблюдений на Палашерском участке ВКМКС

а – карта относительных скоростей горизонтальных деформаций целиков; б – участок сети профильных линий; в – график оседаний по профильной линии 5

1.6 Геомеханические модели деформирования соляных пород

Современные методы описания поведения материалов под воздействием длительных нагрузок часто включают феноменологический подход. Этот подход заключается в определении параметров и вида отдельных функций на основе эмпирических данных, что позволяет адаптировать модели к реальным условиям. Основное преимущество феноменологического подхода заключается в его гибкости, что делает его особенно полезным для прогнозирования долгосрочных деформаций и разрушений материалов. Для прогноза НДС пород, обладающих реологическими свойствами, широко используются

модели, основанные на решении задач механики сплошной среды. Эти модели учитывают поведение материала как единого непрерывного тела, что позволяет проводить более точные расчёты. В них включены ряд допущений, которые упрощают анализ и делают возможным учёт факторов, определяющих поведение пород под нагрузкой. Важным аспектом таких моделей является возможность прогнозирования поведения пород в условиях реальных горных выработок. Это включает учёт временных изменений в напряженно-деформированном состоянии пород, что особенно важно для соляных пород, известных своей склонностью к ползучести. Разработка и применение таких моделей требуют глубокого понимания механики материалов и значительного количества экспериментальных данных для калибровки и верификации.

Расширение этих моделей и включение в них новых данных из натуральных наблюдений и лабораторных экспериментов позволяет постоянно улучшать точность прогнозов. Это критически важно для обеспечения безопасности и эффективности горных работ, так как помогает предотвратить возможные аварийные ситуации и оптимизировать процессы добычи.

Численный метод позволяет точно учитывать особенности поведения пород под длительными нагрузками. Этот прикладной метод позволяет корректно прогнозировать развитие геомеханических процессов в специфических горно-геологических условиях. Благодаря ему можно предсказывать изменения в напряженно-деформированном состоянии пород и разрабатывать эффективные стратегии для предотвращения разрушений. Модель обеспечивает всесторонний анализ и учитывает широкий спектр факторов, влияющих на устойчивость горных выработок, что критически важно для обеспечения безопасности и эффективности горных работ.

Ввиду техногенных процессов разрушения, прогноз НДС соляных пород должен основываться на реологической модели ползучести. Эта модель должна быть тщательно адаптирована и параметры её корректно определены для конкретных горнотехнических условий. Реологическая модель позволяет учитывать временные аспекты деформации, обеспечивая более точное предсказание поведения пород под длительными нагрузками. Прогнозирование на основе реологической модели ползучести критически важно для разработки эффективных стратегий управления и поддержания устойчивости горных выработок. Корректное определение параметров модели для конкретных условий позволяет предвидеть возможные деформации и разрушения, что значительно повышает безопасность и эффективность горных работ. В механике при оценке прочности материалов широко распространены теории течения, упрочнения и старения.

Теория течения предполагает, что существует зависимость между скоростью пластической деформации, напряжением и временем, общий вид представлен формулой (1.29).

$$F(t, \dot{\epsilon}, \sigma) = 0. \quad (1.29)$$

Теория старения предполагает, что существует постоянная зависимость между температурой, деформацией, напряжением и временем, общий вид представлен формулой (1.30).

$$F(\epsilon, \sigma, t) = 0. \quad (1.30)$$

Теория упрочнения предполагает, что существует зависимость между пластической деформацией, скоростью деформации и напряжением, общий вид представлен формулой (1.31). В явном виде время не содержится в уравнении.

$$F(\epsilon, \dot{\epsilon}, \sigma) = 0. \quad (1.31)$$

Главным недостатком упомянутых теорий является неинвариантность относительно изменения отчета времени, за счет того, что время включено в явном виде.

Используемые в практике модели деформирования пород, склонных к проявлению реологических свойств, поддаются условному делению:

- I. эмпирические модели, описывающие устойчивые деформации ползучести, в которых не отображена дилатансия;
- II. вязкоупругие модели, описывающие переходные и установившиеся деформации ползучести, дилатансия в них также не отображена;
- III. вязкопластические модели ползучести, описывающие переходные и установившиеся деформации ползучести с учетом дилатансии и соответствующих повреждений.

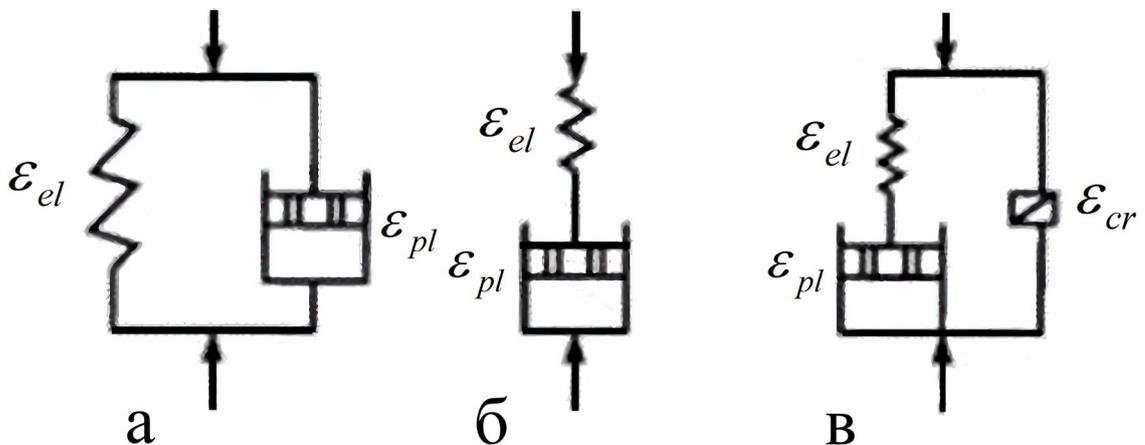


Рисунок 1.8 – Схематическое изображение вязкоупругих моделей;
а – модель Кельвина; б – модель Максвелла; в – модель Бингама –Шведова

Одни из самых первых моделей длительной деформации материала – это модели, основанные на использовании тел Гука, Ньютона и Сен-Венана [18, 19, 70, 105], модели

Максвелла, Кельвина – Фойгта, Бингама, Шведова [75, 83, 85, 86]. На (Рисунок 1.8) приведены схематическое изображение моделей. На основе сочетаний вязкоупругих моделей были разработаны более сложные реологические модели [20, 71, 87, 88].

Модели деформирования соляных пород, разработанных W. Wittke, T. Doering, J. R. Kiehl, C. Erichsen [82, 84, 97, 98, 99, 104] нашла свое применение при расчете напряженно-деформированного состояния ВКМКС в рамках диссертационной работы, выполненной А. О. Ермашовым [30].

Как уже упоминалось, теория наследственной ползучести является наиболее распространенной для описания длительной деформации горных пород. Параметры ядра ползучести Абея, как показали многочисленные исследования, зависят от уровня нагрузки. Ученые, такие как А. А. Барях, Ж. С. Ержанов и С. А. Константинова, подтвердили этот факт в своих многочисленных экспериментах с каменной солью [29, 40]. С увеличением глубины залегания пород наблюдается значительный рост нагрузки, что требует учета нелинейного поведения породы. Это связано с тем, что на больших глубинах горные породы испытывают более высокие напряжения, что приводит к сложным деформационным процессам. Учет этих факторов позволяет более точно моделировать поведение пород и предсказывать их долгосрочную стабильность под действием нагрузок.

Понимание и моделирование этих процессов является ключевым для обеспечения безопасности и эффективности горных работ, так как позволяет разработать меры для предотвращения прогрессирующего разрушения пород в условиях значительных нагрузок.

Модель Друкера – Прагера

Первоначально модель разработана для описания механического поведения металлов и сплавов, но при подборе соответствующих параметров модели она способна в том числе описывать поведение соляных пород. Для описания солей с использованием модели Друкера – Прагера необходимо корректно рассчитать поверхность текучести материала. Использование критерия текучести Друкера – Прагера в модели позволяет отобразить пластические деформации (мгновенные) и деформации текучести (длительные). В основе модели принято представление о существовании изоповерхностей ползучести точек напряжения, которые имеют одинаковую «интенсивность» ползучести, измеренную эквивалентным напряжением ползучести (σ_{cr}). Материал пластифицируется по эквивалентной поверхности ползучести, которая совпадает с поверхностью текучести. Это возможно благодаря определению эквивалентной поверхности ползучести путем равномерного уменьшения поверхности текучести.

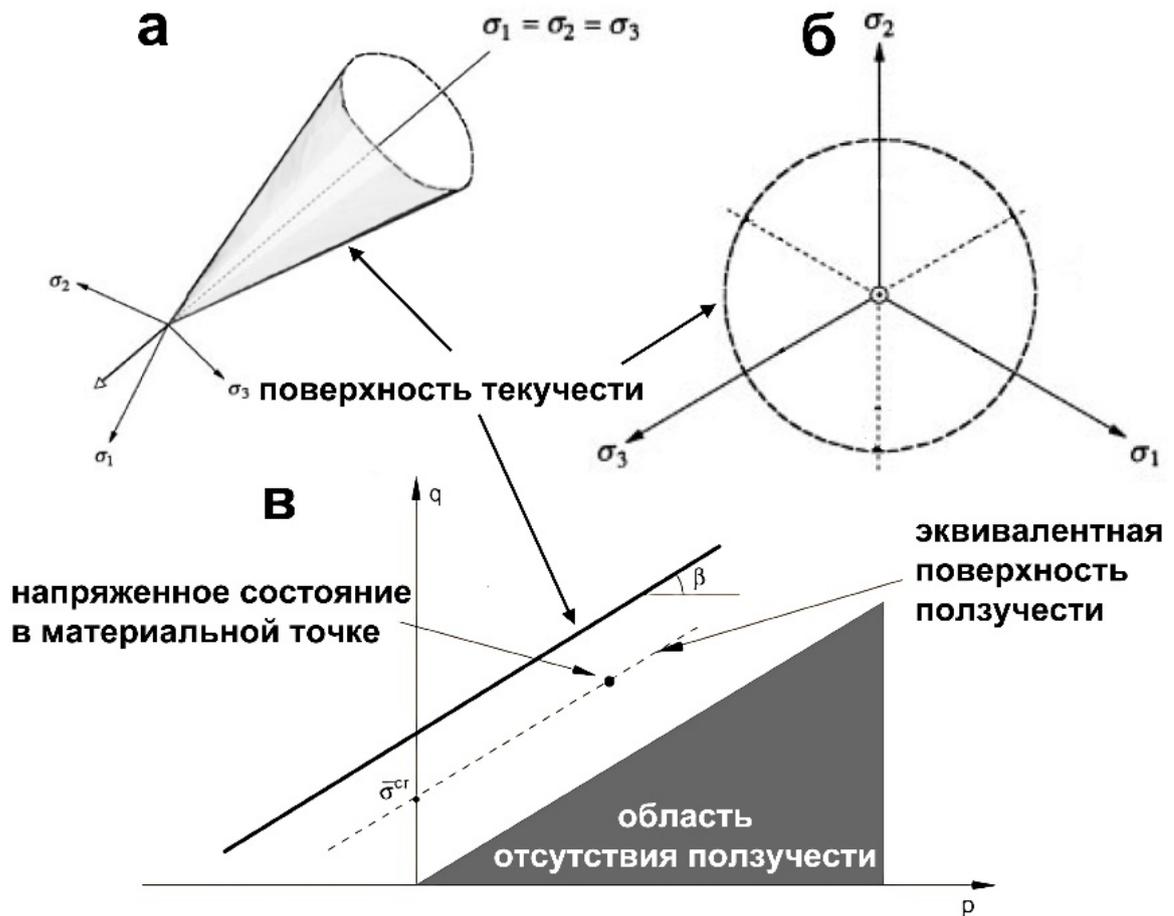


Рисунок 1.9 – Эквивалентное напряжение ползучести в модели Друкера – Прагера: а – в осях главных напряжений, б – в девиаторной плоскости, в – в плоскости среднего и девиаторного напряжения

Поверхность пластичности материала в пространстве главных напряжений представляет собой конус (Рисунок 1.9, а), а в девиаторной плоскости отображается окружностью (Рисунок 1.9, б). На (Рисунок 1.9, в) в плоскости среднего и девиаторного напряжения ($p - q$) представлена изоповерхность ползучести, определяемая поверхностью текучести [16]. Деформации ползучести, соответствующие третьей стадии деформирования, определяются следующим образом (1.32):

$$\dot{\varepsilon}_{cr}^t = \frac{1}{\eta_t} \langle F_t \rangle \frac{\partial Q_t}{\partial \sigma}, \quad (1.32)$$

где Q_t – функция пластического потенциала, соответствующая развитию деформации на третьей стадии; F_t – функция поверхности пластического течения, соответствующая развитию деформаций ползучести на третьей стадии; η_t – вязкость.

В программном комплексе Simulia Abaqus модель Друкера – Прагера отражает зависимость скорости относительной деформации ползучести от эквивалентного напряжения ползучести уравнением (1.33) [16, 100, 101, 107]:

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = (A \cdot (\sigma^{cr})^n \cdot [(m + 1) \cdot \varepsilon^{cr}]^m)^{\frac{1}{m+1}}, \quad (1.33)$$

где $\dot{\varepsilon}^{cr}$ – скорость относительной деформации ползучести; σ^{cr} – эквивалентное напряжение ползучести; ε^{cr} – относительная деформация ползучести; A, m, n – параметры ползучести материала, заданные как функции от температуры и напряженного состояния.

Превышение напряжениями значения длительной прочности сопровождается развитием микротрещин, а, следовательно, происходит дилатансионное разупрочнение среды с последующем ростом объемных деформаций. Данный процесс сопровождается сжатием поверхности пластического течения до размеров, при которых граница течения не превышает значения длительной прочности. Изменение размеров поверхности зависит от объемных деформаций и модуля спада. При уменьшении границы течения до 0 завершается процесс разуплотнения материала, прочность среды характеризуется как остаточная [82, 96, 106].

Модель Друкера – Прагера является широко распространённой математической моделью в специализированных программных комплексах и способна достоверно описать длительные деформации ползучести соляных пород. Её реализация в компьютерном ПО Simulia Abaqus CAE будет использована в настоящей работе.

1.7 Геомеханическая модель хрупкого разрушения горных пород

Для обеспечения численного моделирования процесса хрупкого разрушения пород, слагающих ВЗТ, используется модель Concrete Damaged Plasticity, реализованная в компьютерном ПО Simulia Abaqus CAE, использующая явный решатель. Модель представляет собой сплошную среду, в которой отражены неупругие деформации.

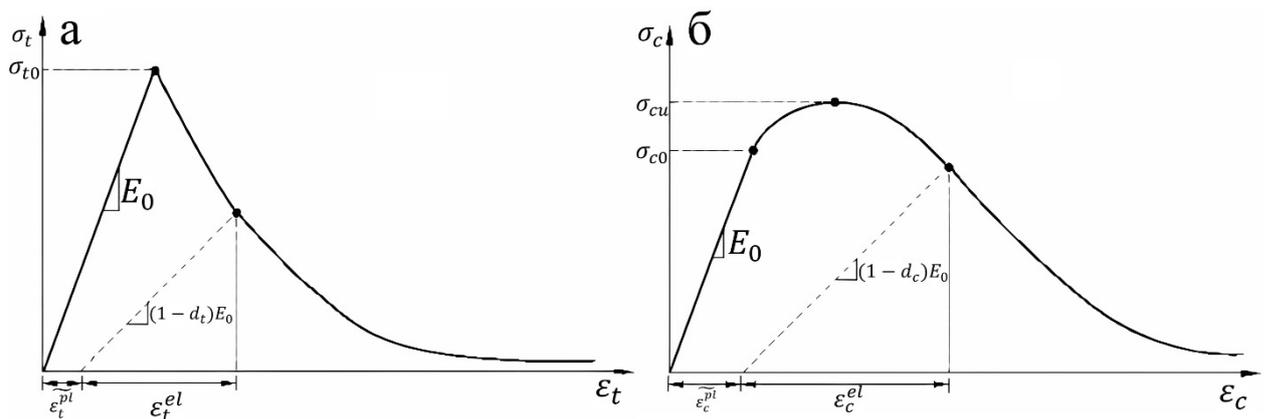


Рисунок 1.10 – Реакция материала на одноосную нагрузку
а – при растяжении; б – при сжатии

Механизм разрушения в модели представлен растрескиванием при растяжении и сжатии материала. Развитие поверхности текучести (разрушения) в процессе деформации определяется двумя переменными упрочнения, связанными с механизмами разрушения при нагрузке растяжения и сжатия – $\widetilde{\varepsilon}_t^{pl}$ и $\widetilde{\varepsilon}_c^{pl}$, эквивалентные пластические деформации

растяжения и сжатия, соответственно. Модель предусматривает взаимосвязь реакции материала на одноосное растяжение и сжатие и пластической деформации, как показано на (Рисунок 1.10).

При одноосном растяжении реакция растяжения-деформации подчиняется линейной упругой зависимости до тех пор, пока не будет достигнуто значение предела прочности – σ_{t0} . Предел прочности соответствует возникновению микротрещин в материале. При нагрузках выше предела прочности на растяжение в материале возникают трещины на макроуровне, что отражается на графике реакции напряжения и деформации – реакция материала уменьшается. Образование микротрещин вызывает локализацию деформаций в структуре материала.

При одноосном сжатии реакция материала линейна до достижения значения начальной текучести, σ_{c0} . Начальной текучести соответствует возникновение микротрещин в материале и пластических деформаций – происходит накопление пластических деформаций и пластическое упрочнение материала до значений предела прочности σ_{cu} .

Приведенные обобщенные диаграммы деформирования материала в модели представлены в виде зависимости напряжений от пластической деформации, формулы (1.34) и (1.35):

$$\sigma_t = \sigma_t \left(\widetilde{\varepsilon}_t^{pl}, \widetilde{\dot{\varepsilon}}_t^{pl} \right), \quad (1.34)$$

$$\sigma_c = \sigma_c \left(\widetilde{\varepsilon}_c^{pl}, \widetilde{\dot{\varepsilon}}_c^{pl} \right), \quad (1.35)$$

где σ_t , σ_c – напряжения растяжения и сжатия соответственно; $\widetilde{\varepsilon}_t^{pl}$, $\widetilde{\varepsilon}_c^{pl}$ – эквивалентные пластические деформации растяжения и сжатия, соответственно; $\widetilde{\dot{\varepsilon}}_t^{pl}$, $\widetilde{\dot{\varepsilon}}_c^{pl}$ – эквивалентные скорости пластической деформации растяжения и сжатия, соответственно.

При нагрузках выше предела прочности материала на одноосное сжатие σ_{cu} в материале возникают трещины – реакция материала уменьшается. Жесткость материала, как в случае с растягивающим напряжением, уменьшается. В модели жесткость материала представлена в виде уменьшающейся упругой жесткости – E_0 . Дegrадация упругой жесткости характеризуется двумя переменными повреждения (d_t , d_c), которые считаются функциями пластических деформаций, формулы (1.36) и (1.37):

$$d_t = d_t \left(\widetilde{\varepsilon}_t^{pl} \right); 0 \leq d_t \leq 1, \quad (1.36)$$

$$d_c = d_c \left(\widetilde{\varepsilon}_c^{pl} \right); 0 \leq d_c \leq 1, \quad (1.37)$$

где d_t , d_c – переменные повреждения от воздействия растягивающей и сжимающей нагрузки, соответственно.

Переменные повреждения могут принимать значения от нуля, соответствующее неповрежденному материалу, до единицы – полная потеря прочности. Зависимости напряжения от деформации при одноосном растяжении и сжатии составляют соответственно формулы (1.38) и (1.39):

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0 \left(\varepsilon_t, -\widetilde{\varepsilon}_t^{pl} \right), \quad (1.38)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0 \left(\varepsilon_c, -\widetilde{\varepsilon}_c^{pl} \right), \quad (1.39)$$

где E_0 – упругая жесткость материала; $\varepsilon_t, \varepsilon_c$ – общие относительные деформации при растяжении и сжатии, соответственно.

При воздействии растягивающих напряжений деформации растрескивания $\widetilde{\varepsilon}_t^{ck}$ определяется как разница между общей деформации и упругой деформацией (1.40):

$$\widetilde{\varepsilon}_t^{ck} = \varepsilon_t - \varepsilon_t^{el}, \quad (1.40)$$

где $\widetilde{\varepsilon}_t^{ck}$ – деформация растрескивания; ε_t^{el} – упругая деформация.

Упругие деформации, соответствующие неповрежденному материалу, определяются как отношение напряжения к упругой жесткости материала (1.41):

$$\varepsilon_{t/c}^{el} = \frac{\sigma_{t/c}}{E_0}, \quad (1.41)$$

Взаимосвязь между эквивалентной пластической деформацией растяжения и деформацией растрескивания выражается в уравнении (1.42):

$$\widetilde{\varepsilon}_t^{pl} = \widetilde{\varepsilon}_t^{ck} - \frac{d_t}{1 - d_t} \frac{\sigma_t}{E_0}, \quad (1.42)$$

При воздействии сжимающих напряжений в модели материала деформации разрушения (неупругие) $\widetilde{\varepsilon}_c^{ln}$ определяется как разница между общей деформации и упругой деформацией (1.43):

$$\widetilde{\varepsilon}_c^{ln} = \varepsilon_c - \varepsilon_c^{el}, \quad (1.43)$$

Взаимосвязь между эквивалентной пластической деформацией сжатия и деформацией разрушения выражается в уравнении (1.44):

$$\widetilde{\varepsilon}_c^{pl} = \widetilde{\varepsilon}_c^{ln} - \frac{d_c}{1 - d_c} \frac{\sigma_c}{E_0}, \quad (1.44)$$

Таким образом, для определения параметров модели Concrete Damaged Plasticity необходима обработка диаграмм разрушения образцов пород как на этапе нагружения, так и на этапе их разгрузки, при одноосных испытаниях сжатия и растяжения. Модель способна обеспечить численное моделирование процесса хрупкого разрушения пород, слагающих водозащитную толщу, вследствие оседания земной поверхности.

1.8 Выводы по I главе

Таким образом, актуальной задачей остаётся создание крупномасштабных численных моделей, учитывающих длительный характер деформирования междукамерных целиков в соляных породах, для прогноза образования водопроводящих трещин в подрабатываемой толщи. В основе математической модели деформирования соляных пород должна лежать реологическая модель, адекватно описывающая развитие деформаций ползучести. Это определяет использование вязко-упругопластической модели, реализованной в неявном решателе. Для прогноза образования водопроводящих трещин в математической модели в явном виде необходимо использовать модель, обеспечивающую процесс хрупкого разрушения, реализованную посредством явного динамического решателя. Следовательно, разрабатываемый массив соляных пород и подрабатываемую толщу необходимо представить в виде двух разных геомеханических моделей.

Целью работы является обеспечение безопасной подработки водозащитной толщи на основе обоснованной реологической модели соляных пород и геомеханической модели подрабатываемой водозащитной толщи.

Идея работы состоит в том, что прогноз геомеханических процессов в массиве пород ВЗТ и соляных породах продуктивного пласта должен выполняться на основе двух моделей:

- модели соляного массива, учитывающей реологические процессы в форме физических уравнений среды,
- модели пород ВЗТ, обеспечивающей хрупкий процесс разрушения вследствие образований трещин отрыва и сдвига. использовании вязко-упругопластической модели деформирования соляных пород и прочностного критерия образования водопроводящих трещин в породах ВЗТ в явном виде.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ существующих реологических моделей
2. Обработка результатов испытаний образцов соляных пород, измерений деформаций междукамерных целиков и оседаний земной поверхности.
3. Определение параметров реологической модели деформирования соляных пород на основе испытаний образцов и инструментальных наблюдений за деформированием очистных камер.
4. Определение прочностного критерия образования водопроводящих трещин в породах ВЗТ.
5. Численное моделирование процесса образования и развития водопроводящих трещин в породах ВЗТ на основе реологической модели деформирования междукамерных целиков в соляных породах.

ГЛАВА 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД В ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Физико-механические свойства соляных пород в значительной степени зависят от свойств кристаллов, в которых, за исключением лабораторных условий, наблюдаются дефекты. Дефекты в строении кристаллической решетки, а также в строении самого кристалла влияют на свойства материала. Для повышения надёжности определения ФМС пород количество лабораторных испытаний было не менее десяти [59].

Пробы, для проведения исследований по определению их физико-механических характеристик пород ВЗТ, представляли собой керновый материал, отобранный из геологоразведочных стволовых скважин № 107г-1 и № 107г-2 Палашерского участка ВКМКС [51]. Отбор проб соляных пород, подготовка и изготовление образцов производился на цилиндрических (кубических) образцах, изготавливаемых из керна скважин подземного бурения (№ 77а – № 115а) или монолитных блоков, извлекаемых из стенок выработок [54].

Для определения физико-механических свойств пород изготавливались цилиндрические и прямоугольные образцы с заданными пропорциями и допусками. Изготавливались также диски для испытаний на растяжение. Все образцы обрабатывались в соответствии с ГОСТ, с контролем параллельности и перпендикулярности поверхностей [21, 54].

Грани образцов, к которым прикладывают нагрузку прессы, обрабатывались на шлифовальном круге. Образцы сортировались по видам испытаний и помещались в эксикаторы, упакованные в целлофановые мешки для защиты от внешнего влияния окружающей среды. Соотношение высоты к диаметру (h/d) изготавливаемых образцов выбиралась в зависимости от структурных особенностей представленного керна материала и от вида испытаний. Для испытаний на одноосное сжатие ($h/b= 2,0$). Для испытаний на одноосное растяжение методом разрушения цилиндрических образцов сжатием по образующим ($h/b= 1,0$). Для испытаний на одноосное растяжение методом разрушения образцов встречными сферическими инденторами образцы изготавливались прямоугольного и круглого сечения с двумя параллельными плоскостями с такими размерами, чтобы площадь поверхности разрыва (раскола) была не менее 3 см^2 и не более 100 см^2 , высота образцов (расстояние между точками приложения нагрузки) составляла не менее 10 мм [51].

2.1 Лабораторные испытания образцов горных пород

Метод проведения испытаний при кратковременном одноосном сжатии

Для точного температурного контроля во время испытания необходимо использовать универсальную электромеханическую испытательную машину, с интегрированной в нее климатической камерой. Общий вид подобной установки - Zwick-Z250, которая применялась на испытаниях образцов соляных пород приведён на (Рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 - Вид электромеханической испытательной машины

Для ускорения процесса испытаний подготовленные образцы пород предварительно выдерживались при определенной температуре в климатической камере в течение суток. Для исключения потери влаги во время нахождения в камере поверхность образцов пород покрывается пищевой пленкой. Охлажденные в климатической камере до требуемой температуры образцы извлекались, а изоляционная пленка с них удалялась. Образцы оснащались датчиками продольных и поперечных деформаций и помещались в климатическую камеру испытательной машины.

С помощью контроллера задаётся в климатической камере требуемое значение температуры и в течении 2-х часов происходит выравнивание температур в образце и в камере. После чего производилось предварительное поджатие образца плитами пресса до нагрузки, составляющей около 1% от предельной, обнулялись показания датчиков силы и деформаций. Последующее нагружение образца проводилось со скоростью 1 мм/мин до достижения нагрузки, составляющей примерно 50% от предельной, затем производилась

разгрузка до достижения уровня предварительного нагружения и снова образец нагружался до достижения предела прочности.

При переходе из одноосного напряженного состояния в объёмное прослеживается количественное увеличение значений деформационных свойств [42].

Метод проведения испытаний при трёхосном сжатии

Испытания проводились в строгом соответствии с методикой, описанной в [22]. Сущность данного метода заключается в измерении силы, которая приводит к разрушению образца. Эта сила прикладывается к торцам образца, в то время как образец подвергается боковому сжатию гидростатическим давлением. Такой подход позволяет точно определить предел прочности материала и оценить его поведение под нагрузкой, что является ключевым для анализа физико-механических свойств соляных пород.

Испытания проводились на сервогидравлической системе RTR 1500, общий вид которой представлен на (Рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 - Вид сервогидравлической установки

Сервогидравлическая система включает в себя следующие ключевые компоненты, каждый из которых играет важную роль в обеспечении точности и надежности испытаний. Силовая рама обеспечивает необходимые усилия для тестирования образцов под различными нагрузками, что критически важно для оценки их механических свойств. Камера трехосного сжатия (стабилометр), оснащенная набором стальных штампов, предназначена для обеспечения точного сжатия образца. Стальные штампы гарантируют равномерное распределение нагрузки по всему образцу, что позволяет точно измерять его поведение под давлением. Насосная станция, увеличивающая давление до 70 МПа, является важным элементом системы. Она обеспечивает необходимое давление для проведения испытаний, позволяя исследовать материалы при высоких нагрузках, что важно для

понимания их предельных характеристик. Холодильная камера, позволяющая создавать отрицательные температуры внутри стабилометра, расширяет возможности испытаний. Этот компонент позволяет проводить тесты при различных температурных условиях, что необходимо для изучения поведения материалов в экстремальных условиях. Датчик силы, установленный в камере трехосного сжатия, обеспечивает точное измерение прикладываемых нагрузок. Точные данные о приложенной силе необходимы для правильного анализа результатов испытаний и определения механических свойств образцов. Экстензометры предназначены для измерения вертикальных и радиальных деформаций образца. Они позволяют отслеживать изменения размеров образца под нагрузкой, что важно для анализа его деформационных характеристик.

Эти компоненты работают вместе, обеспечивая высокую точность и надежность при проведении испытаний. Совместное использование всех элементов системы позволяет получать достоверные данные о механических свойствах тестируемых материалов, что является ключевым для их дальнейшего применения и анализа.

Для проведения испытаний в условиях трехосного сжатия требуется дополнительная подготовка образцов (Рисунок 2.3). Этот процесс начинается с герметизации боковой поверхности образца для предотвращения проникновения рабочей жидкости, которой в данном случае является силиконовое масло, создающее боковое давление на образец. В качестве гидроизолирующей оболочки используются термоусадочные полихлорвиниловые трубки соответствующего диаметра, которые надежно оборачивают боковую поверхность образца. Торцы образца изолируются от жидкости с помощью стальных накладок, обеспечивающих надежную защиту и предотвращающих утечку масла. Этот шаг важен для поддержания постоянного давления и обеспечения точности измерений. После герметизации образец, находящийся в изолирующей оболочке. На этом этапе обеспечивается правильное расположение образца, что важно для точности дальнейших измерений.

Завершающим этапом подготовки является монтаж датчиков поперечных и продольных деформаций. Эти датчики необходимы для измерения изменений размеров образца под нагрузкой, что позволяет точно анализировать его деформационные характеристики. Установка датчиков требует высокой точности, чтобы гарантировать получение надежных данных во время испытаний.



Рисунок 2.3 - Образец горной породы, подготовленный к испытаниям в трехосной камере

Деформометр поперечных деформаций устанавливается в средней (по высоте) части образца. Конструктивно он состоит из роликовой цепи, охватывающей образец по окружности и закрепленного на концах цепи тензометрического датчика (Рисунок 2.4). Деформометр продольных деформаций устанавливается непосредственно на боковую поверхность образца по двум диаметрально противоположным сторонам (Рисунок 2.5).

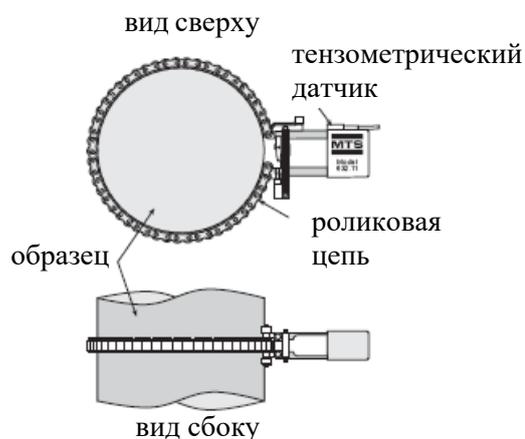


Рисунок 2.4 - Схема установки деформометра поперечных деформаций

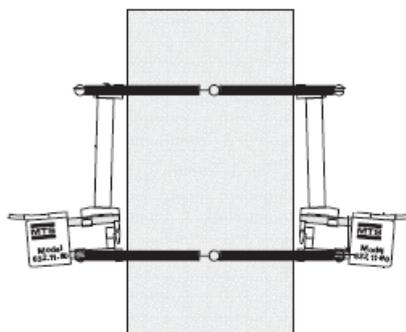


Рисунок 2.5 - Схема установки деформометра продольных деформаций

После установки датчиков опускается купол камеры. Камера заполняется минеральным маслом, которое создаёт давление всестороннего обжатия ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$).

Объёмные испытания проводились при трех значениях бокового гидростатического давления. Величина бокового давления рассчитывалась с учетом глубины залегания пород и принималась равной 0,5; 1,0 и 1,5 от давления вышележащих пород.

Определение прочности при растяжении

К косвенным методам определения прочности на растяжение относятся раскалывание образцов горных пород соосными клиньями, разрушение образцов встречными сферическими инденторами и разрушение цилиндрических образцов сжатием по образующим [23]. Метод раскалывания образцов соосными клиньями использовался для определения ФМС соляных пород, приспособление представлено на (Рисунок 2.6). Образец пластинчатой формы помещается между клиньями так, чтобы нагрузка распределялась равномерно по всей поверхности. Это позволяет точно измерить физико-механические свойства соляных пород, обеспечивая высокую точность и надежность результатов.

Использование этих косвенных методов значительно снижает трудоемкость испытаний и позволяет получать достоверные данные о прочностных характеристиках горных пород, что критически важно для их дальнейшего применения в горной промышленности и строительстве.

Для проведения испытаний на раскалывание изготавливались плоские образцы различных форм, таких как пластины, шайбы и другие подобные элементы. Эти образцы специально подготавливались для обеспечения точности испытаний и получения достоверных результатов. В качестве примера на (Рисунок 2.6, а) представлена пластина, на которой нанесены линии, указывающие направления раскалывания образца. Эти линии помогают контролировать процесс раскалывания и обеспечивают равномерное распределение напряжений по образцу, что позволяет точно измерить его физико-механические свойства.

Каждый из таких плоских образцов проходил тщательную подготовку, чтобы гарантировать соответствие всем необходимым параметрам и требованиям. Это включало нанесение линий для контролируемого раскалывания, что позволяет провести испытания с максимальной точностью. Такие методы испытаний играют ключевую роль в изучении прочностных характеристик материалов, что особенно важно для их применения в горной промышленности и строительстве. При этом линии разметки по взаимно-перпендикулярным направлениям наносят двумя различными цветами, что позволяет при необходимости оценить анизотропию породы.

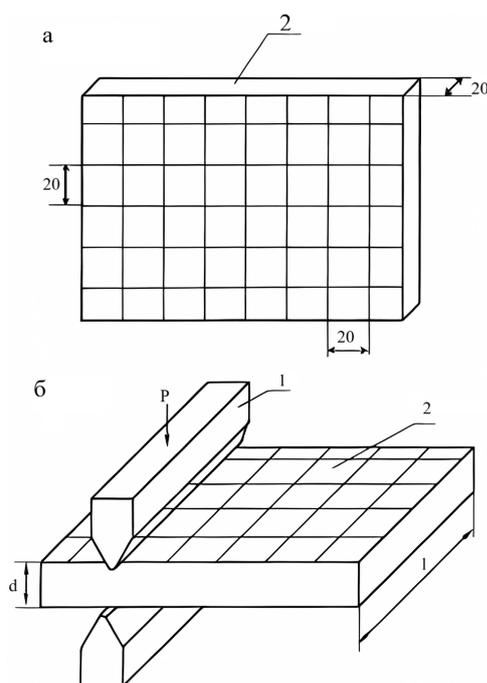


Рисунок 2.6 – Схема определения предела прочности на растяжение методом раскалывания образца соосными клиньями

Метод разрушения цилиндрических образцов сжатием по образующим применялся для определения ФМС различных пород, составляющих ВЗТ. Сущность данного метода заключается в измерении силы, необходимой для разрушения образца, которая прикладывается через стальные плиты, направленные навстречу друг другу. В этом методе цилиндрические образцы подвергаются равномерному сжатию вдоль образующих, что позволяет точно определить их прочностные характеристики. Стальные встречно направленные плиты обеспечивают равномерное распределение нагрузки по поверхности образца, что критически важно для получения достоверных результатов.

Процесс испытания начинается с подготовки цилиндрического образца, который затем помещается между двумя стальными плитами. По мере увеличения давления, приложенного к плитам, измеряется сила, при которой образец разрушается. Этот метод позволяет выявить прочностные характеристики пород, что особенно важно для оценки их поведения под нагрузками и дальнейшего использования в горной промышленности и строительстве. Образец устанавливался в центре опорной плиты механической испытательной машины ИР 5143 - 200 с компьютерным управлением и нагружался до разрушения с равномерной скоростью не более 5 МПа/с. Схема нагружения образца показана на (Рисунок 2.7).

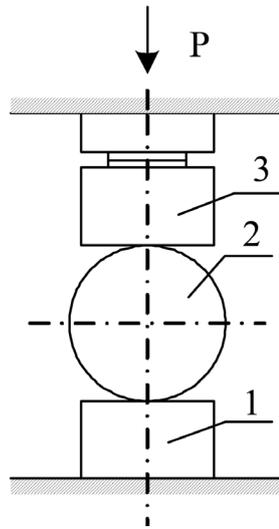


Рисунок 2.7 – Принципиальная схема нагружения цилиндрических образцов
1 – нижняя плита; 2 – образец; 3 – верхняя плита

Метод разрушения образцов встречными сферическими инденторами выполнялся для определения ФМС ряда пород, слагающих ВЗТ. Сущность метода заключается в измерении разрушающей силы, приложенной к образцу через стальные встречно направленные сферические инденторы [23].

Принципиальная схема устройства для разрушения образцов встречными сферическими инденторами показана на (Рисунок 2.8). Испытания проводили на переносной испытательной машине БУ 39.

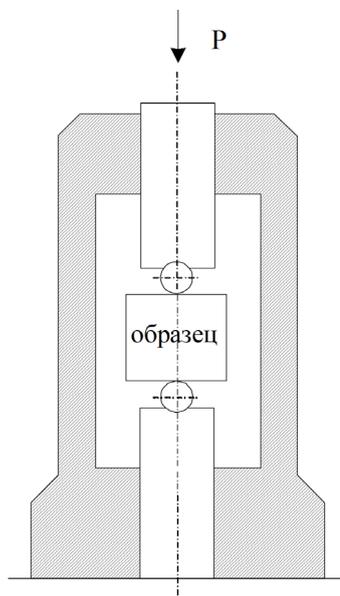


Рисунок 2.8 – Принципиальная схема устройства для разрушения образцов встречными сферическими инденторами

Прямой «классический» метод испытания образцов соляных пород

Испытания на ползучесть, проводимые “классическим” методом, отличаются от косвенных тем, что на каждый испытуемый образец прикладывается лишь одна ступень

нагружения и, в дальнейшем, выдерживается во времени до достижения одного из условий: стабилизации деформаций, прогрессирующей или установившейся ползучести.

Задание образцам пород длительно-действующих нагрузок в условиях одноосного сжатия осуществляется с помощью установки одноосной ползучести УП-2, разработанной во ВНИМИ. На (Рисунок 2.9) приведен общий вид установки.

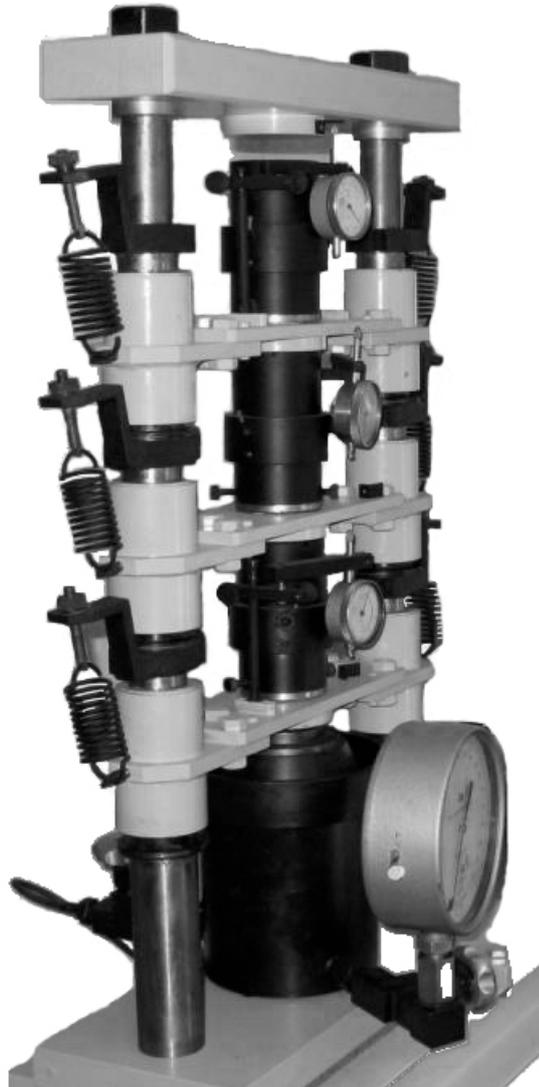


Рисунок 2.9 – Общий вид установки УП-2

Установка включает девять нагрузочных секций и систему газомасляных баллонов для поддержания постоянного уровня напряжений. Секции различаются площадью сечения поршней, что позволяет варьировать нагрузку от 10% до 90% от предельных значений. В каждой секции одновременно испытывается по три образца. Максимальная нагрузка на образцы составляет до 50 кН. Образцы цилиндрической формы диаметром 36 мм и высотой 70–72 мм изготавливаются из проб, доставленных в лабораторию. Выбуривание образцов производилось с помощью коронок МД-2, армированных твердым сплавом.

Длительность испытаний на ползучесть составляла около 1 месяца. По результатам испытаний строятся кривые изменения продольных и поперечных деформаций во времени,

а также представляется возможным определить параметры модели соляных пород в полной мере. Процесс потери прочности породы характеризуется зависимостью между действующим напряжением и временем [42]. График (Рисунок 2.10) такой функции называется кривой длительной прочности, а её физический смысл отражен в горизонтальной асимптоте.

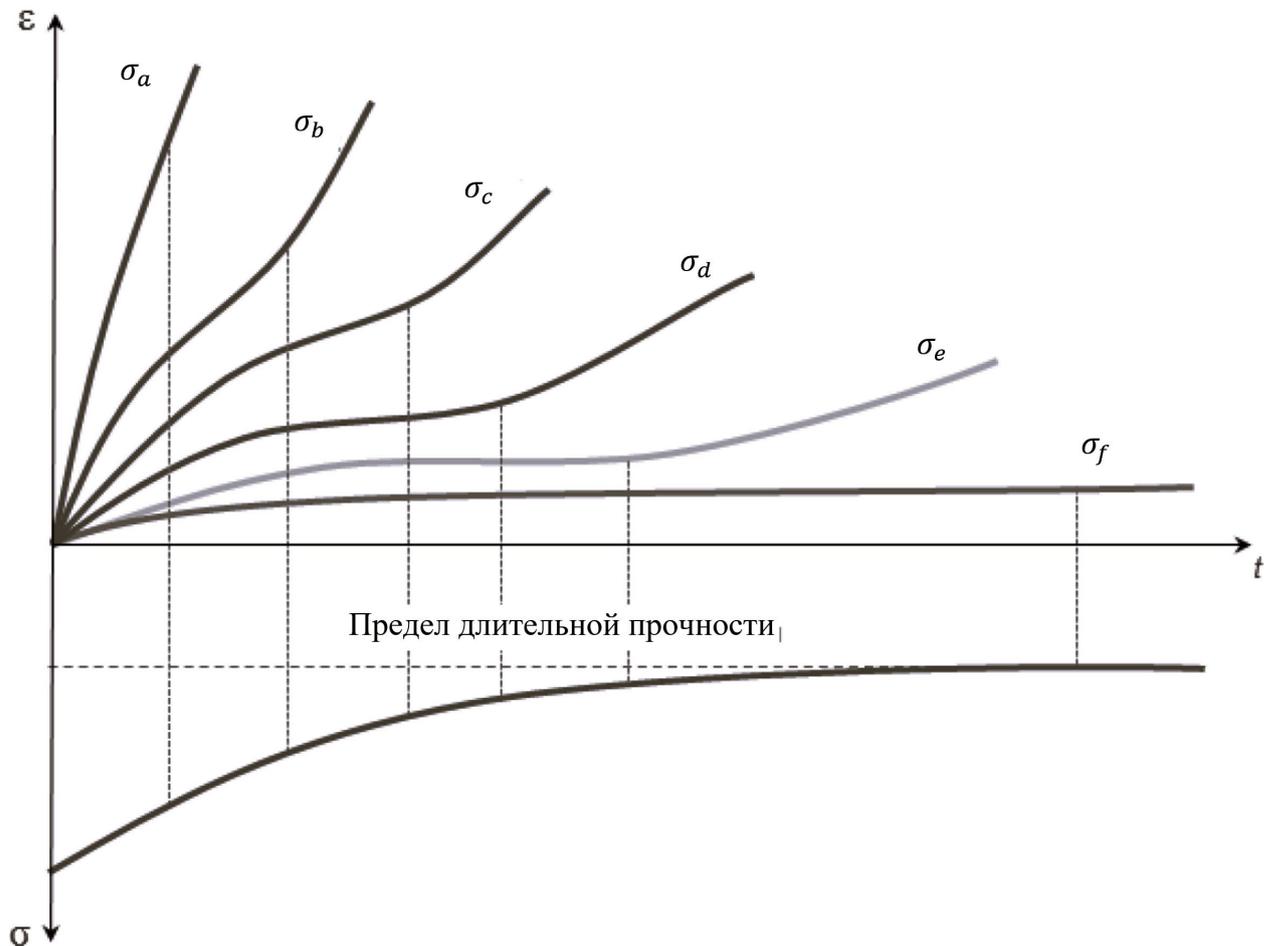


Рисунок 2.10 – График семейства кривых ползучести

Ползучесть материала можно визуализировать на графике, который в общем виде можно разделить на три стадии [85]:

- Первичная стадия – стадия неустановившейся ползучести, характеризующаяся увеличением напряжения с уменьшающейся скоростью.
- Вторичная стадия – стадия установившейся ползучести, при которой скорость деформаций становится постоянной. В этой фазе материал достигает состояния равновесия, и деформации происходят с устойчивой скоростью. Эта стадия длится дольше всех и является наиболее стабильной, что позволяет точно прогнозировать поведение материала под длительной нагрузкой.
- Третичная стадия – стадия прогрессирующей ползучести, на которой деформации начинают увеличиваться с возрастающей скоростью вплоть до разрушения

образца. В этой стадии материал испытывает значительные структурные изменения, что ведет к ускоренному росту деформаций и, в конечном итоге, к разрушению. Эта фаза критически важна для оценки предельных состояний материала и предсказания его долговечности под экстремальными условиями.

Эти стадии ползучести отражают сложные процессы, происходящие в материале под действием постоянных напряжений, и являются ключевыми для понимания его долговременного поведения. На (Рисунок 2.11) изображен общий вид кривой ползучести.

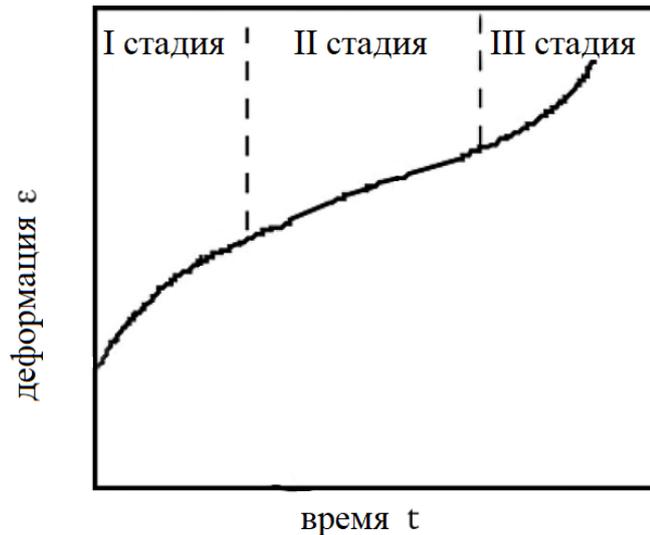


Рисунок 2.11 – Общий вид кривой ползучести разрушенного образца каменной соли

Ввиду того, что практически невозможно установить момент разрушения пластичного материала в процессе подобного испытания, принято считать за момент его разрушения переход в стадию прогрессирующей ползучести [2, 3, 7, 12, 75, 64, 85, 93].

Самым весомым преимуществом прямого метода является достоверность определяемых реологических свойств породы. Косвенные методы требуют дополнительных расшифровок физического смысла процесса испытаний. Продолжительность проведения эксперимента и достаточно высокая трудоёмкость представляют основные недостатки прямого метода. В течении всей продолжительности испытаний необходимо поддерживать постоянными такие параметры как: влажность, температура и, конечно же, напряжение на образце. Ввиду того, что длительные испытания могут иметь продолжительность в несколько месяцев, соответствие перечисленные требования становится достаточно трудоёмкой задачей, а если эксперимент проходит в объёмном напряжённом состоянии, то трудоёмкость возрастает в разы [2, 3, 4, 75, 93].

В работах [65, 93] подтверждается и обосновывается нелинейная скорость упрочнения пород каменной соли при движении в область больших сжимающих напряжений, что более корректно отображает свойства материала. В представленных работах описано упруговязкопластическое поведение каменной соли.

Косвенные методы испытания образцов соляных пород

Метод ступенчатого нагружения используется для испытаний образцов пород на ползучесть при одноосном сжатии. Эти испытания необходимо проводить при трех различных температурах: +10°C, -8°C и -12°C. Каждое из этих температурных условий позволяет оценить, как материал реагирует на изменения в температуре, что важно для понимания его поведения в различных климатических и геологических условиях. При температуре +10°C можно наблюдать поведение породы в условиях, приближенных к обычным природным температурам. Это дает базовые данные о ползучести и прочности материала. Испытания при -8°C позволяют понять, как порода ведет себя при умеренном холоде, что характерно для некоторых подземных условий или регионов с умеренным климатом. Наконец, при -12°C исследуется поведение породы в экстремально холодных условиях, что важно для регионов с суровыми климатическими условиями или глубоких подземных работ.

По результатам этих испытаний определяются значения предела длительной прочности материала. Это критически важно для прогнозирования долговечности и устойчивости пород под нагрузками в долгосрочной перспективе. Полученные данные помогают в разработке стратегий для предотвращения разрушений и обеспечения безопасности в горных и строительных работах.

Для реализации испытаний может использоваться универсальная электромеханическая испытательная машина Insight 200 кН, с интегрированной в нее климатической камерой модели MTS 651.06T-03.

Стандарты на методы испытаний скальных и полускальных горных пород на ползучесть и длительную прочность при отрицательных температурах в настоящее время в Российской Федерации отсутствуют. Поэтому при проведении этих исследований за основу необходимо принять методику для испытаний мерзлых грунтов по ГОСТ 12248-2010 «Грунты. Методы лабораторного определения прочности и деформируемости грунтов».

Образец породы, предварительно выдержанный в климатической камере Binder при заданной температуре охлаждения, помещается в климатическую камеру испытательной машины, оснащенную датчиками продольных деформаций. С помощью контроллера задается необходимая температура и выдерживается в течение 1 часа для выравнивания температур в камере и образце. После чего производится предварительное поджатие образца плитами прессы до нагрузки, составляющей около 1% от предельной, обнуляются показания датчиков силы и деформаций. Последующее нагружение образца проводится со скоростью 1 мм/мин до достижения 1-ой ступени нагрузки.

На каждой ступени осевое напряжение в образце поддерживается автоматически с помощью программного обеспечения прессы Insight 200 кН. Испытание на каждой ступени нагрузки проводится до достижения одной из следующих стадий: условной стабилизации деформаций (затухающая ползучесть), развитие деформаций с постоянной скоростью (установившаяся ползучесть) и развитие деформаций с увеличивающейся скоростью деформаций (прогрессирующая ползучесть). В среднем продолжительность действия каждой ступени нагружения составляет 24 часа. В качестве критерия стабилизации деформаций принимается приращение абсолютных деформаций не более 0,01 мм в течение часа. Регистрация нагрузок и деформаций производится в автоматическом режиме с частотой опроса датчиков 0,1 Гц.

Впервые принципиальную идею проведения подобных испытаний предложил Н.Г. Кузнецов [43]. Как правило показатели значений пределов длительной прочности, полученные методом ступенчатого нагружения, оказываются завышенными [37].

Вибрационный метод. Принцип метода – нагружение образца вибрационной нагрузкой с заданной амплитудой и частотой. Разрушение образца ускоряется за счёт образования в нём микротрещин. Не смотря на достаточно необычный процесс испытания, полученные значение длительной прочности достаточно близки к статическим. Главный недостаток данной методики – это необходимость в использовании сложной техники и отсутствие каких-либо конкретных рекомендаций для определения параметров испытаний. Результаты эксперимента не нужно экстраполировать, что может быть достоинством данной методики, предложенной Ю.М. Карташовым [36].

2.2 Мгновенные прочностные и деформационные свойства горных пород

Несмотря на критическую важность корректного определения реологических свойств, деформационные свойства соляных пород играют не менее важную роль при моделировании [42]. Связь между напряжениями и деформациями в материале осуществляется с помощью модуля упругости и деформации. Упругие и пластические свойства материала проявляются в процессе быстрого нагружения образца. Во время упругих деформаций модуль упругости E_y находится по формуле (2.1), а коэффициент Пуассона ν – как отношение поперечной деформации к продольной (2.2). Во время пластических деформаций коэффициент E_d принимает значение модуля деформации. В [21] представлен метод его определения.

$$E = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_1} = \frac{\sigma_{1к} - \sigma_{1н}}{\varepsilon_{1к} - \varepsilon_{1н}}, \text{ Па} \quad (2.1)$$

$$\nu = \frac{\Delta \varepsilon_2}{\Delta \varepsilon_1} = \frac{\varepsilon_{2к}^1 - \varepsilon_{2н}^1}{\varepsilon_{1к}^1 - \varepsilon_{1н}^1}, \quad (2.2)$$

где $\sigma_{1к}$ и $\sigma_{1н}$ – осевые напряжения, Па; $\varepsilon_{1к}$ и $\varepsilon_{1н}$ – относительные продольные деформации, $\varepsilon_{1к}^1$ и $\varepsilon_{1н}^1$, $\varepsilon_{2к}^1$ и $\varepsilon_{2н}^1$ – конечные и начальные относительные продольные деформации и поперечные для заданного диапазона нагружения при разгрузке.

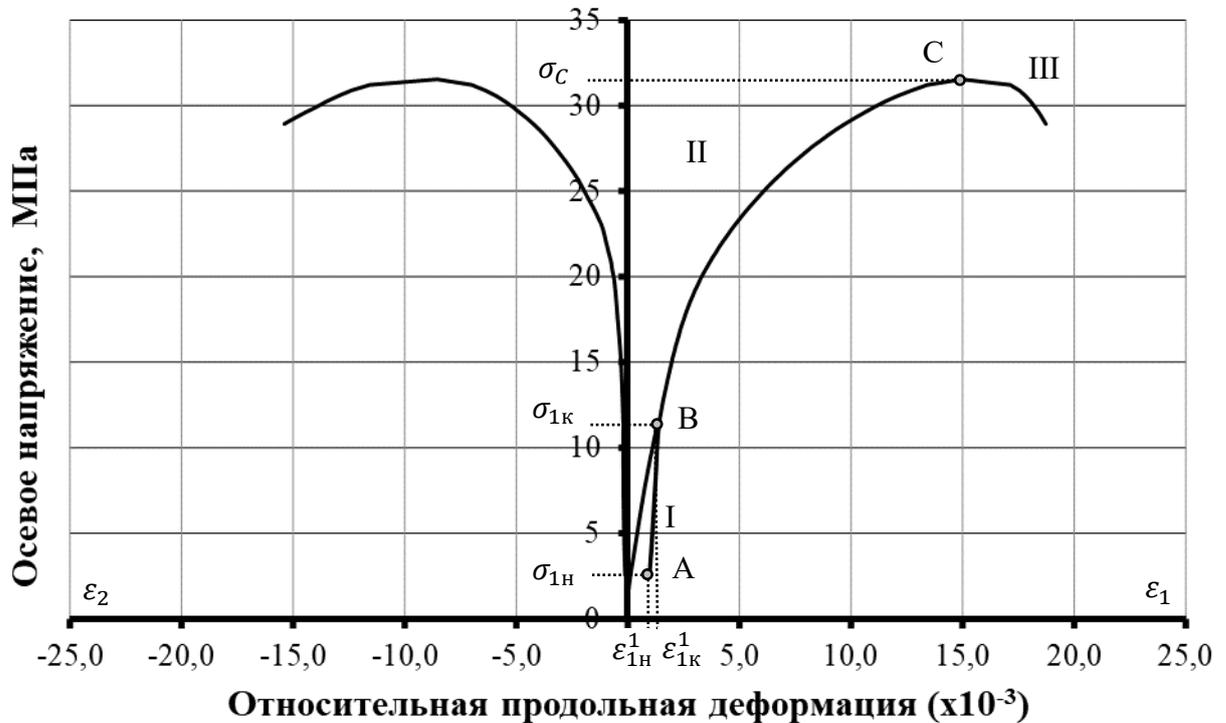


Рисунок 2.12 – Полная диаграмма деформирования образца каменной соли

На (Рисунок 2.12) представлена диаграмма полного деформирования, связывающая продольные и поперечные относительные деформации с напряжениями на образце. На диаграмме можно выделить несколько ключевых участков, каждый из которых отражает определенные стадии деформирования. Участок I представляет собой линейный участок упругого поведения породы, где материал демонстрирует линейную зависимость между нагрузкой и деформацией. На этом участке порода ведет себя упруго, и деформации полностью обратимы при снятии нагрузки. Участок II характеризуется неупругим поведением породы, где происходит накопление пластических деформаций. В этой фазе материал начинает упрочняться, что сопровождается увеличением прочности за счет пластического упрочнения. Здесь деформации уже частично необратимы, и материал переходит в стадию пластической деформации. Участок III, известный как запредельная ветвь, описывает процесс разрушения образца. В этой стадии напряжение начинает падать, что указывает на начало разрушения материала. В этом процессе структура породы разрушается, приводя к полной потере несущей способности. Отрезок АВ на диаграмме соответствует разгрузению образца горной породы. Этот участок важен для определения

величины упругих деформаций, поскольку показывает, как материал восстанавливается после снятия нагрузки. Анализ этого отрезка позволяет оценить упругие свойства породы и степень необратимых изменений, произошедших в материале. Угол наклона отрезка АВ определяет модуль упругости породы. Начальные ε_n и конечные ε_k относительные продольные деформации для заданного диапазона нагружения при разгрузке ($\sigma_{1n} - \sigma_{1k}$) определяют величину упругих деформаций. При напряжении σ_c образец породы разрушается с нарушением условий непрерывности.

Критерии прочности соляных пород

Среди существующих теорий прочности и подведённых под них критериев для соляных горных пород в наибольшей степени подходит теория прочности О. Мора и нелинейный критерий объёмной прочности Хоека-Брауна [92, 48, 69]. Критерий прочности представляет собой зависимость между НДС массива горных пород и его механическими свойствами. Этот критерий служит основой для построения паспорта прочности горных пород, который является совокупностью показателей, характеризующих прочность пород.

На основании рассчитанных критериев прочности составляется паспорт прочности горных пород. Этот документ включает в себя различные показатели, такие как пределы прочности на сжатие, растяжение и сдвиг, а также модули упругости и деформации. Эти показатели позволяют оценить механическое поведение горных пород под воздействием различных нагрузок и предсказать их реакцию в реальных условиях эксплуатации. Паспорт прочности горных пород рассматривается в качестве основного критерия для оценки поведения пород под воздействием нагрузок. Он помогает понять, как порода будет реагировать на внешние воздействия, и использовать эту информацию для проектирования и проведения горных работ. Такой подход позволяет повысить безопасность и эффективность эксплуатации горных пород, обеспечивая устойчивость и долговечность горных выработок. Паспорта прочности рассматриваются в качестве критерия поведения горной породы под воздействием нагрузок. Они позволяют определить условия разрушения пород в различных напряжённых состояниях.

Линейный критерий Кулона-Мора основан на гипотезе, согласно которой разрушение происходит при превышении касательных напряжений τ предельно допустимых, зависящих от нормальных напряжений σ_1 и σ_3 на площадке сдвига. Согласно данному критерию паспортом прочности является кривая в осях нормальных и касательных напряжений, которая огибает круги предельных напряжений Мора. Круги Мора дают наглядное представление о напряжениях в различных сечениях, проходящих через данную точку. Критерий прочности Кулона-Мора имеет вид (2.3):

$$\tau = C + \sigma \cdot tg(\varphi), \text{ Па} \quad (2.3)$$

где τ – предел прочности породы на сдвиг, Па; σ – нормальное напряжение, Па; C – сцепление горной породы, Па; φ – угол внутреннего трения, град.

Критерий прочности Кулона-Мора в осях главных напряжений выражается формулой (2.4):

$$\sigma_1 = \frac{2 \cdot C \cdot \cos(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} + \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)} \sigma_3, \text{ Па} \quad (2.4)$$

где σ_1 и σ_3 – это главные максимальные и минимальные напряжения, Па.

На (Рисунок 2.13) представлен паспорт прочности образца каменной соли Палашерского участка ВКМКС, полученный из скважины 107-г. Представленный паспорт прочности образца каменной соли отображает пластический характер разрушения, о чём свидетельствует угол наклона касательных кругов Мора. Подобный процесс разрушения происходит постепенно, а то время как хрупкое разрушение – мгновенно. Для хрупкого разрушения характерен более крутой угол наклона касательной.

Критерий Хоека-Брауна есть ни что иное, как обобщённая модель поведения горной породы, учитывающая упрочнение материала с увеличением давления обжима, позволяет описать замедление скорости упрочнения материала при движении в область больших сжимающих напряжений и более корректно отображает свойства соляных пород.

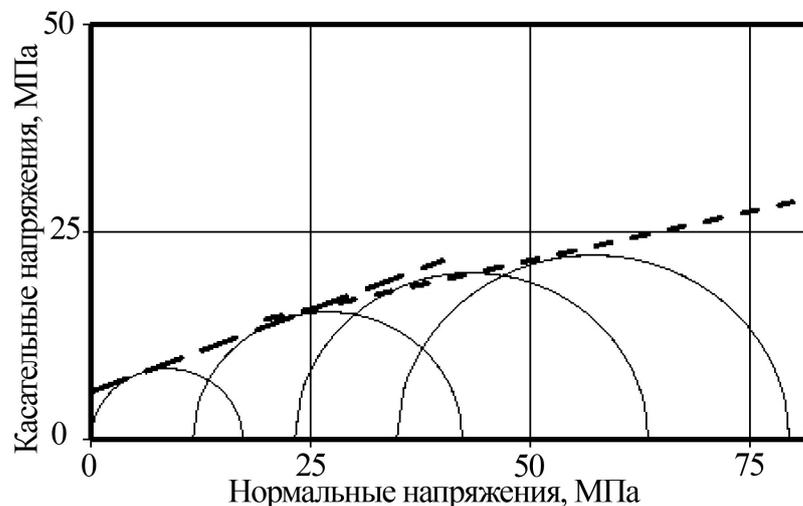


Рисунок 2.13 – Паспорт прочности по критерию прочности Кулона-Мора образца каменной соли

На основе паспорта прочности, построенного по критерию прочности Кулона-Мора в осях нормальных и касательных напряжений, строится паспорт прочности горной породы в осях максимальных и минимальных главных нормальных напряжений. На (Рисунок 2.14) представлен паспорт прочности образца каменной соли ВКМКС, полученный из скважины 77а, проба – Ф-1390, построенный по критерию прочности Хоека-Брауна.

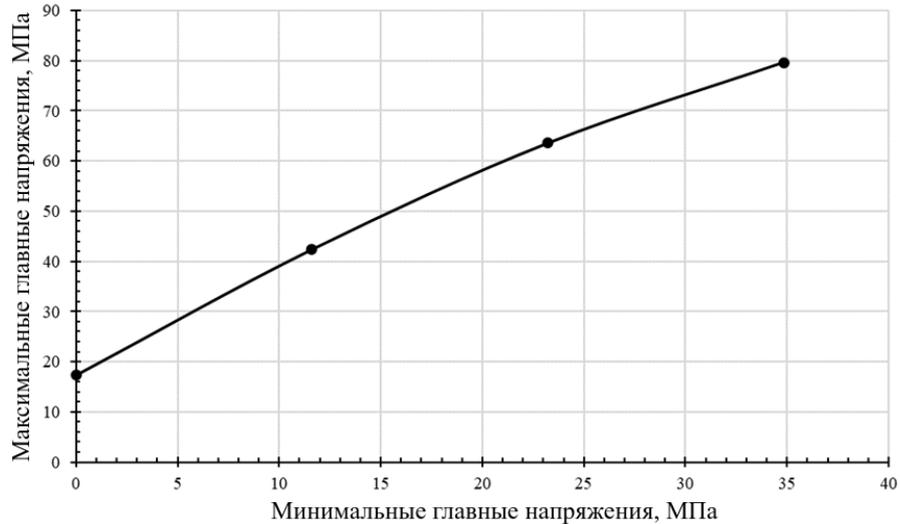


Рисунок 2.14 – Паспорт прочности по критерию прочности Хоека-Брауна образца каменной соли

Нелинейный критерий прочности Хоека-Брауна имеет вид (2.5):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{сж} \cdot \left(m_i \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_{сж}} + 1 \right)^{\frac{1}{2}}, \text{ Па} \quad (2.5)$$

где m_i – показатель Хоека-Брауна для ненарушенного массива; $\sigma_{сж}$ – предел прочности образца при одноосном сжатии, Па.

Результаты экспериментальных данных пород Палашерского участка ВКМКС представлены в (Таблица 2.1). В соответствии со строением толщ по данным геолого-разведывательной скважине 107г в (Таблица 2.2) приведены усреднённые значения физико-механических свойств пород Палашерского участка ВКМКС, на (Рисунок 2.15) представлен геологический разрез по данным скважины.

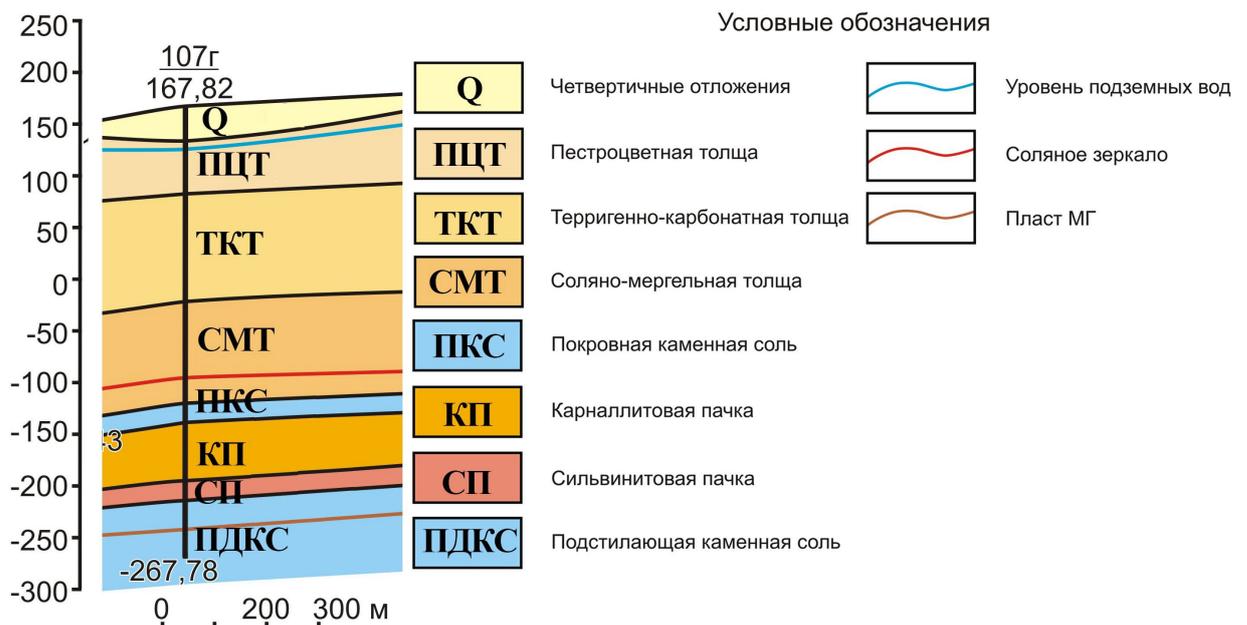


Рисунок 2.15 – Геологический разрез Палашерского участка по данным скважины 107г

Таблица 2.1 – Физико-механические свойства пород по скважине 107г

Толща, пласт, слой	Мощность толщи, пласта, м	Порода	Составная часть толщи	Удельный вес	Предел прочности при одноосном напряженном состоянии	Предел прочности при растяжении	Сцепление	Угол внутреннего трения	Сцепление	Угол внутреннего трения	Модуль упругости	Коэффициент Пуассона	Относительная предельная деформация	Пределный модуль деформации
			к, %	γ , кН/м ³	$\sigma_{сж}$, МПа	σ_p , МПа	$C_{0.75}$, МПа	$\phi_{0.75}$, °	C_0 , МПа	ϕ_0 , °	$E_y \cdot 10^4$, МПа	ν	ϵ , %	$E_D \cdot 10^3$, МПа
Q	33.0	четвертичные отложения	-	20	-	-	-	-	0.04	30	0.1	0.3	-	-
ПЦТ	51.0	песчаник	44.4	25.0	43.55	3.70	12.7	38.33	6.71	55.33	1.90	0.44	0.84	7.10
		алевролит	33.3	26.0	49.22	1.91	15.3	47.00	5.79	66.00	0.70	0.21	0.88	6.98
		аргиллит	22.2	25.0	63.05	2.40	19.07	43.00	9.01	61.00	0.82	0.22	1.34	5.89
ТКТ	104.1	песчаник	43	25	71.56	4.46	21.6	40.75	10.7	58.25	1.66	0.33	0.94	10.27
		известняк	33	26	59.56	5.26	18.94	35.00	9.48	53.50	1.30	0.31	0.82	9.72
		алевролит	23	26	83.35	5.37	25.5	44.00	11.0	62.50	0.90	0.29	0.78	13.02
СМТ	97.8	мергель	50	23	15.28	1.24	4.66	39.00	2.52	56.50	0.73	0.22	0.81	2.68
		каменная соль	50	22	16.34	1.32	5.03	39.33	2.70	57.00	0.65	0.25	1.53	1.13
ПКС	18.8	каменная соль	-	22	25.87	1.93	8.05	40.20	3.80	57.60	0.89	0.29	2.39	1.20
КП	56.0	каменная соль	50	21	12.62	1.51	4.13	28.33	2.38	47.67	0.66	0.25	1.87	0.80
		карналлит	50	17	3.65	0.60	1.27	25.67	0.79	45.00	0.63	0.30	0.82	0.55
А-Б	5.5	сильвинит, каменная соль	-	19	18.17	1.41	5.56	40.00	2.81	57.00	0.88	0.33	2.18	0.83
СП	18.8	сильвинит	44	19	13.06	1.38	4.18	32.50	2.28	50.5	0.70	0.33	1.72	0.73
		каменная соль	56	21	7.94	1.34	2.79	25.00	1.74	44.0	0.80	0.27	1.25	0.63
КрII	10.3	сильвинит	-	21	16.19	1.48	5.03	37.50	2.29	55.00	0.85	0.30	1.16	1.41
ПДКС	56.0	каменная соль	-	21	20.19	1.38	6.14	41.00	3.17	59.00	0.86	0.28	1.97	1.23

Таблица 2.2 – Усреднённые значения физико-механических свойств пород

Толща, пласт, слой	Мощность пласта, м	Удельный вес, кН/м ³	Предел прочности при сжатии, МПа	Предел прочности при растяжении, МПа	Сцепление (0.75), МПа	Угол внутреннего трения (0.75), °	Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, °	Модуль упругости, · 10 ⁴ , МПа	Коэффициент Пуассона	Отн. предельная деформация, %	Предельный модуль деформации · 10 ³ , МПа
Q	33.0	20	-	-	-	-	0.04	30	0.1	0.3	-	-
ПЦТ	51.0	25.3	49.7	2.8	15.0	42.3	6.9	60.1	1.3	0.3	1.0	6.8
ТКТ	104.1	25.3	69.24	4.9	21.4	39.2	10.3	57.1	1.3	0.3	0.9	11.0
СМТ	97.8	22.5	15.65	1.3	4.8	39.2	2.6	56.8	0.7	0.2	1.2	1.9
ПКС	18.8	22	25.75	1.93	8.05	40.2	3.8	57.6	0.89	0.29	2.39	1.20
КП	56.0	19.0	8.1	1.1	2.7	27.0	1.6	46.3	0.6	0.3	1.3	0.7
А-Б	5.5	19	18.17	1.41	5.56	40.0	2.81	57.0	0.88	0.33	2.18	0.83
СП	18.8	20.1	10.2	1.4	3.4	28.3	2.0	46.9	0.8	0.3	1.5	0.7
КрII	10.3	21	16.19	1.48	5.03	37.5	2.29	55.0	0.85	0.30	1.16	1.41
ПД-КС	56.0	21	20.19	1.38	6.14	41.0	3.17	59.0	0.86	0.28	1.97	1.23

Пластическое упрочнение соляных пород

Известно, что в соляных породах значение модуля деформации нелинейно уменьшается при увеличении нагрузки. Характер пластического упрочнения рассчитывается вычитанием величины упругих деформаций из диаграммы полного деформирования. Максимальное значение несущей способности образца разделяет диаграмму пластического деформирования на ветвь упрочнения и ветвь разрушения [31]. Отобразить подобную зависимость прочностных свойств материала в явном виде в программных комплексах на данный момент крайне трудоёмко. В качестве решения этой задачи принято использовать процесс упрочнения материала в области пластических деформаций, описанный в координатах $(\sigma_1, \varepsilon_1)$, где σ_1 – сжимающее напряжение, ε_1 – продольная относительная деформация.

Область пластических деформаций образца сильвинита и каменной соли получается вычитанием из диаграммы полного деформирования области упругих деформаций (Рисунок 2.16). Область упругих деформаций прослеживается на участке разгрузки образца.

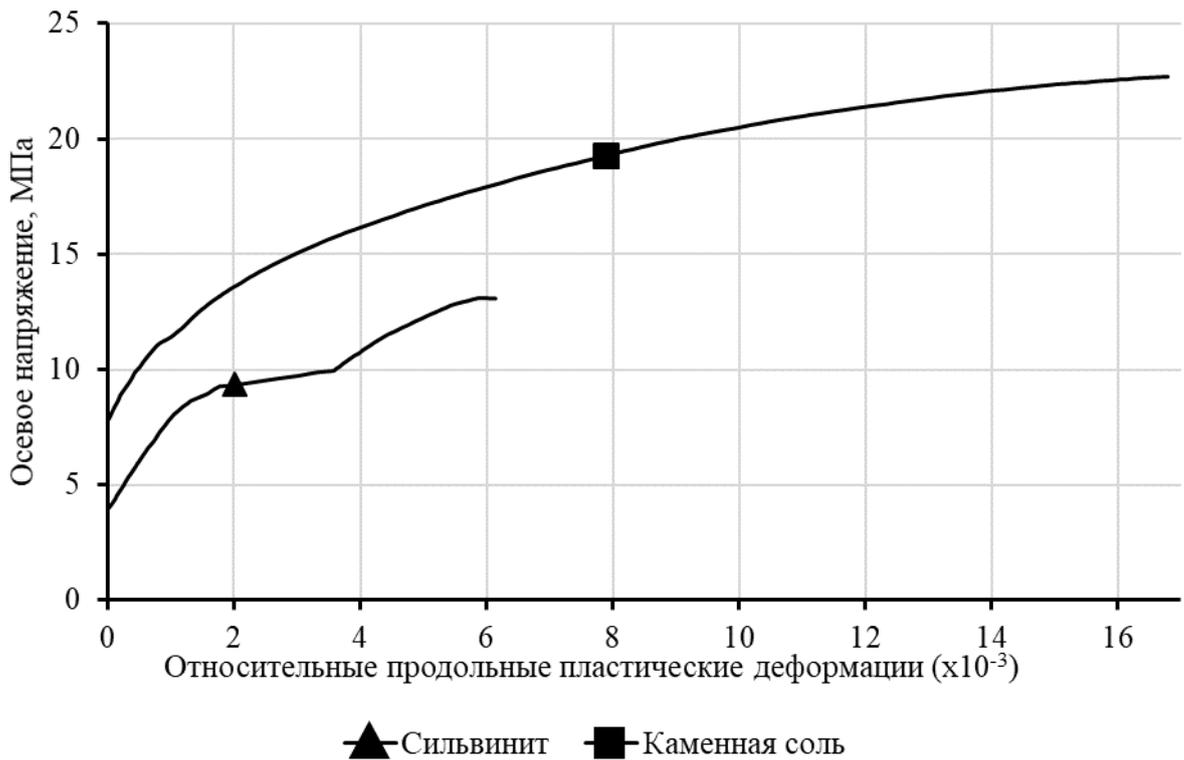


Рисунок 2.16 - График упрочнения образцов соляных пород

Рассчитанные зависимости пластического упрочнения соляных пород используются в математических моделях.

2.3 Определение параметров модели хрупкого разрушения пород ВЗТ

Для обеспечения численного моделирования процесса хрупкого разрушения пород, слагающих водозащитную толщу, используется модель CDP, реализованная в компьютерном ПО Simulia Abaqus CAE. Подробное описание модели представлено в п. 1.7. По (Таблица 2.2) обработав диаграммы полного деформирования и диаграммы разрушения при одноосном растяжении пород, слагающих выделенные толщи подрабатываемого массива, представляется возможным определить параметры модели.

В (Таблица 2.3) приведены основные параметры модели CDP для подрабатываемых толщ – значения характерных точек на графике напряжение – относительная деформация при растяжении и сжатии, а также соответствующие значения переменной повреждения.

Таблица 2.3 – Основные параметры модели CDP для подрабатываемых толщ

Напряжение, МПа	Отн. деф., отн.ед.	Переменная повреждения	Напряжение, МПа	Отн. деф., отн.ед.	Переменная повреждения			
Пестроцветная толща			Покровная каменная соль					
растяжение	2.8	0	0	1.93	0	0		
	1.983	0.001	0.2918	1.367	0.002	0.2918		
	1.43	0.001	0.4892	0.986	0.002	0.4892		
	1.069	0.002	0.6183	0.737	0.003	0.6183		
	0.836	0.003	0.7014	0.576	0.003	0.7014		
	0.685	0.003	0.7554	0.472	0.004	0.7554		
	0.582	0.004	0.792	0.401	0.004	0.792		
	0.507	0.005	0.8188	0.35	0.005	0.8188		
	0.447	0.005	0.8404	0.308	0.005	0.8404		
	0.394	0.006	0.8593	0.272	0.006	0.8593		
	0.345	0.007	0.8769	0.238	0.006	0.8769		
	0.298	0.007	0.8936	0.205	0.007	0.8936		
	сжатие	0.65	0	0	0	0	0	
29.97		0.004	0	14.913	0.012	0		
45.5		0.008	0	15.948	0.013	0		
49.697		0.01	0	19	0.016	0		
49		0.011	0.014	22	0.019	0		
44.9		0.011	0.0965	23	0.02	0		
39		0.012	0.2152	24	0.021	0		
19.958		0.012	0.5984	25	0.023	0		
9.677		0.013	0.8053	25.5	0.024	0		
5		0.013	0.8994	25.75	0.025	0		
1	0.013	0.9799	25.6	0.027	0.0058			
Терригенно-карбонатная толща			сжатие	25	0.031	0.0291		
растяжение	4.9	0		0	24.4	0.032	0.0524	
	3.47	0		0.2918	23	0.034	0.1068	
	2.503	0.001		0.4892	20	0.035	0.2233	
	1.871	0.001		0.6183	13.19	0.036	0.4878	
	1.463	0.002		0.7014	8.92	0.037	0.6536	
	1.199	0.002		0.7554	4	0.038	0.8447	
	1.019	0.002		0.792	2	0.039	0.9223	
	0.888	0.003		0.8188	0.5	0.04	0.9806	
	0.782	0.003		0.8404	Соляно-мергельная толща			
	0.689	0.003		0.8593	растяжение	1.3	0.001	0
	0.603	0.004		0.8769		0.921	0.001	0.2918
0.521	0.004	0.8936		0.664		0.003	0.4892	
сжатие	0.9	0		0		0.496	0.004	0.6183
	47.44	0.004		0		0.388	0.006	0.7014
	65	0.007	0	0.318		0.007	0.7554	
	69.24	0.009	0	0.27	0.009	0.792		

Продолжение таблицы 2.3

Напряжение, МПа	Отн. деф., отн.ед.	Переменная повреждения	Напряжение, МПа	Отн. деф., отн.ед.	Переменная повреждения		
Терригенно-карбонатная толща			Соляно-мергельная толща				
сжатие	67.3	0.01	0.028	растяжение	0.236	0.01	0.8188
	37.06	0.011	0.4648		0.208	0.011	0.8404
	20	0.012	0.7111		0.183	0.013	0.8593
	10	0.013	0.8556		0.16	0.014	0.8769
	5	0.014	0.9278		0.138	0.016	0.8936
	1	0.014	0.9856		0.04	0	0
Карналлитовая пачка			сжатие	7.8	0.004	0	
растяжение	1.1	0		0	12.22	0.007	0
	0.779	0.002		0.2918	14.2	0.009	0
	0.562	0.002		0.4892	15.1	0.01	0
	0.42	0.003		0.6183	15.65	0.012	0
	0.328	0.004		0.7014	15.6	0.012	0.0032
	0.269	0.005		0.7554	14.85	0.013	0.0511
	0.229	0.006		0.792	13.82	0.013	0.1169
	0.199	0.007		0.8188	8	0.014	0.4888
	0.176	0.008		0.8404	5	0.015	0.6805
	0.155	0.008		0.8593	3	0.015	0.8083
	0.135	0.009		0.8769	2	0.016	0.8722
	0.117	0.01		0.8936	1	0.017	0.9361
	сжатие	7		0.01	0		
7.96		0.012	0				
8.004		0.012	0				
8.042		0.012	0				
8.1		0.013	0				
8.08		0.014	0.0025				
8		0.014	0.0123				
7.5		0.015	0.0741				
6		0.015	0.2593				
3.76		0.016	0.5358				
2		0.016	0.7531				
0.5		0.017	0.9383				

Для верификации моделей было проведено численное моделирование испытаний образцов толщ при одноосном сжатии. Соотношение высоты образца к его диаметру равно 2, согласно требованиям ГОСТ к подобным лабораторным испытаниям. Сжимающее напряжение рассчитывалось как отношение силы реакции опоры образца к его поперечному сечению. На (Рисунок 2.17) приведено сравнение усредненных результатов лабораторных испытаний с результатами численного моделирования. Видно, что область разгрузки образца в численной модели ограничивается меньшими деформациями, это

вызвано отсутствием контакта между образцом и сжимающим его пластиной, ввиду потери жесткости конечных элементов из модели и исключения их из расчета, а также симметричным расположением конечных элементов в образце.

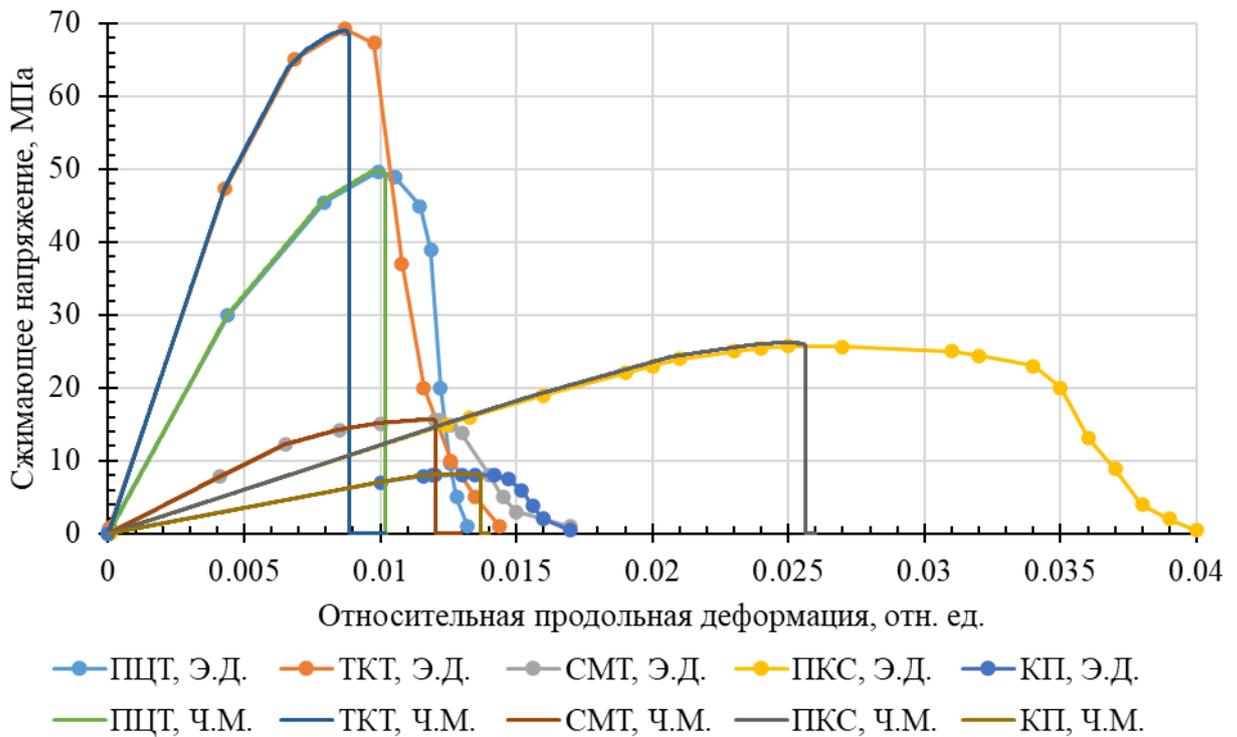


Рисунок 2.17 – Верификация параметров модели CDP для подрабатываемых толщ

Проведённые численные эксперименты наглядно демонстрируют, как на макро уровне возникают трещины в деформируемом образце – в конечном элементе по мере увеличения деформаций в нём уменьшается жесткость и при достижении предельных значений он исключается из расчета. На (Рисунок 2.18) цветом обозначено значения показателя поврежденности материала от сжимающего напряжения.

На основе результатов численного моделирования испытаний образцов подрабатываемых толщ приведенные параметры модели CDP обеспечивают образование трещин в соответствии с деформационными характеристиками пород, определёнными в ходе проведения лабораторных испытаний.

Описанная модель позволяет произвести прогноз НДС ВЗТ, обеспечивая накопление повреждений в численной модели. Таким образом, представляется возможным учитывать влияние нарушенных зон, трещин отрыва и сдвига на распределение напряжений в характерных толщах ВЗТ и определить закономерности возникновения первичной трещины, этапов разрушения ВЗТ, а также формирования гидравлически связанной системы трещин в процессе развития оседаний поверхности.

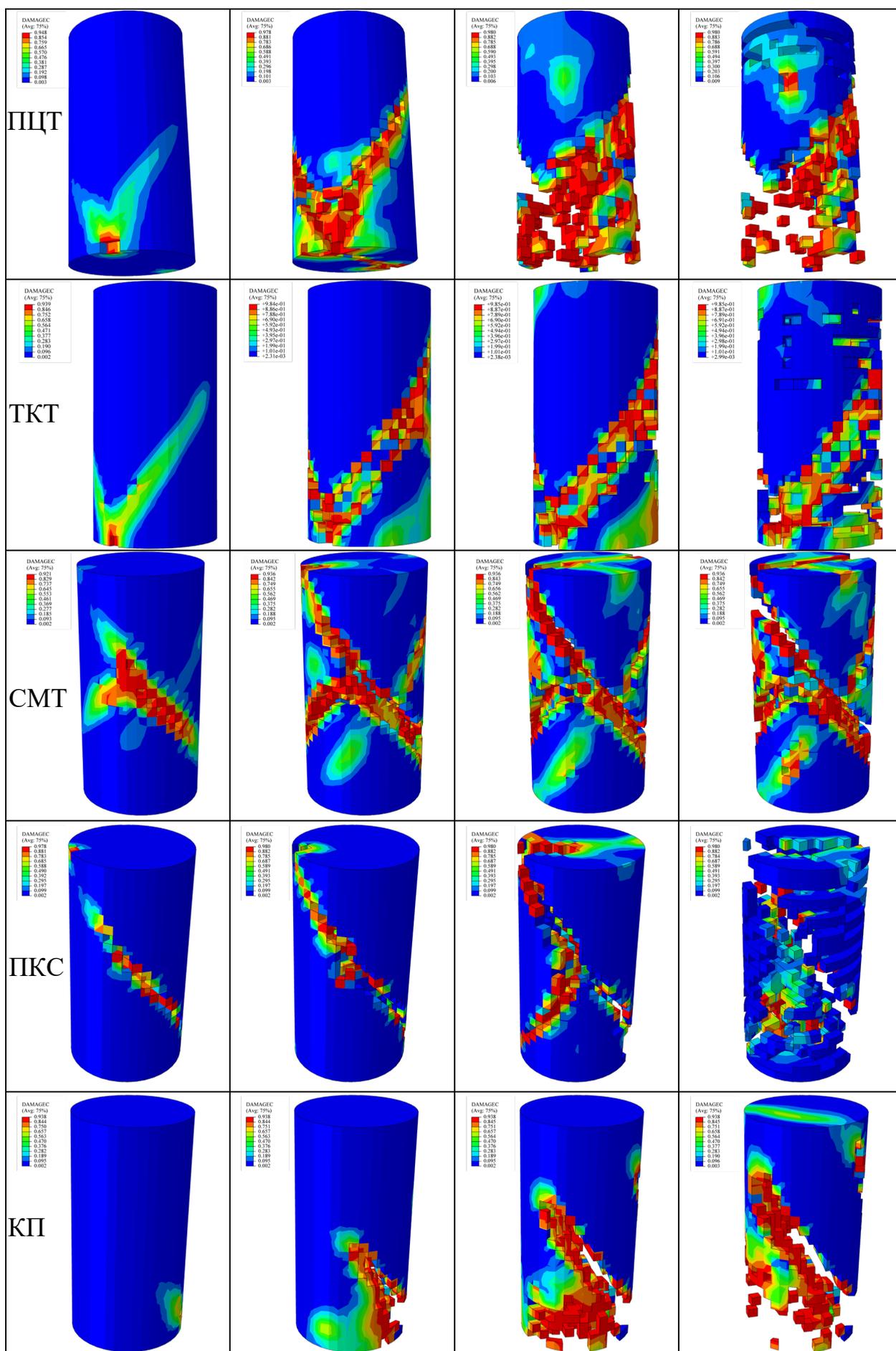


Рисунок 2.18 – Развитие трещины в образцах толщ

2.4 Поверхность текучести и реологические свойства соляных пород

Геомеханические процессы, протекающие в подработанном массиве, имеют временной характер, поскольку соли склонны к проявлению реологических свойств: длительная прочность, релаксация и ползучесть [7, 12]. Следовательно, как во время, так и после завершения отработки месторождения возможны проявления предпосылок к нарушению целостности ВЗТ, из-за изменения напряжённо-деформированного состояния горных пород.

Предел длительной прочности является критическим параметром, определяющим долговечность и устойчивость материала под постоянной нагрузкой. Это значение используется для оценки риска разрушения пород и для разработки мер по обеспечению безопасности и устойчивости горных выработок. Установление предела длительной прочности позволяет определить оптимальные нагрузки, при которых порода сохраняет свои механические свойства и не подвержена прогрессирующему разрушению. Он является ключевым параметром при планировании и проведении горных работ, обеспечивая надежность и безопасность эксплуатационных процессов.

Релаксация – это свойство горной породы с течением времени снижать уровень внутренних напряжений σ при постоянной величине относительных деформаций ε .

Ползучесть – это свойство горной породы с течением времени накапливать деформации ε при постоянной величине внутренних напряжений σ .

Параметры поверхности текучести определяются из анализа и обработки паспортов прочности образцов соляных пород. Угол наклона и точка пересечения функции с осью ординат однозначно определяют её.

Методика определения поверхности текучести соляных пород

1. Построение паспорта прочности по критерию прочности Хоека-Брауна в осях главных напряжений.

2. На основе значений максимальных и минимальных главных напряжений строится график напряженного состояния в плоскости среднего и девиаторного напряжения (p, q) .

3. Расчет линейной аппроксимации:

а) Если график напряженного состояния образца в плоскости (p, q) не имеет значительных перегибов, то строится линейная аппроксимация по всем точкам графика.

Получившаяся прямая имеет угол наклона поверхности текучести.

б) Если график напряженного состояния образца в плоскости (p, q) имеет значительный перегиб, то необходимо рассчитать две линейной аппроксимации для участков графика, разделённых перегибом.

В этом случае угол наклона поверхности текучести рассчитывается как средний угол наклона аппроксимированных прямых.

Пункты 2 и 3 методики отображены на (Рисунок 2.19).

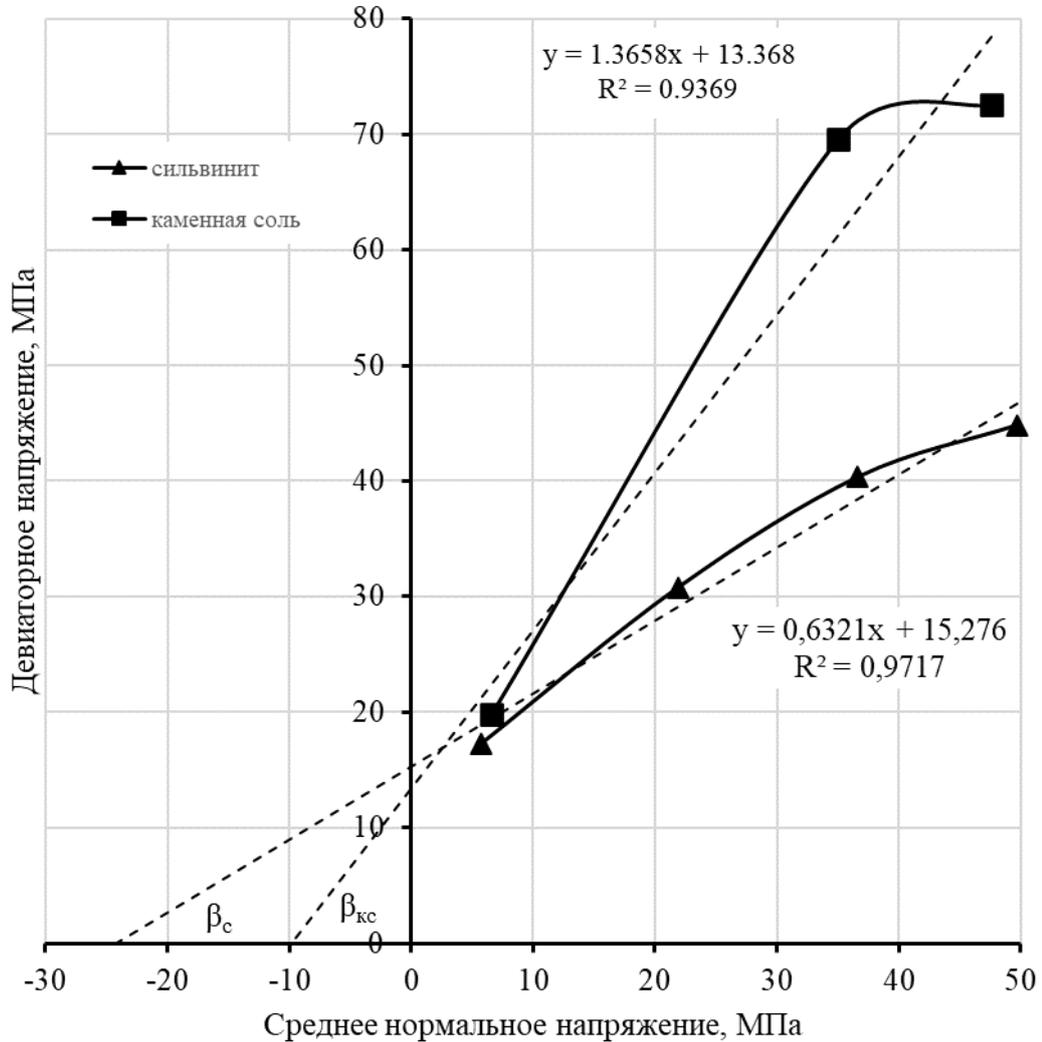


Рисунок 2.19 – График напряженного состояния образцов соляных пород в плоскости (p,q)
 β – угол наклона прямой

2.5 Результаты инструментальных наблюдений за деформациями породного контура горных выработок

Главной особенностью геомеханической модели поведения соляных пород является корректное отображение реологических свойств материала. Именно поэтому необходимо использовать результаты инструментальных наблюдений конвергенции горных выработок. Таким образом возможно определить корректные параметры реологической модели соляных пород с учетом горно-геологических условий и масштаба исследуемых объектов (междукамерный целик (МКЦ), одиночная горная выработка) [60, 38].

В работе используются результаты инструментальных наблюдений за деформированием МКЦ и конвергенцией очистных камер, выполненных на Палашерском участке месторождения по пласту КрП (Рисунок 2.20 и Рисунок 2.21) [52, 74].

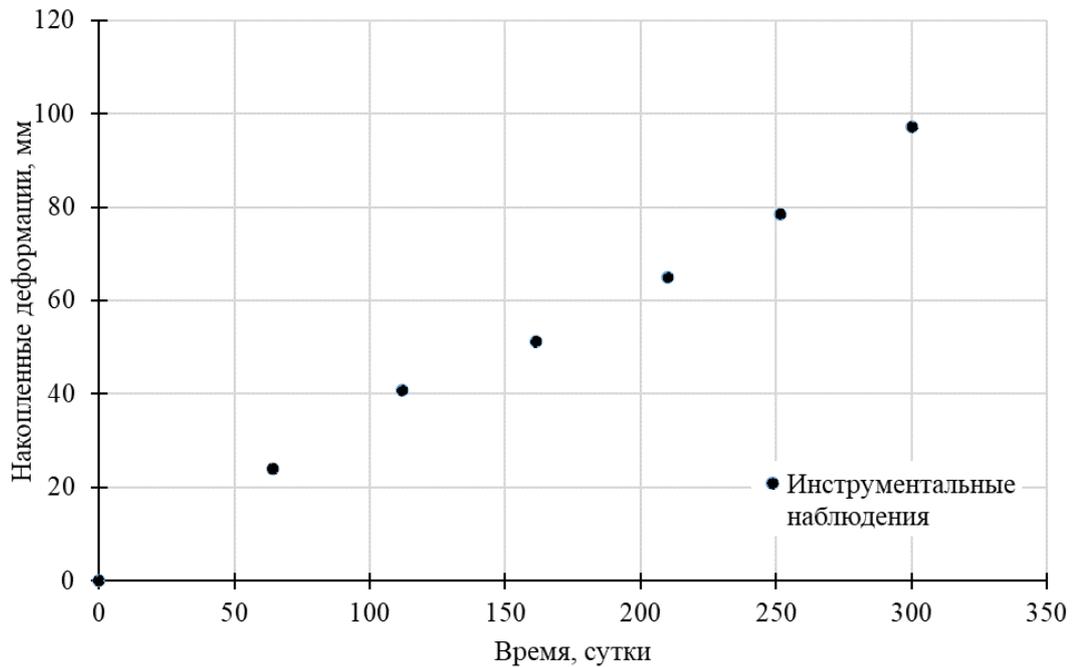


Рисунок 2.20 – График накопленных горизонтальных деформаций междукамерных целиков на 3 западном блоке 2 ЮЗП

Для определения параметров модели соляных пород по пласту ПДКС и изучения влияния геометрических параметров модели на результаты прогноза НДС одиночной горизонтальной выработки, пройденной в породах, склонных к проявлению реологических свойств, использовались результаты инструментальных измерений конвергенции кровли южного транспортного штрека околоствольного двора, представленные в [53] (Рисунок 2.22). Общие сведения о параметрах отработки исследуемых участков представлены в (Таблица 2.4). Горно-геологические условия проходки одиночной выработки представлены в (Таблица 2.5).

Таблица 2.4 – Общие сведения о параметрах отработки исследуемых участков

Панель, блок	Количество станций	Высота камер, м	Ширина камер, м	Ширина целика, м	Средняя глубина, м
2 ЮЗП, 3 ЗБ	5	5.7	5.5	9.0	390
2 ЮЗП, 4 ЗБ	6	5.7	5.5	9.0	390

Таблица 2.5 – Горно-геологические условия проходки транспортного штрека

Количество станций	Высота выработки, м	Ширина выработки, м	Горизонт	Средняя глубина проходки, м
8	3.1	6.3	-258	425

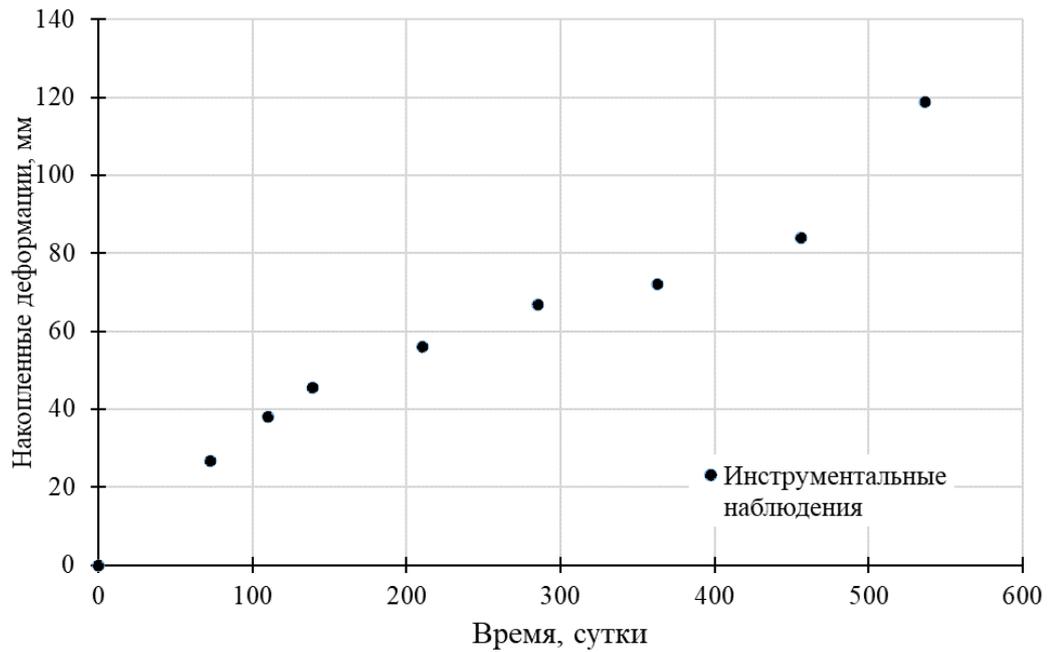


Рисунок 2.21 – График накопленных горизонтальных деформаций междукамерных целиков на 4 западном блоке 2 ЮЗП

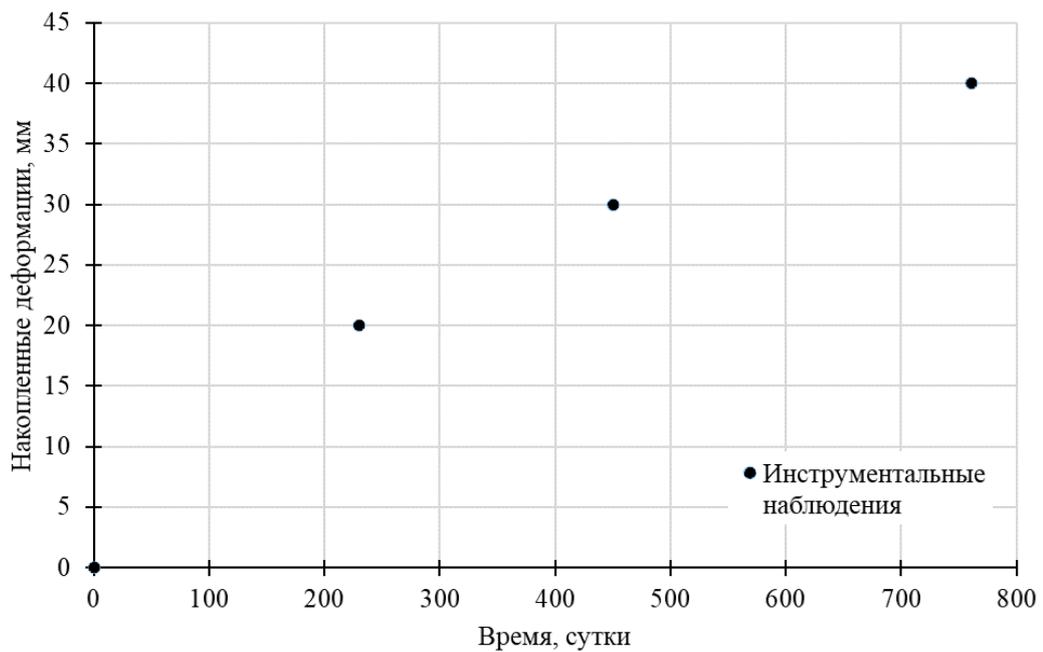


Рисунок 2.22 – График накопленных вертикальных деформаций на кровле одиночной выработки

2.6 Определение параметров реологических моделей соляных пород

Прогноз напряженно-деформированного состояния горных выработок выполнялся в два этапа: создание начального поля напряжений в массиве горных пород и моделирование проходки горной выработки посредством удаления элементов модели. При определении параметров реологической модели сильвинита рассматривались очистные камеры, расположенные в центре панели, что дает возможность отобразить в модели небольшую

часть разрабатываемого участка, в котором междукамерные целики нагружены симметрично, расчетная схема изображена на (Рисунок 2.23).

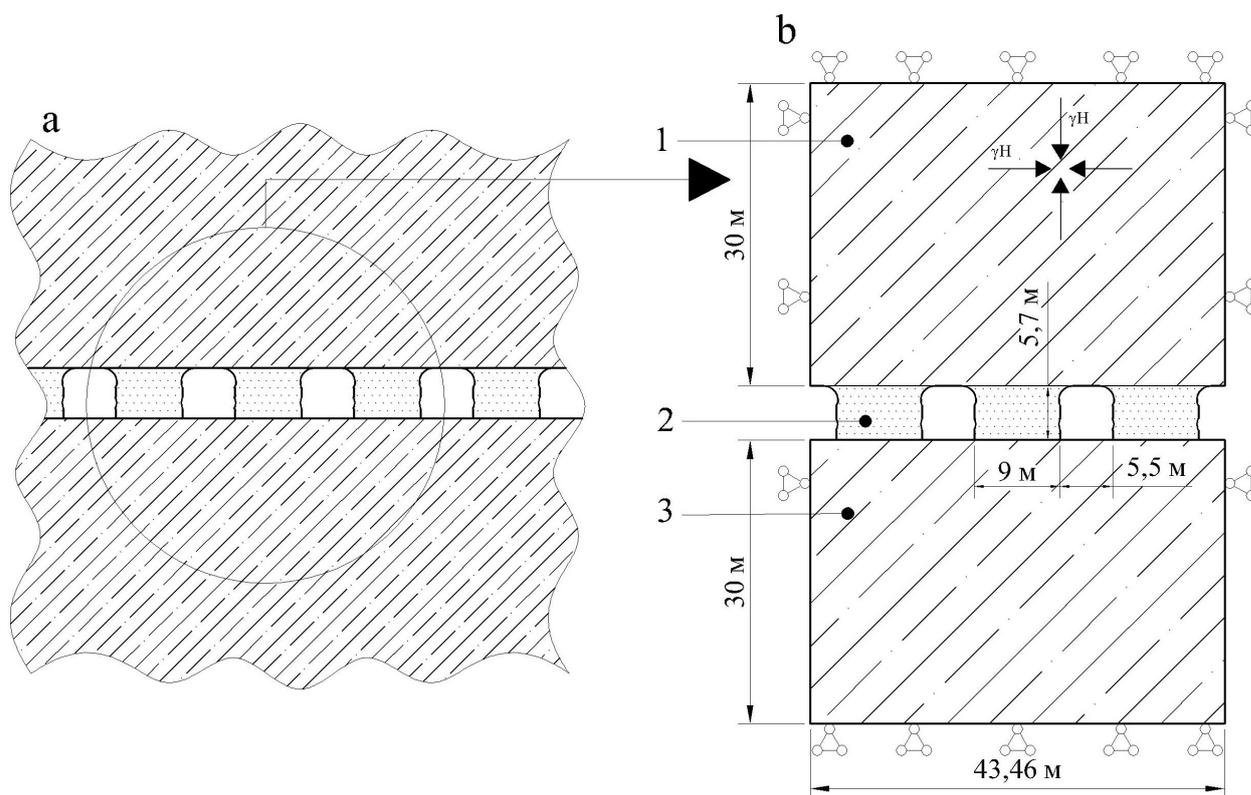


Рисунок 2.23 – Расчетная схема по определению параметров реологической модели сильвинита

а – разрез по участку панели, б – моделируемая область; 1 – породы ВЗТ,
2 – междукамерный целик, 3 – породы продуктивной толщи

При определении параметров реологической модели каменной соли рассматривалась одиночная горная выработка (Рисунок 2.24). По результатам натурных измерений конвергенций породного контура горной выработки и горного давления в соляных породах определено, что в рассматриваемых породах формируется гидростатическое поле начального горного давления. Данный факт учтен в модели соляных пород. Границы модели закреплены по осям, что обеспечивает смещения поверхности выработки за счет мгновенных деформаций и деформаций ползучести. В работе рассматривалась горная выработка круглого сечения, диаметром, равным высоте исследуемого штока [53], что исключает влияние геометрии выработки на результаты прогноза НДС пород в окрестности горной выработки.

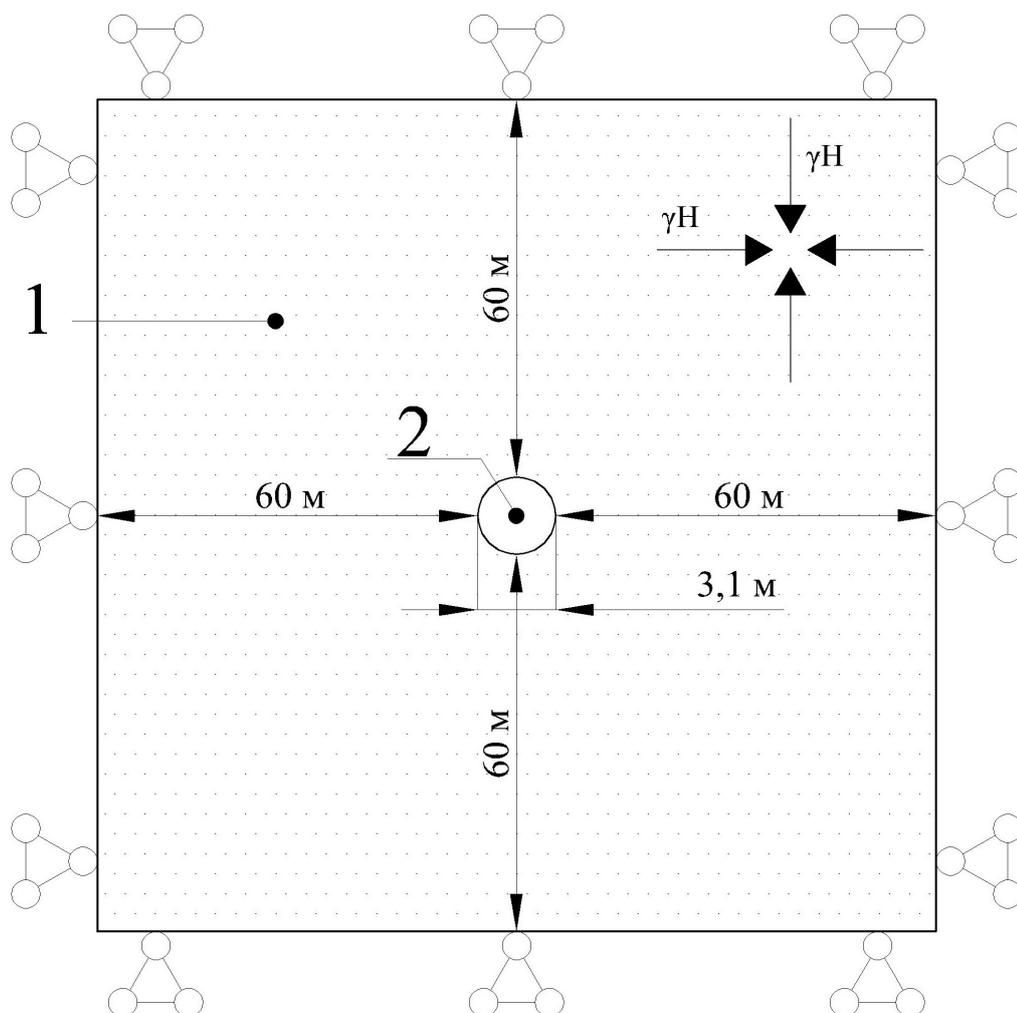


Рисунок 2.24 – Расчетная схема по определению параметров реологической модели каменной соли

1 – массив каменной соли, 2 – одиночная горная выработка.

В результате исследований были подобраны параметры реологической модели (1.43) соляных пород для модели деформационного упрочнения Друкера – Прагера (strain-hardening Drucker–Prager model), (Таблица 2.6). Модель сильвинита обеспечивает достаточную сходимость с данными натурных измерений конвергенций породного контура очистных камер. Модель каменной соли обеспечивает смещения породного контура одиночной выработки с установившейся постоянной скоростью, находящейся в интервале скоростей, характерном для данных условий и рассматриваемых пород – каменная соль, от 0,02 до 0,05 мм/сут [53, 63].

Таблица 2.6 – Параметры реологических моделей Палашерского участка ВКМКС

Порода, участок	Угол трения сдвига, °	Коэффициент текучести, К	Угол дилатансии, °	Константы ползучести		
				A	n	m
Сильвинит, междукамерный целик	32	1	10	10-10	1	-0.45
Каменная соль, одиночная выработка	54	1	10	5·10-10	0.7	-0.59

На (Рисунок 2.25) сопоставлены результаты инструментальных измерений за конвергенцией породного контура очистных камер и результаты расчета горизонтальных деформаций моделируемых междукамерных целиков на основе представленной реологической модели сильвинита.

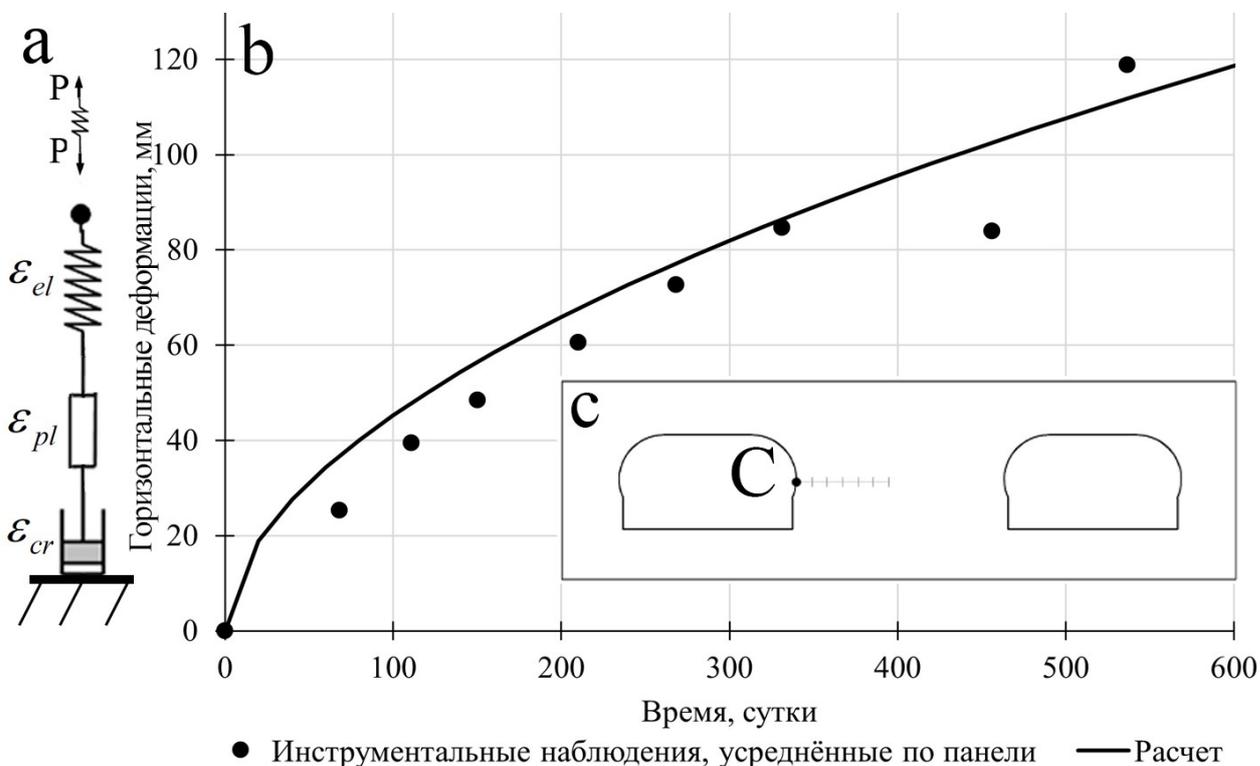


Рисунок 2.25 – Верификация реологической модели сильвинита по горизонтальным деформациям

а – схематическое представление реологической модели Друкера – Прагера, ϵ_{el} , ϵ_{pl} , ϵ_{cr} - упругие, пластические и вязкие деформации соответственно, б – горизонтальные смещения боковой поверхности целика, с – схема расположения реперов замерной станции, С – контурный репер

Рассмотрим вертикальные деформации моделируемых МКЦ, и сравним их с результатами инструментальных наблюдений за развитием мульды сдвижения земной поверхности (Рисунок 2.26, а). Расчетная схема отражает отработанный участок, в котором междукамерные целики нагружены симметрично, а влияние межпанельных целиков и

целиков под скважины исключено. Ввиду этого результаты численного моделирования необходимо сопоставлять с максимальными оседаниями земной поверхности по прошествии некоторого времени после отработки блока или смежных блоков. Рассматриваемые участки (2 ЮЗП, 3 ЗБ и 2 ЮЗП, 4 ЗБ) находятся под профильной линии № 5 (Рисунок 1.9). По инструментальным данным видно, что по мере отработки блоков, и с течением времени нижний участок мульды сдвигения перемещается в центр отработанного участка, что указывает на стремление системы «подработанная толща - МКЦ» к равномерному и симметричному распределению нагрузки на МКЦ относительно центра разработанного участка. Ввиду длительности описанного процесса расчетная величина оседаний сопоставляется с результатами инструментальных наблюдений по прошествии 2-х лет, что указывает на корректность реологической модели сильвинита для прогноза НДС МКЦ и оседаний земной поверхности, поскольку вертикальные деформации МКЦ определяют оседаний земной поверхности [76, 77, 11].

На (Рисунок 2.26, b) представлено сопоставление оседаний в численной модели с результатами, полученными согласно вычислений по нормативной документации [35, 36]. Наибольшие отклонения в прогнозе возникают на крайних участках: 10 лет – 13% и 150 лет – 6%, что указывает на достаточно хорошую сходимость результатов. В (Таблица 2.7) приведены значения расчетных параметров согласно методике, описанной в нормативной документации [35, 36].

Таблица 2.7 – Значения параметров при расчете оседаний и деформаций земной поверхности согласно нормативной документации

Т, лет	С	k_t	η_t , мм
10	0.36	0.082	160
20		0.118	230
30		0.153	298
40		0.183	357
50		0.214	416
100		0.329	640
150		0.435	847
<p>Т, – продолжительность прогноза, лет; С – степень нагружения целиков; k_t – временной коэффициент; η_t – величина оседаний на период прогноза, мм</p>			

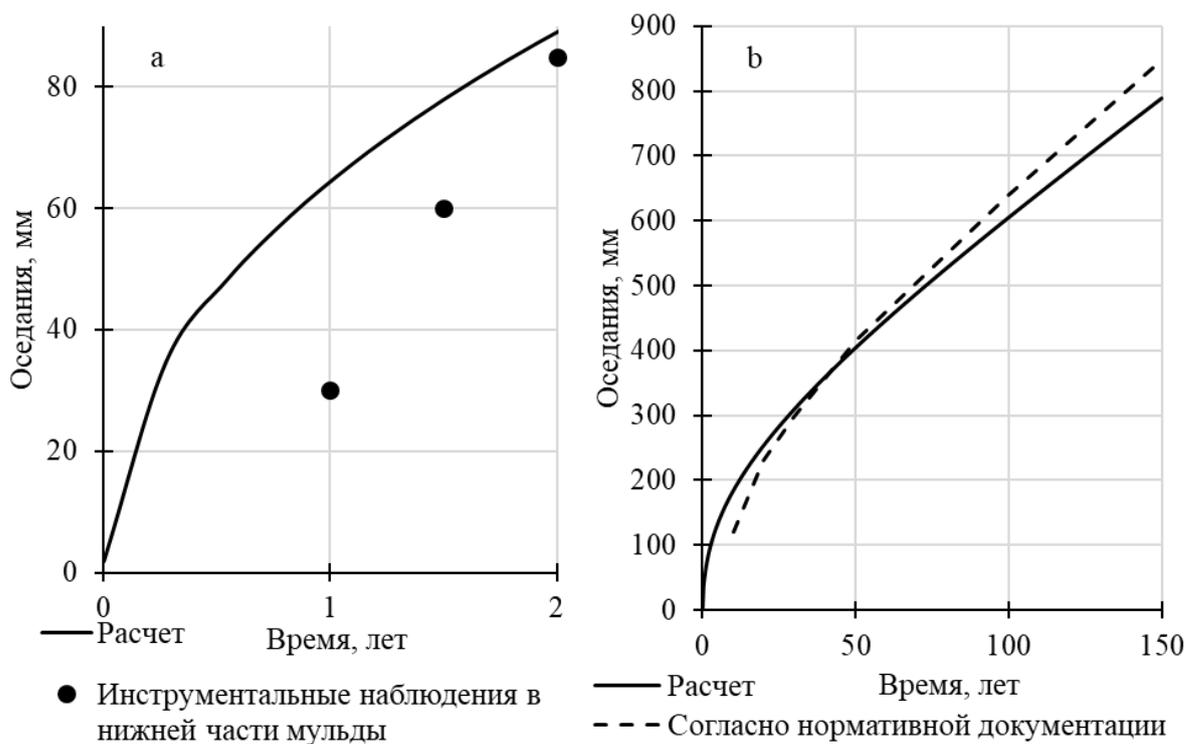


Рисунок 2.26 – Верификация реологической модели сильвинита по вертикальным деформациям

На (Рисунок 2.27, а) представлены средние скорости вертикальной конвергенции одиночной горной выработки, измеренные на наблюдательных станциях на УКК, средние скорости смещения поверхности горной выработки, полученные в ходе прогноза, и характерный интервал средних скоростей для рассматриваемых условий. Из материалов видно, что с течением времени результаты инструментальных наблюдений численно приближаются к показателям, полученным в модели.

На (Рисунок 2.27, б) сопоставлен график смещений породного контура в модели с характерным. На временном участке прогноза, равном 40 лет, модель показывает достаточно хорошую сходимость, погрешность 3.1 %. Модель обеспечивает симметричные и постоянные по скорости смещения поверхности выработки, что свидетельствует о возникновении установившейся ползучести в моделируемой толще каменной соли. Подобный характер и интенсивность развития смещений породного контура сопоставимы с таковыми в одиночных горных выработках, пройденными в каменной соли, на участке УКК. Реологическая модель массива каменной соли в данной работе служит инструментом определения влияния границ модели и её геометрических параметров на результат прогноза НДС массива вмещающих пород, склонных к проявлению реологических свойств. Ввиду малого объёма данных о конвергенции породного контура выработки, представляется возможным определить параметры модели на основе сходимости интенсивности развития смещений на достаточно большом временном промежутке прогноза, до 40 лет.

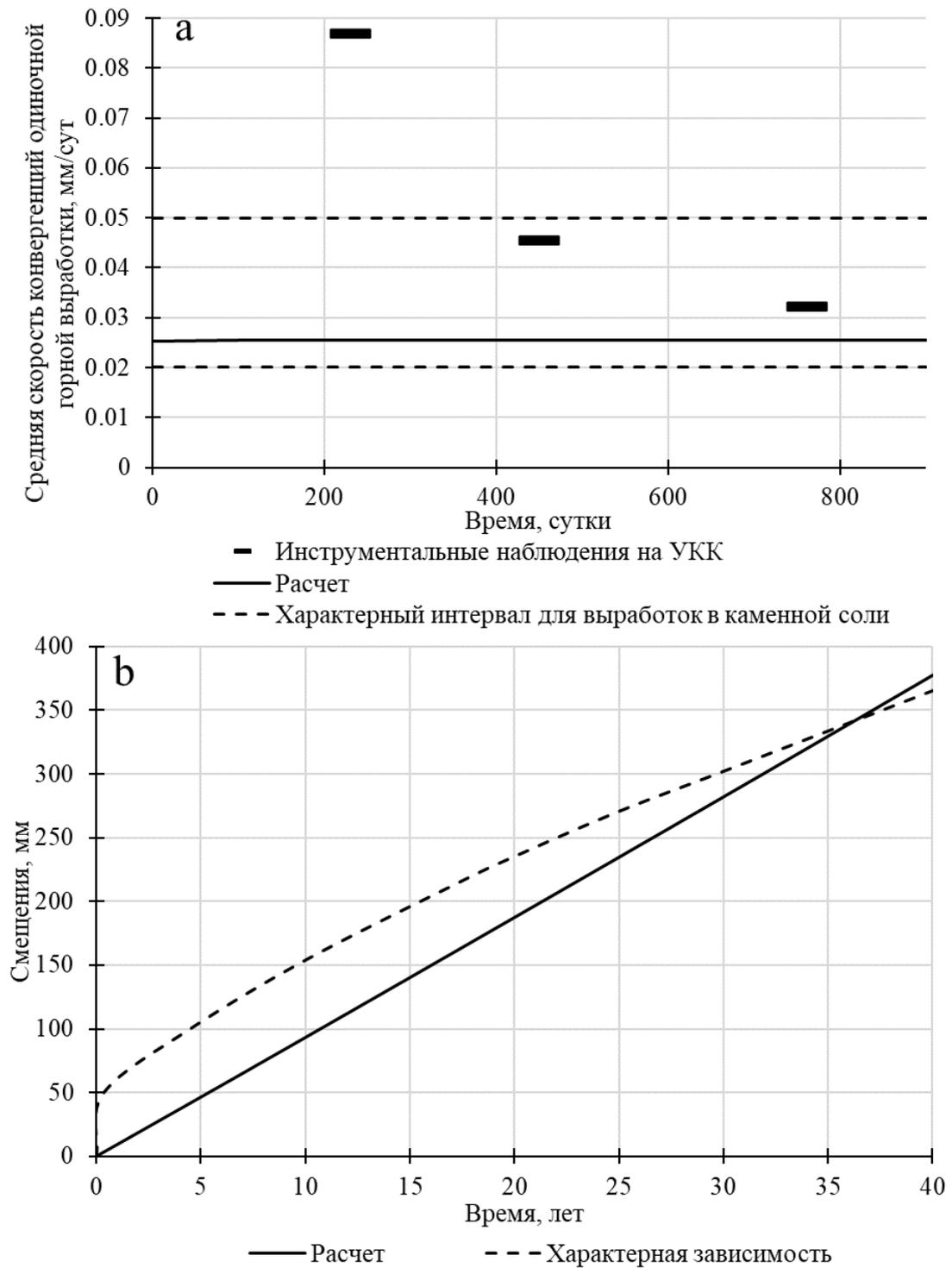


Рисунок 2.27 – Верификация реологической модели каменной соли
 а – график зависимости средней скорости конвергенций породного контура одиночной выработки; б - горизонтальные смещения боковой поверхности одиночной выработки

2.7 Выводы по II главе

1. Представлен метод определения физико-механических свойств пород на разрабатываемом Палашерском участке ВКМКС на основе анализа лабораторных испытаний с целью создания корректных геомеханических моделей соляных пород.

2. Изложен анализ горно-геологических условий разработки сильвинита по пласту КрII и проходки транспортного штрека.

3. Определены параметры упруго-пластических моделей деформирования подрабатываемых толщ, обеспечивающих хрупкий характер разрушения, на основе анализа результатов лабораторных испытаний пород, слагающих ВЗТ.

4. Описана расчетная схема прогноза НДС соляного массива в окрестности рассматриваемых горных выработок, на основе которых определены параметры реологических моделей сильвинита и каменной соли.

5. Реологическая модель сильвинита корректно описывает процесс деформирования междукамерных целиков и может служить для прогноза напряженно-деформированного состояния подрабатываемой толщи.

6. Реологическая модель массива каменной соли позволяет корректно произвести прогноз НДС вмещающего массива в окрестности одиночной горной выработки на достаточно большом временном промежутке до 40 лет при рассмотренных горно-геологических условиях. Представленная модель каменной соли в данной работе служит инструментом определения влияния границ модели и её геометрических параметров на результат прогноза НДС массива вмещающих пород, обладающих реологическими свойствами.

ГЛАВА 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД, СКЛОННЫХ К ПРОЯВЛЕНИЮ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

В предыдущей главе разработаны геомеханические модели соляных пород для условий Палашерского участка ВКМКС. Модель каменной соли может использоваться для прогноза напряженно-деформированного состояния в окрестности одиночной выработки. Однако на результаты прогноза влияют параметры расчетной схемы, реализованные в расчетной модели пород, обладающих реологическими свойствами.

В данной главе анализируются закономерности искажений результатов прогноза и выводятся рекомендации по построению математических моделей на примере многовариантного моделирования НДС одиночной горной выработки, пройденной в массиве каменной соли, пласт ПКС.

Представлен способ податливого крепления междукамерных целиков в породах, склонных к проявлению реологических свойств. Приведён анализ работы тросовой крепи при различных реакциях крепи в податливом режиме работы и диаметрах каната, а также выводятся рекомендации по прогнозу НДС закреплённых МКЦ и определению параметров крепи.

3.1 Метод исследований

Для анализа влияния параметров модели на результаты прогноза в работе применялся метод многовариантного моделирования. Рассмотрены результаты, полученные в моделях с различным расстоянием от горной выработки до границ модели, от 3 до 38 диаметров горной выработки. Размеры конечных элементов варьировались от 0.125 до 1 м. В моделях рассмотрены выработки круглого сечения с диаметром 3.1 м. и эллиптического сечения, с большим и малым диаметром 7 и 4 м соответственно. Численная модель выполнена в постановке плоской деформации – 2D с дискретизацией рассматриваемой области на четырёхугольные элементы первого порядка. Прогноз геомеханических процессов, выполнялся в программном комплексе Simulia Abaqus. На (Рисунок 3.1 и Рисунок 3.2) представлены расчетные схемы к многовариантному моделированию [78].

Расчет численным методом НДС массива соляных пород в окрестности одиночной горной выработки выполнялся в два этапа. На первом этапе задавались граничные условия и моделировалось исходное гидростатическое поле напряжений в нетронутом горном массиве. Граничные условия в модели включали ограничение боковых граней в горизонтальном перемещении, а также ограничение нижней и верхней грани в

вертикальных перемещениях. Это позволило точно воспроизвести исходные условия в массиве, соответствующие рассмотренным во второй главе горно-геологическим условиям проходки транспортного штрека.

На втором этапе проводилась моделировка проходки выработки путем "удаления" конечных элементов из модели. Этот процесс имитировал создание горной выработки и позволял анализировать изменения напряженно-деформированного состояния массива после проведения выработки. Моделирование такого рода помогает понять, как изменяются напряжения и деформации в окружающих породах после создания выработки, что критически важно для оценки устойчивости и безопасности горных выработок.

Таким образом, использование численного метода для прогноза НДС массива соляных пород позволяет получить детальное представление о механических процессах, происходящих в горном массиве при проведении выработок. Это обеспечивает возможность точного прогнозирования поведения массива и разработки мер для предотвращения потенциальных геомеханических рисков.

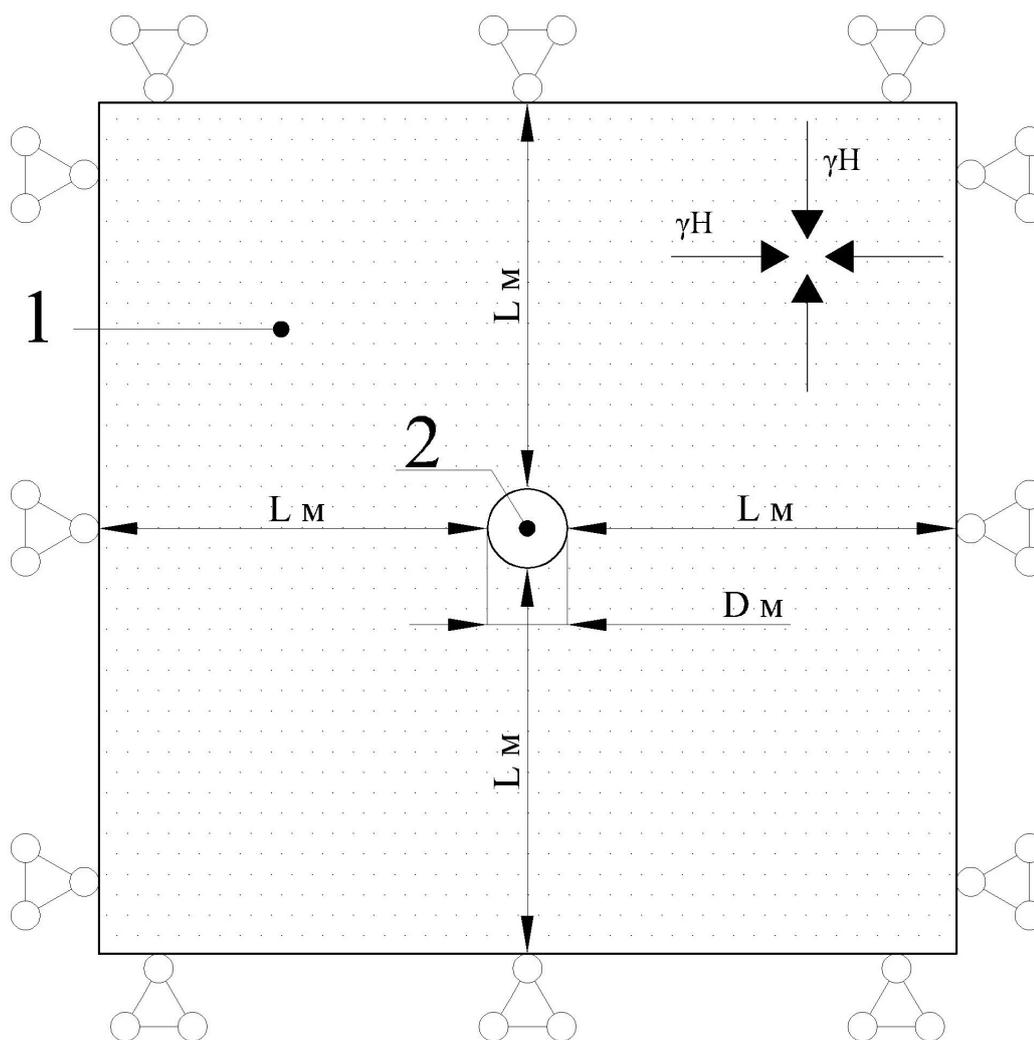


Рисунок 3.1 – Расчетная схема к многовариантному моделированию, выработка круглого сечения

1 – массив каменной соли, 2 – одиночная горная выработка

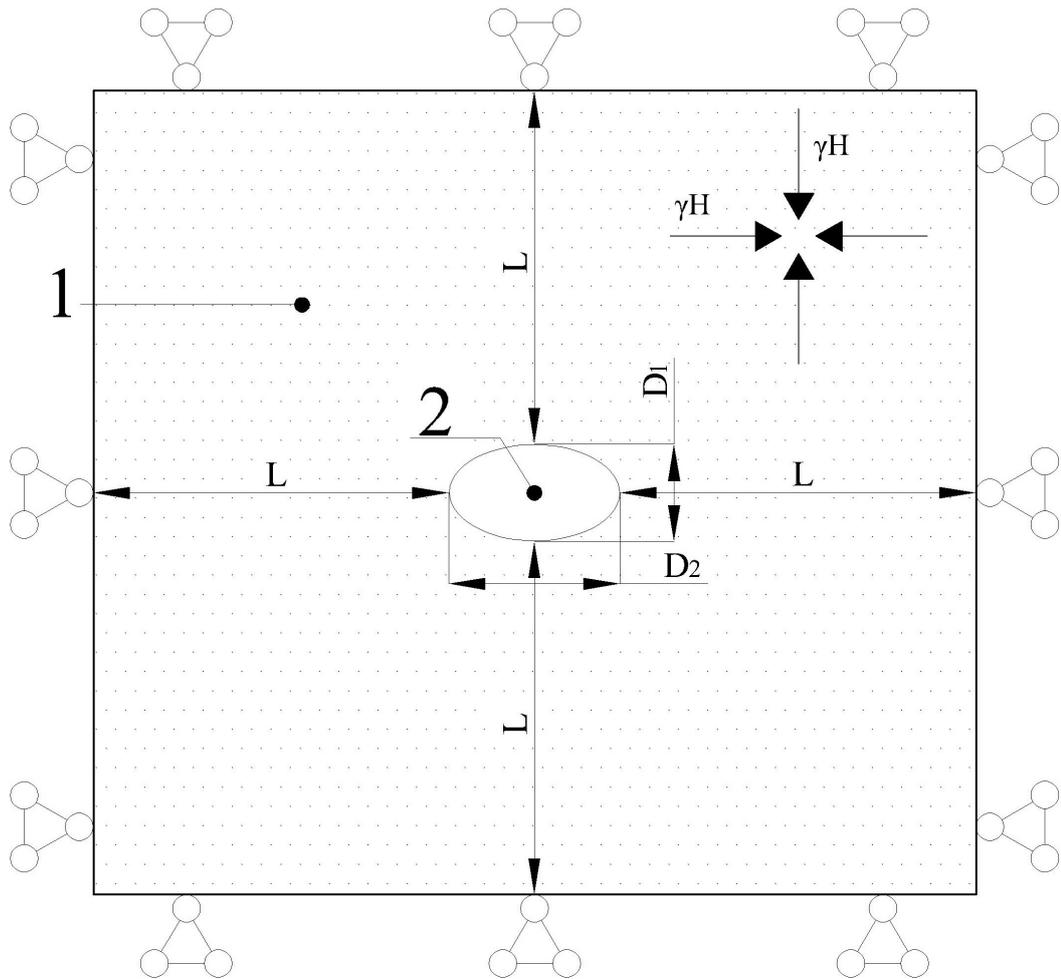


Рисунок 3.2 – Расчетная схема к многовариантному моделированию, выработка эллиптического сечения

1 – массив каменной соли, 2 – одиночная горная выработка

На первом этапе изучения анализировались результаты модели горной выработки круглого сечения для выявления закономерностей в результатах. Выявив интересующий интервал расстояний между контуром выработки и границами модели, на втором этапе рассматриваются модели горной выработки эллиптического сечения. В силу осесимметричной постановки задачи результаты, полученные в моделях горной выработки круглого сечения, идентичны по всем радиальным направлениям. В случае модели эллиптического сечения распределение напряжений и смещений на контуре формируется в соответствии с ориентацией главных диаметров выработки.

3.2 Первый этап моделирования

В процессе обработки результатов моделирования были выявлены не свойственные упруго-пластическим моделям искажения результатов в узлах элементов на контуре горной выработки и в её окрестности. Они отражаются в прогнозах конвергенций породного контура одиночной горной выработки, величин деформаций ползучести, пластических

деформаций и напряжений. Примеры искажений результатов прогноза отображены на (Рисунок 3.3 и Рисунок 3.4).

На (Рисунок 3.3 и Рисунок 3.4) также изображен контур конечных элементов, что позволяет соотнести искажения и сетку элементов. Из представленных эпюр видно, что элементы, ориентированные не нормально к деформируемой поверхности, приводят к неравномерному распределению напряжений, что в свою очередь приводит к соответствующим значениям величин пластических деформаций. В модели Друкера-Прагера деформации ползучести зависят от пластических деформаций. Таким образом, на контуре выработки с течением времени формируются несимметричные относительно центра выработки смещения. При использовании моделей второго порядка распределение напряжения в окрестности контура выработки осуществляется более равномерно, что объясняется большим количеством расчетных узлов в элементах.

Следовательно, для корректного прогноза НДС пород, склонных к проявлению реологических свойств, необходимо в окрестности деформируемой поверхности разбивать модель структурированной сеткой четырёхугольных конечных элементов первого или второго порядка. Элементы должны быть нормально ориентированы к деформируемой поверхности. Из результатов прогноза НДС, (Рисунок 3.5), видно, что достаточно одного ряда структурированных конечных элементов на деформируемом контуре для исключения на нём локальных экстремум напряжений.

Сопоставив эпюры, полученные в приведённых на (Рисунок 3.5) моделях, явно видно влияние размера конечного элемента и расстояния до границ модели. При слишком малых значениях последнего в модели процесс формирования напряжений искажается, что не может не влиять на результаты прогноза НДС, (Рисунок 3.6).

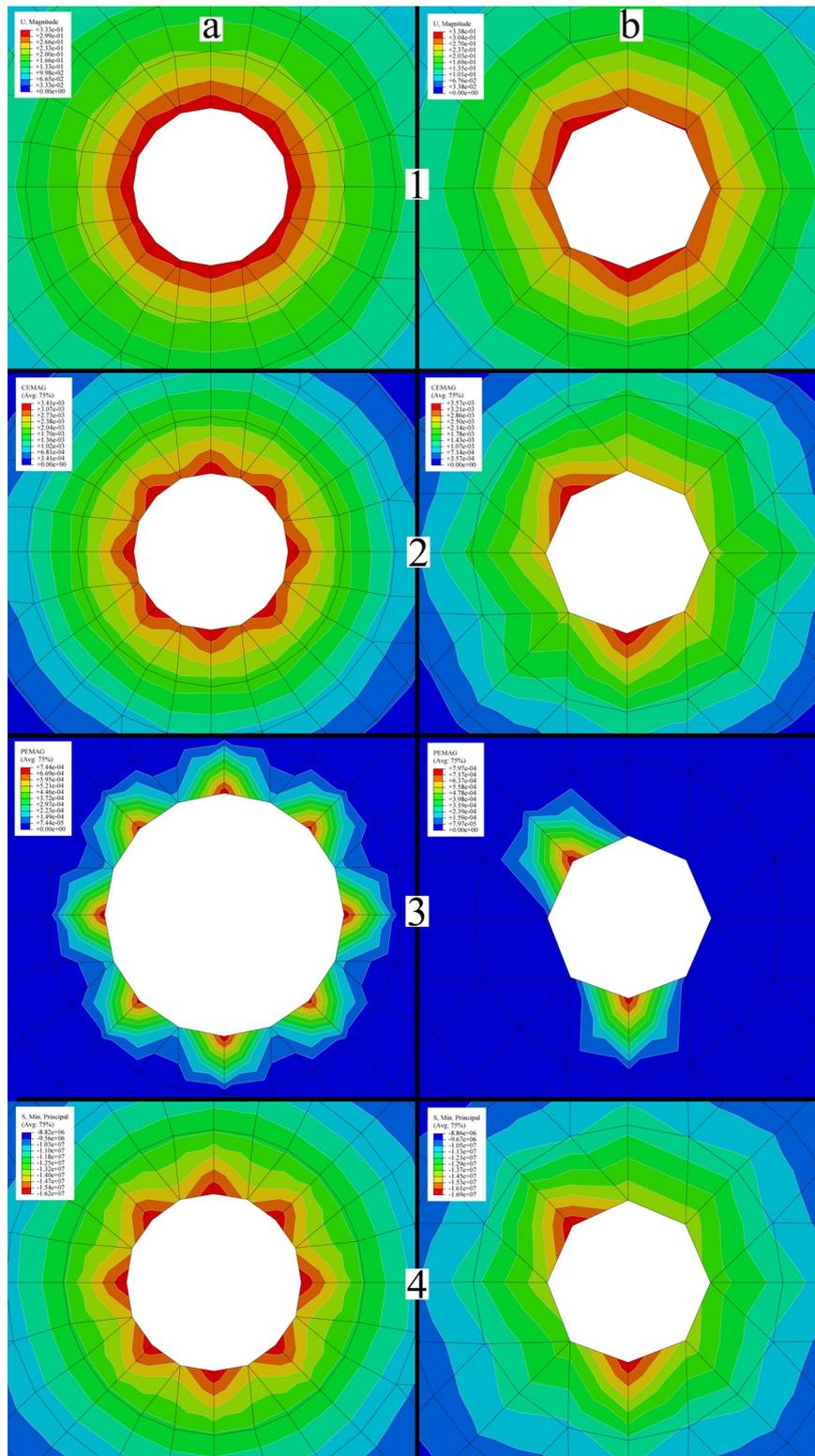


Рисунок 3.3 – Пример искажений результатов прогноза, элементы первого порядка
 а – модели с размером элементов 0.5 м, б – модели с размером элементов 1 м;
 1 – смещения, 2 – деформации ползучести, 3 – пластические деформации,
 4 – максимальные напряжения

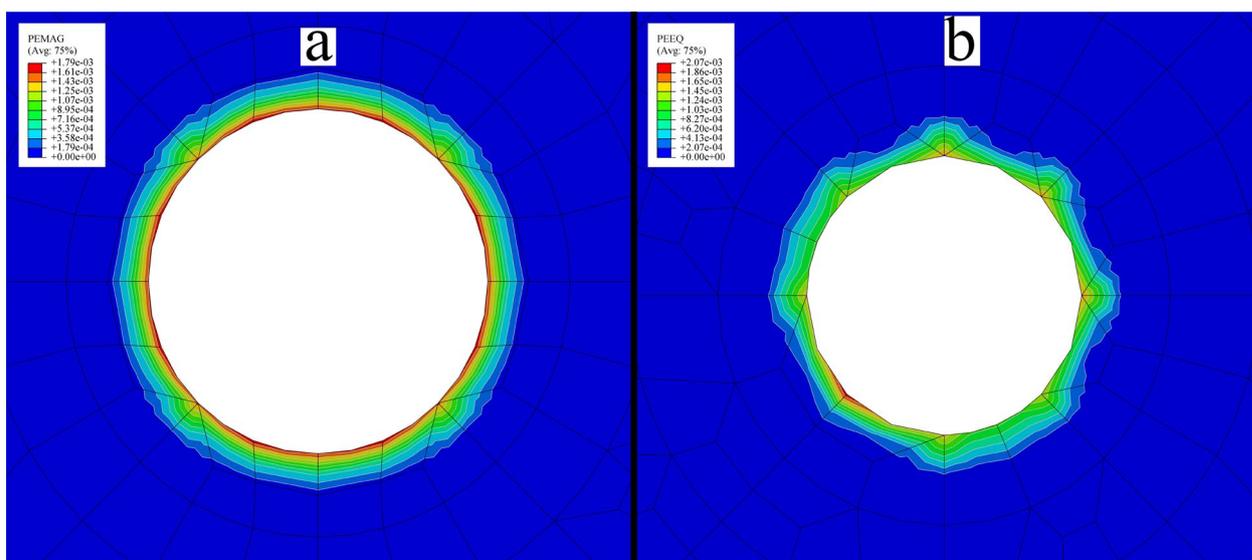


Рисунок 3.4 – Пример искажений результатов прогноза пластических деформаций, элементы второго порядка

а – модели с размером элементов 0.5 м, б – модели с размером элементов 1 м

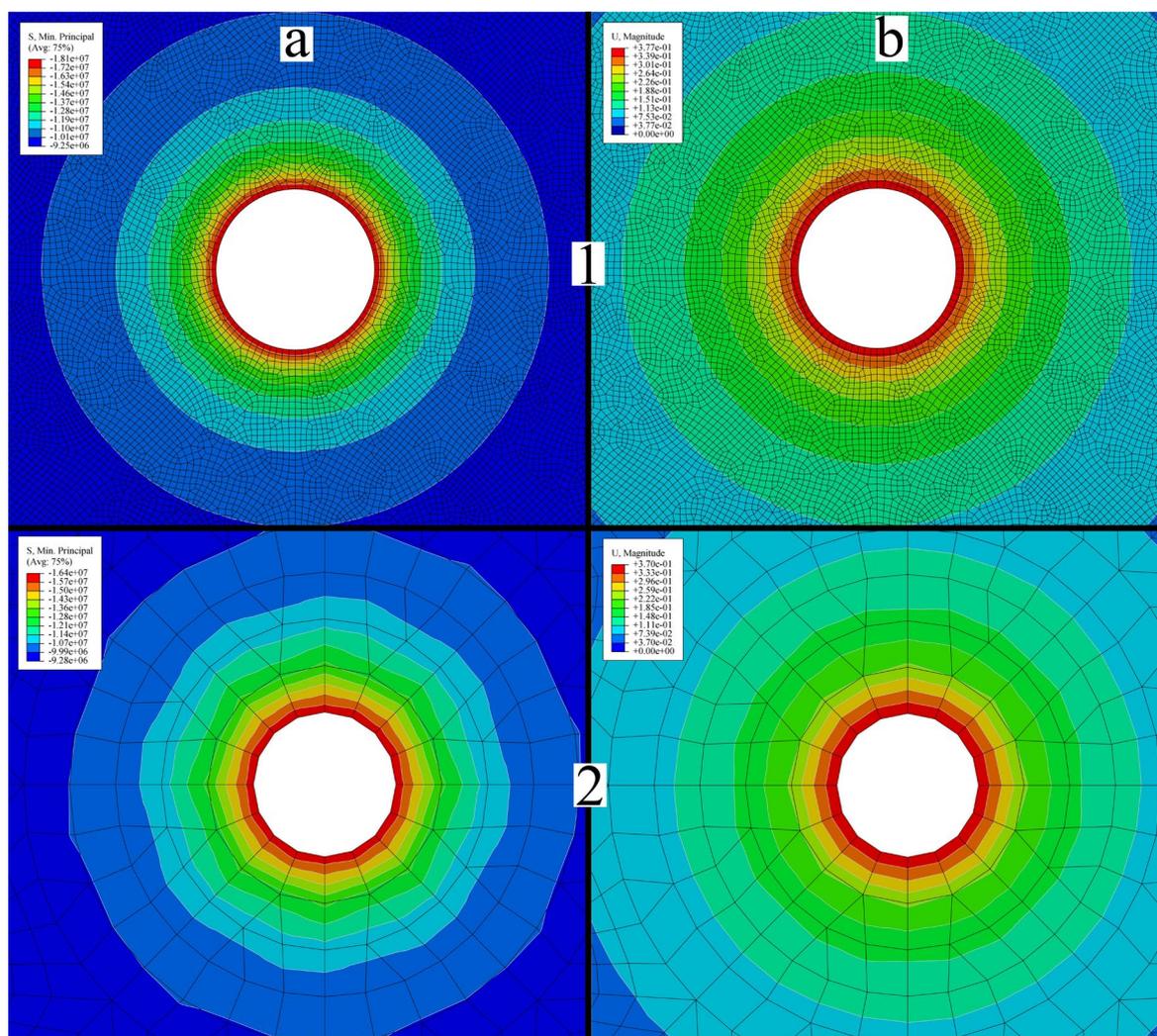


Рисунок 3.5 – Пример результатов прогноза НДС с одним рядом структурированных элементов первого порядка

а – максимальные напряжения, б – смещения контура выработки; 1 – расстояние от контура выработки до границ модели 8 диаметров, размер элемента 0.125 м;

2 – расстояние от контура выработки до границ модели 26 диаметров, размер элемента 1 м

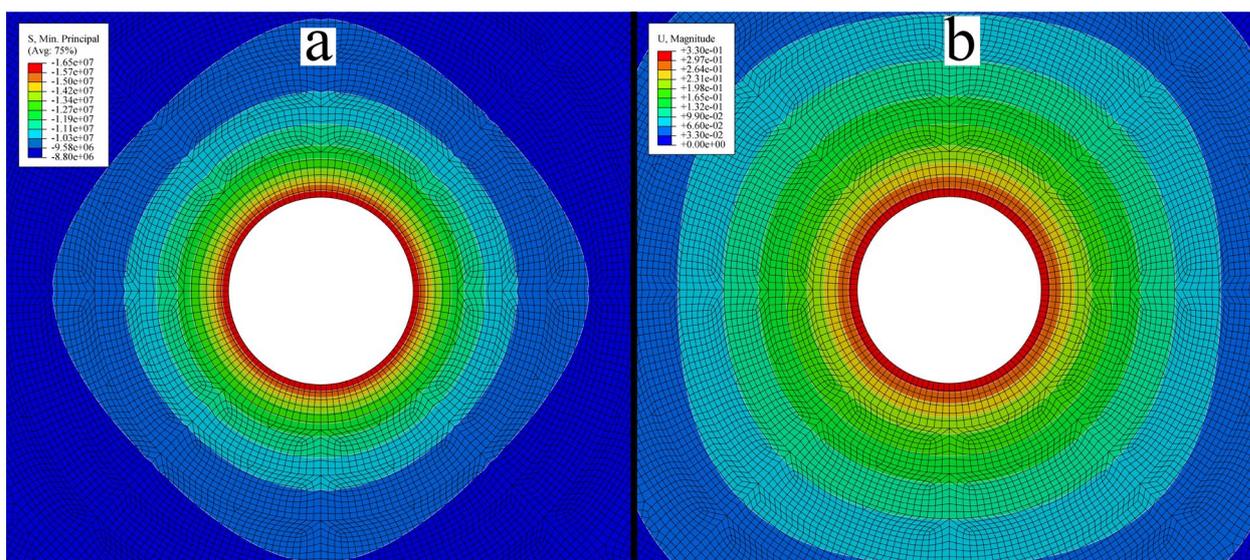


Рисунок 3.6 – Пример искажения результатов прогноза НДС при недостаточном расстоянии до границ модели
 а – максимальные напряжения, б – смещения контура выработки

При уменьшении расстояния до границ модели влияние размеров конечных элементов на результаты возрастает, это видно из сравнения двух моделей с расстояниями в 30 и 25 м и размером элементов в 1 м (Рисунок 3.7).

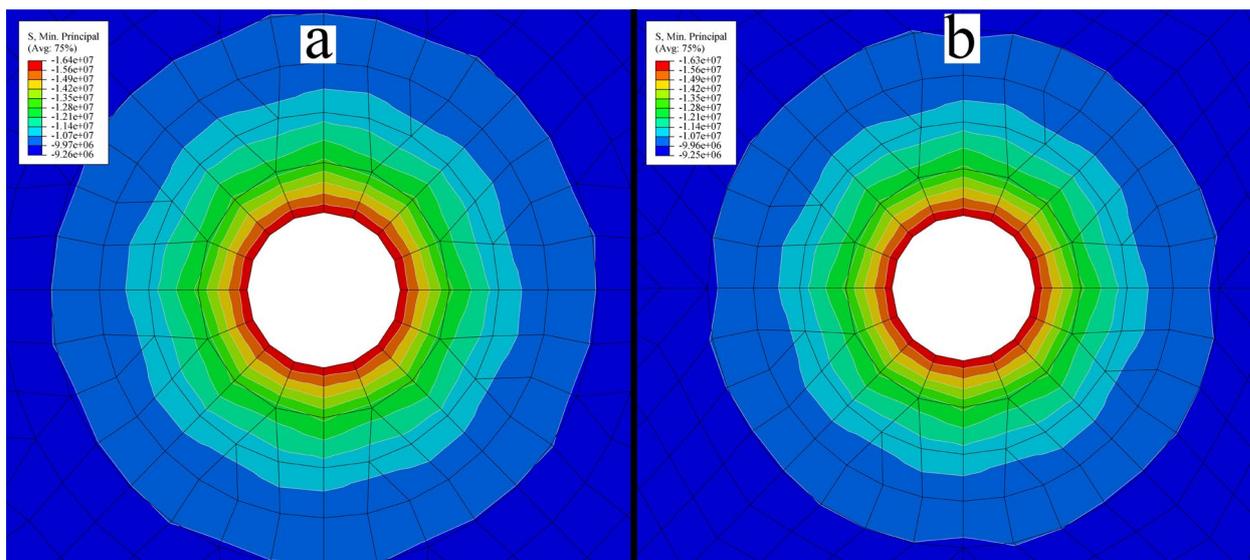


Рисунок 3.7 – Пример влияния размера конечных элементов на результат прогноза НДС
 а – 25 м до границ модели, б – 30 м до границ модели.

Для определения достаточного расстояния до границ модели и размеров конечных элементов рассчитаны 45 моделей. Рассматриваемые размеры конечных элементов, Δ : 1, 0.75, 0.5, 0.25, 0.125 м, рассматриваемые расстояния до границ модели: 3, 5, 8, 10, 16, 19, 26, 32 и 39 диаметров выработки (3.1 м.).

3.3 Анализ многовариантного моделирования

На (Рисунок 3.8) представлены результирующие деформации ползучести, реализованные на контуре горной выработки по окончании прогноза. По графику

прослеживается тренд на сближение результатов прогноза с уменьшением размера конечных элементов. С увеличением расстояния от горной выработки до границ модели влияние граничных условий в модели уменьшается. Во всех рассмотренных случаях данный эффект проявляется согласно единой закономерности: значительные изменения в результатах при расстоянии в 10 диаметров выработки.

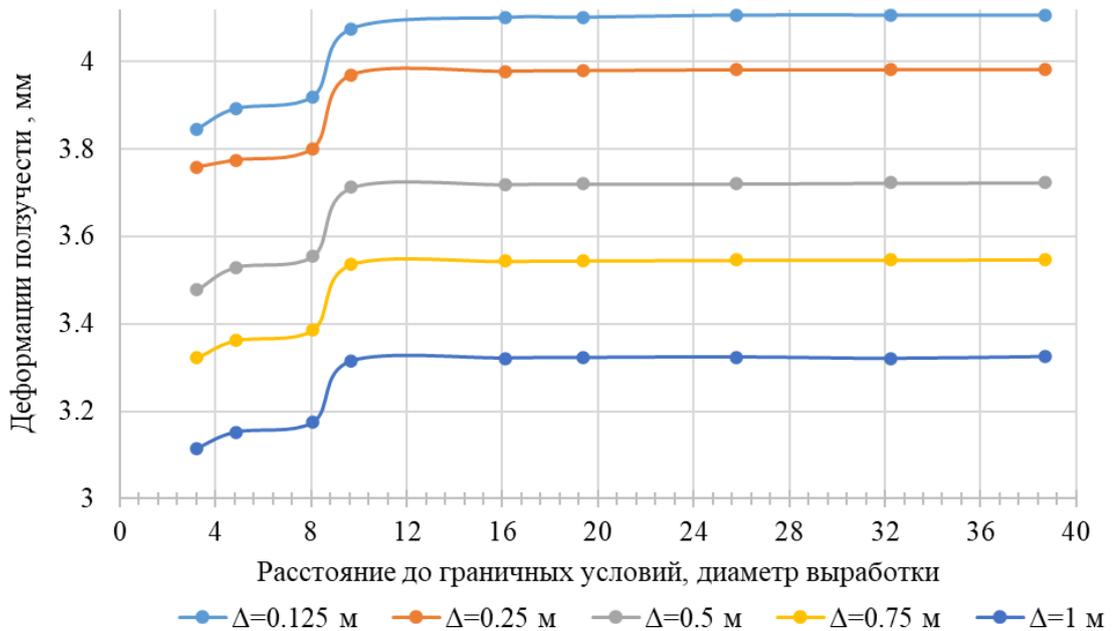
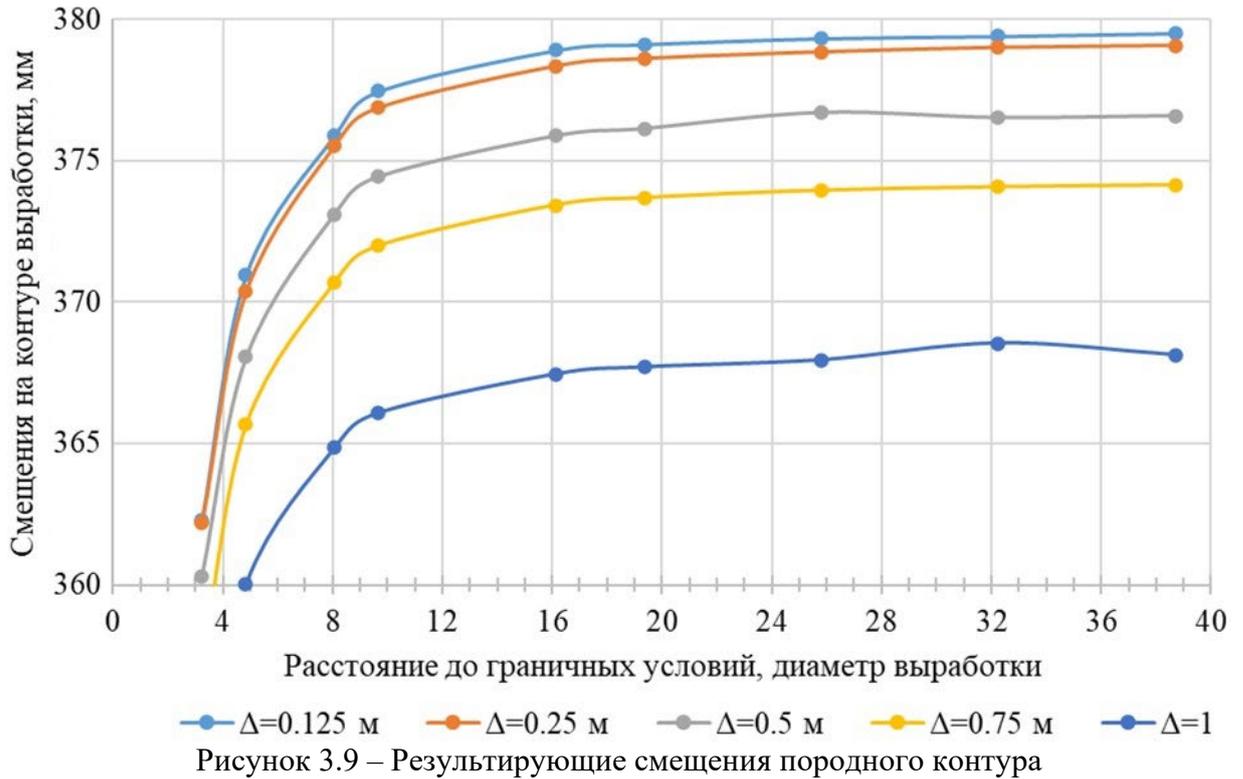


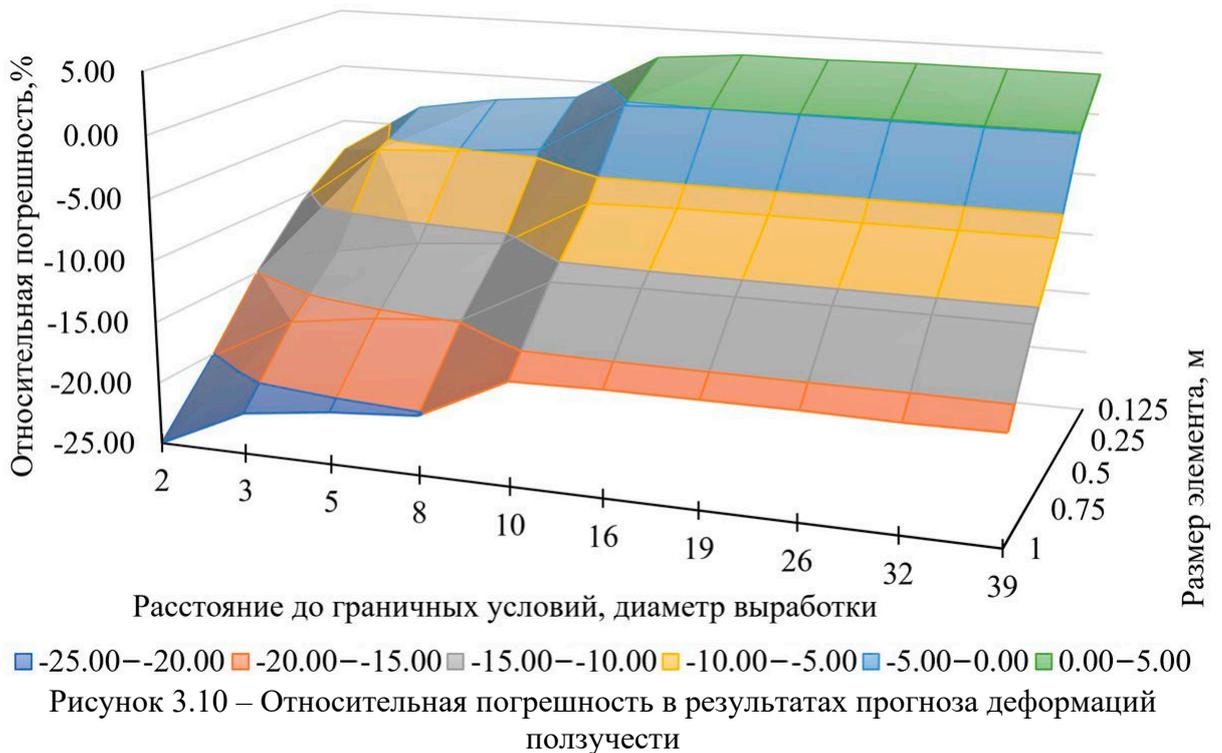
Рисунок 3.8 – Результирующие деформации ползучести на контуре выработки
 Δ – размер конечного элемента

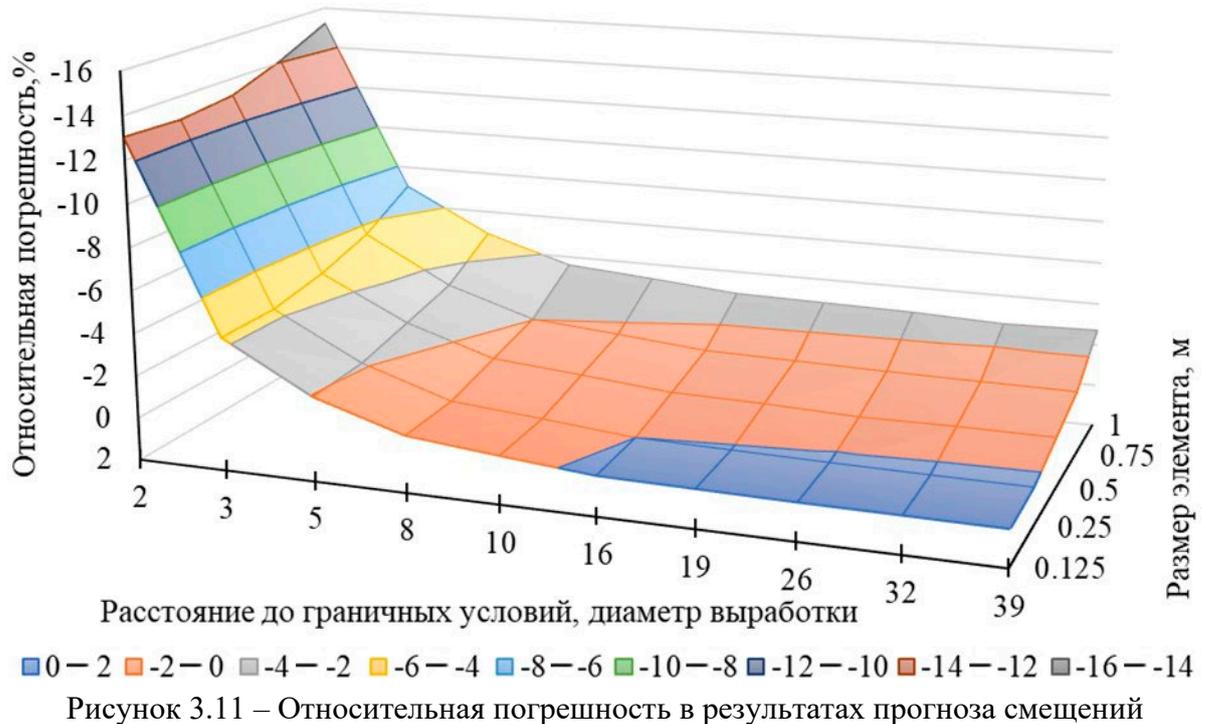
Рассмотрим результирующие смещения породного контура по окончании прогноза (Рисунок 3.9). Здесь прослеживается более отчетливая сходимость в результатах с уменьшением размеров конечных элементов. При расстоянии в 16 диаметров выработки разница в прогнозах смещения породного контура выработки в моделях с элементами в 0.125 и 0.25 м составляет 0.15 %. Данное расстояние до границ модели характеризуется выполаживанием графика.

Учитывая вышесказанное, наиболее рациональными параметрами численной модели будут являться размер конечного элемента 0.25 м, (0.08 диаметров выработки) и расстояние от деформируемой поверхности до границ модели 16 диаметров выработки. Уменьшение размера элемента и увеличение расстояние до границ модели приводят к значительному увеличению объёмов вычислений, что в свою очередь приводит к увеличению продолжительности выполнения вычислений, однако значительного увеличения точности не наблюдается.



Охарактеризовав указанные параметры как рекомендованные, возможно рассчитать относительную погрешность в результатах прогноза деформаций ползучести и смещений, (Рисунок 3.10 и Рисунок 3.11), соответственно. По представленным поверхностям видно, что при повышении точности в модели (уменьшение размеров элементов и увеличение расстояния до границ модели) величина деформаций ползучести и смещений увеличиваются на 3.2 и 0.3 % соответственно.





Таким образом, определённые параметры модели обеспечивают достаточную точность прогноза НДС пород, склонных к проявлению реологических свойств и исключают возникновение искажений в окрестности деформируемой поверхности.

3.4 Второй этап моделирования и анализ результатов

На втором этапе моделирования верифицируются определённые в первом этапе параметры модели, на примере выработки эллиптического сечения. Рассматриваемые размеры конечных элементов, Δ : 0.5, 0.25, 0.125 м, расстояния до границ модели: $10 \cdot D_1$, $16 \cdot D_1$, $16 \cdot D_2$, $20 \cdot D_2$, где D_1 , и D_2 – главные диаметры выработки, равные 4 и 7 м соответственно.

Прогноз деформаций и смещений в окрестности горной выработки в областях, где она имеет наибольшие линейные размеры, зависит от значений этих величин. Таким образом, оптимальное расстояние от деформируемой поверхности до границ модели определяется наибольшим линейным размером выработки. На (Рисунок 3.12 и Рисунок 3.13) представлены результирующие деформации ползучести и результирующие смещения породного контура по окончанию прогноза. По ним прослеживается аналогичная сходимость результатов, как в случае с выработкой круглого сечения. На (Рисунок 3.14) представлена относительная погрешность прогноза смещений на контуре выработки, в сравнении с моделями большей точности она не превышает 0.2%.

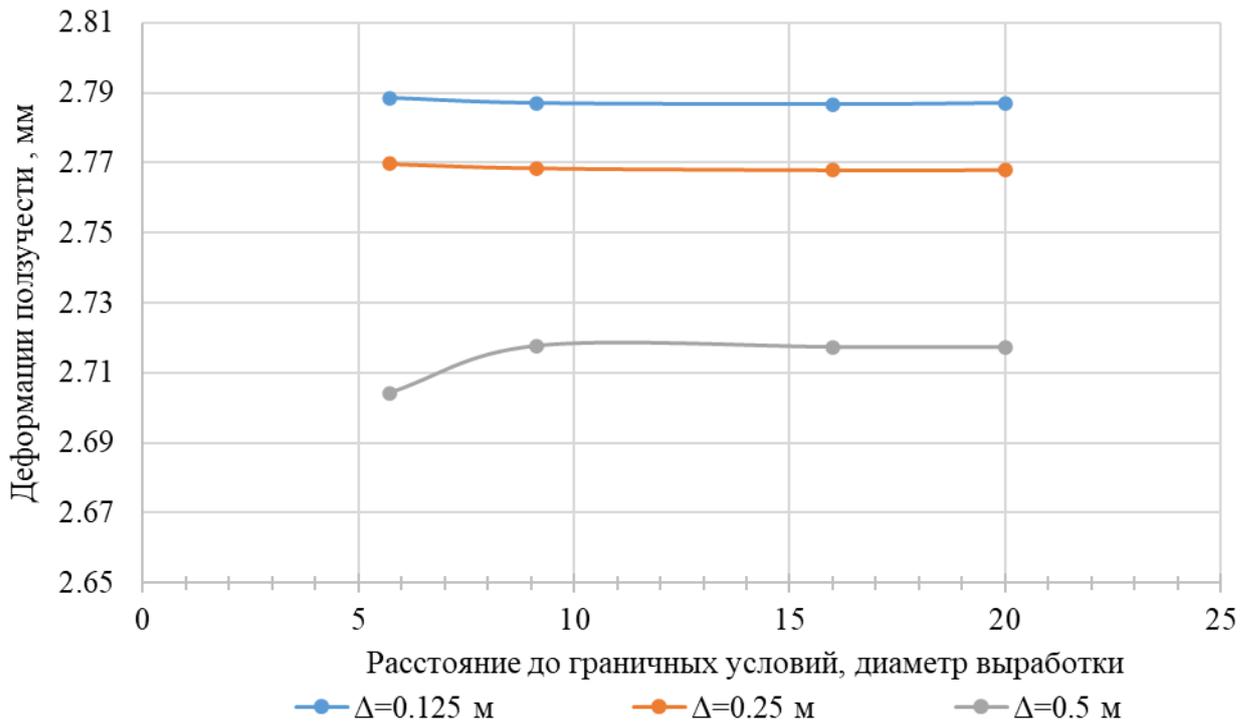


Рисунок 3.12 – Результирующие деформации ползучести на контуре выработки в зоне наибольшего линейного размера
 Δ – размер конечного элемента

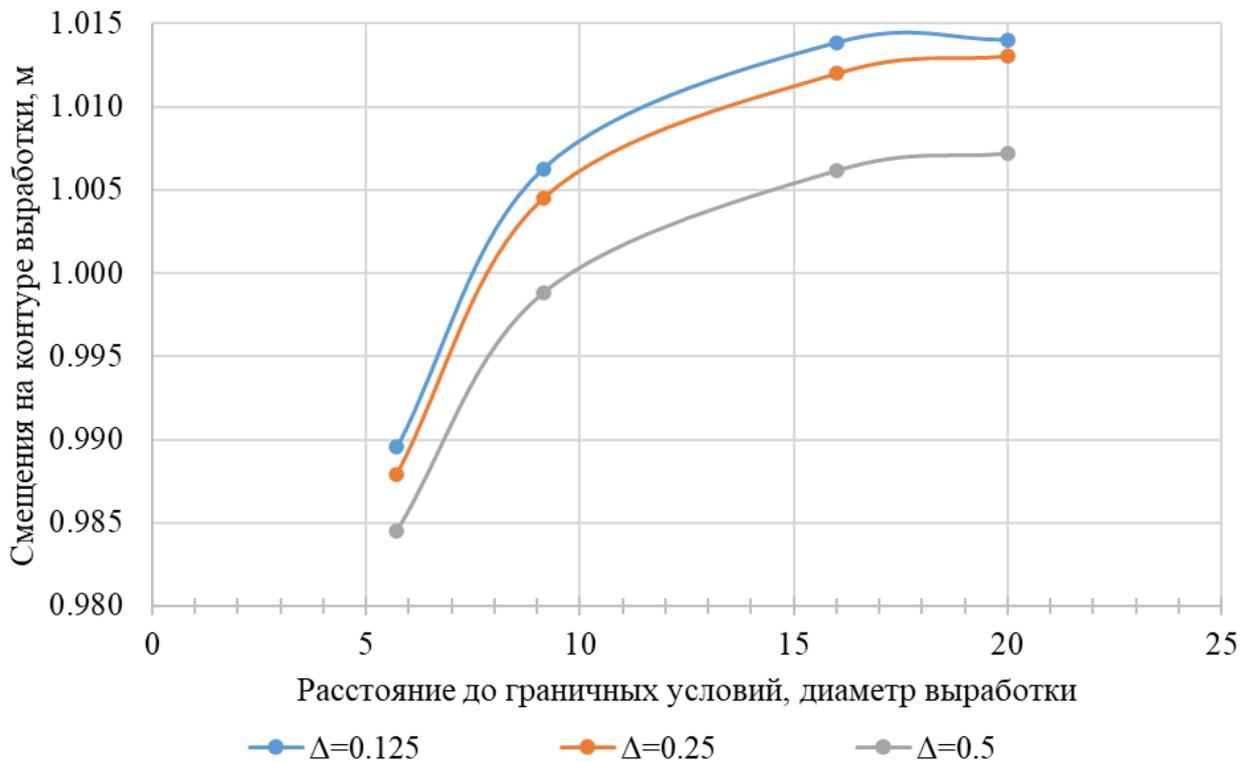


Рисунок 3.13 – Результирующие смещения породного контура в зоне наибольшего линейного размера

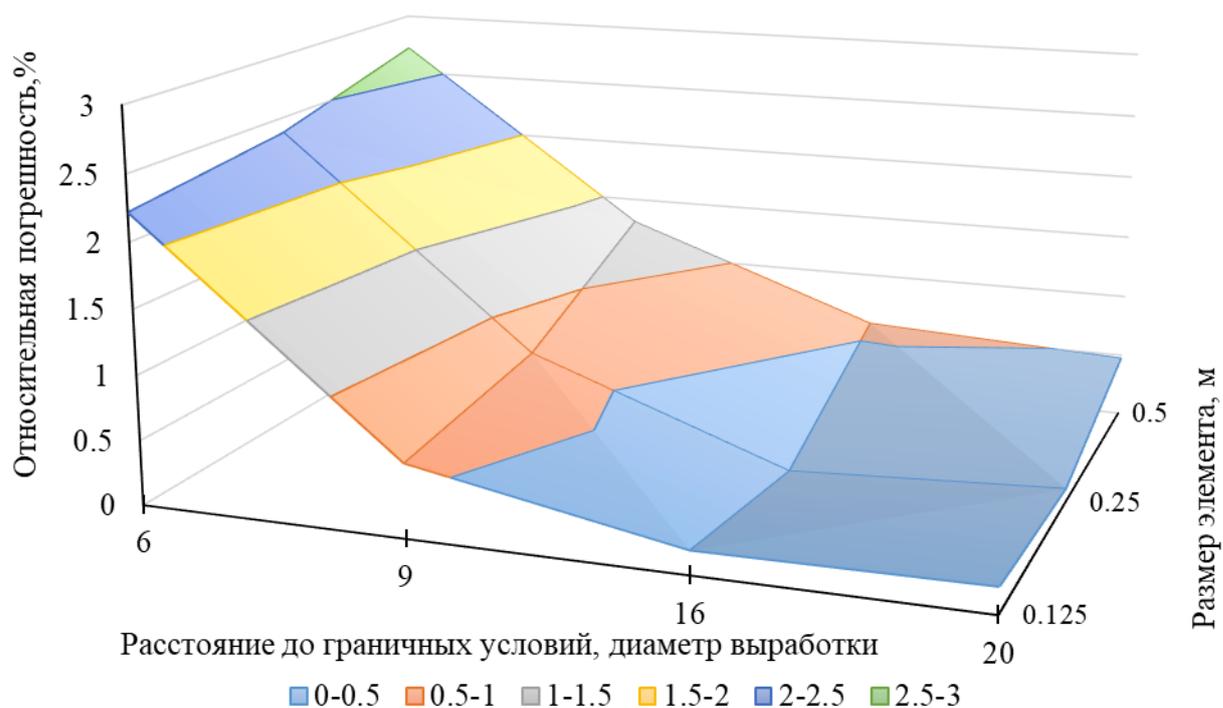


Рисунок 3.14 – Относительная погрешность в результатах прогноза смещений в зоне наибольшего линейного размера

Рассмотрим область модели в окрестности меньшего линейного размера горной выработки. Представим график результирующих деформаций ползучести на контуре выработки относительно расстояния до границ модели, выраженную в меньшем линейном размере, (Рисунок 3.15).

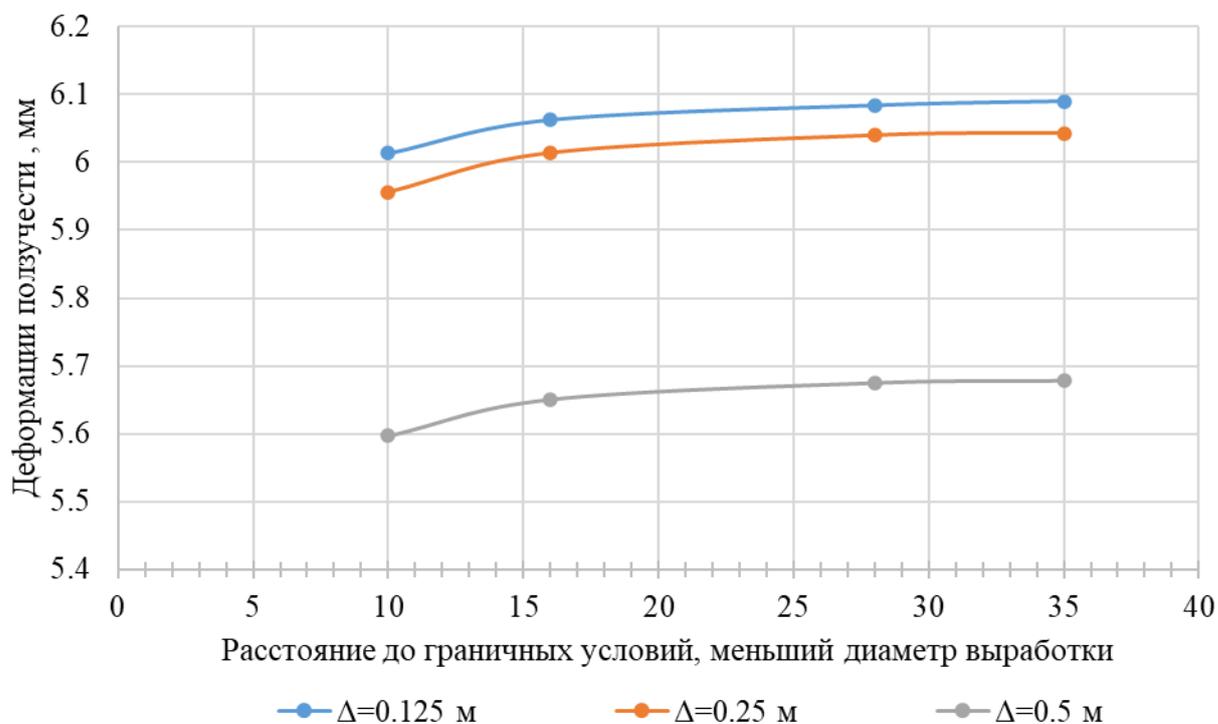


Рисунок 3.15 – Результирующие деформации ползучести на контуре выработки в зоне меньшего линейного размера
 Δ – размер конечного элемента

Расстояние в 16 малых диаметров выработки не является оптимальным, поскольку результаты прогноза значительно изменяются при дальнейшем увеличении расстояния. На (Рисунок 3.16) представлен тот же график, но относительно большего линейного размера выработки. Он соответствует выведенным ранее закономерностям и может быть сформулирован следующим образом: увеличение расстояния от деформированной поверхности до границ модели более 16 наибольшим линейным размерам выработки не приводит к значительному увеличению точности прогноза НДС пород, склонных к проявлению реологических свойств.

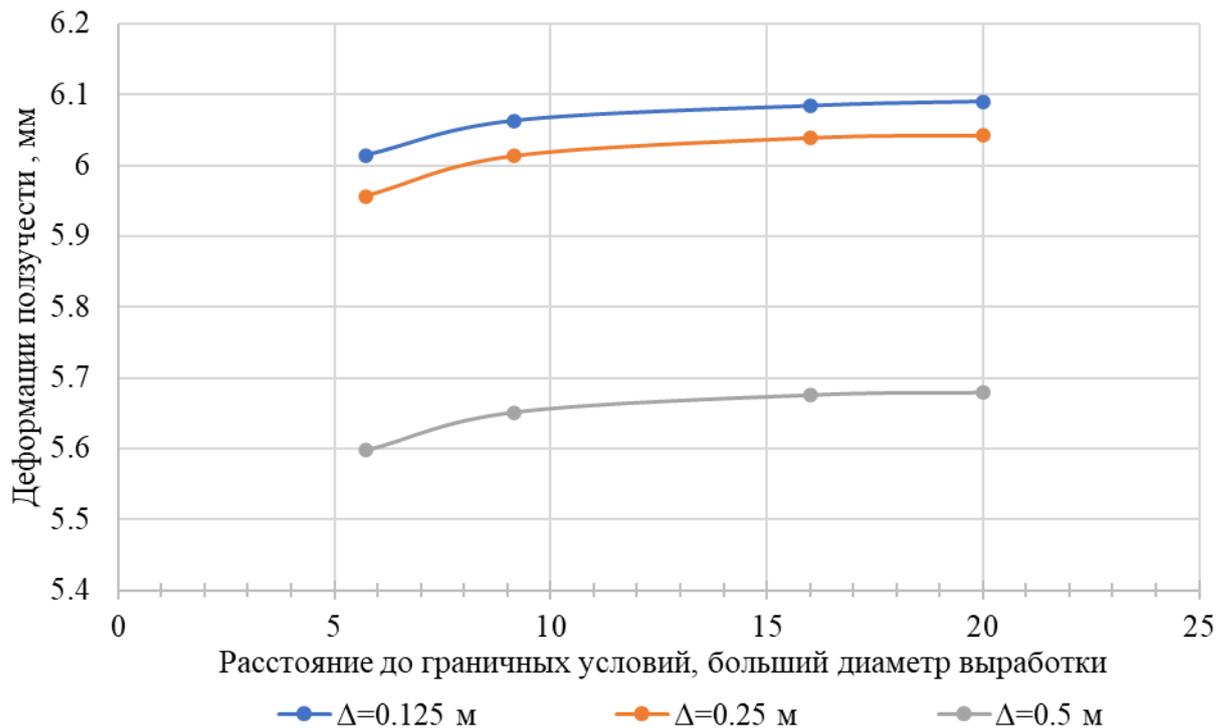


Рисунок 3.16 – Результирующие деформации ползучести на контуре выработки в зоне меньшего линейного размера
 Δ – размер конечного элемента

Рассмотрим график результирующих смещений породного контура в зоне наибольшего линейного размера, (Рисунок 3.17). Сходимость результатов прогноза смещений при размерах конечного элемента 0.125 м и 0.25 м сопоставима с рассмотренными ранее результатами. Относительная погрешность при прогнозе смещений в разы меньше, чем при прогнозе деформаций ползучести, что также соответствует ранее рассмотренным случаям. Из графика видно, что использование конечных элементов большего размера (0.5 м.) приводит к уменьшению вертикальных смещений в кровле и в почве выработки, что в силу геометрии выработки способствует увеличению горизонтальных смещений в боках.

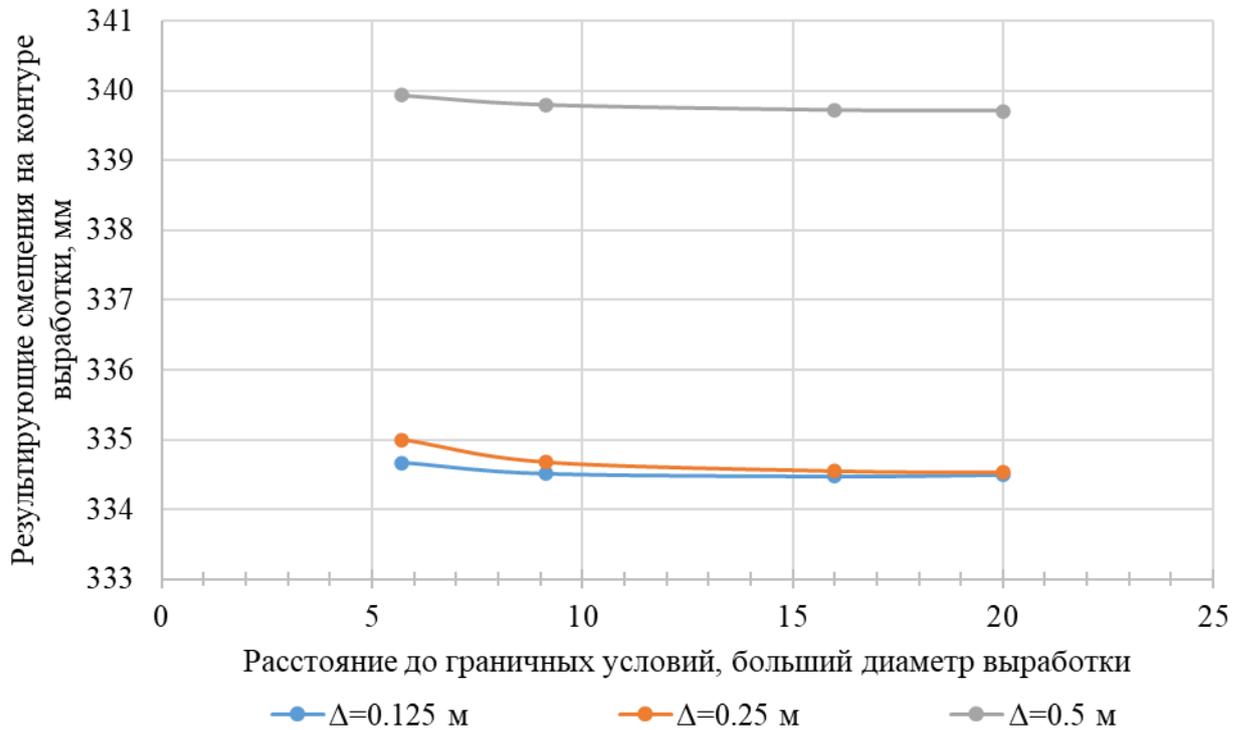


Рисунок 3.17 – Результирующие смещения породного контура в зоне меньшего линейного размера

3.5 Метод прогноза НДС междокамерных целиков, закреплённых податливой тросовой крепью

Автором совместно с научным руководителем разработан и запатентован способ податливого крепления междокамерных целиков в соляных породах, патент РФ № 2788185 [55]. Податливая тросовая крепь устанавливается на междокамерные целики с целью увеличения их несущей способности посредством создания отпора поперечному деформированию целиков. Отпор крепи возникает вследствие натяжения канатов, концы которых продеты через насквозь пробуренные скважины. Канат закреплён таким образом, что на поверхности целика в выработке находится узел податливости, а натяжение каната передаётся на горизонтально установленные с противоположных сторон на поверхности целика арматурные стержни. Описанная конструкция работает как «стяжка» с возможностью определения реакции крепи в податливом режиме работы и величины податливости, а также несущей способности. Предварительное натяжение каната создаётся в процессе крепления узла податливости, она обеспечивает обжатие всех элементов крепи и моментальное включение её в работу. Реакция крепи в податливом режиме работы зависит от регулировки узла податливости. Величина податливости равна длине зажатой петли каната в узле податливости. Несущая способность крепи ограничена несущей способностью каната. На (Рисунок 3.18) представлена конструкция крепи междокамерного целика, на (Рисунок 3.19) отражен ярус крепления.

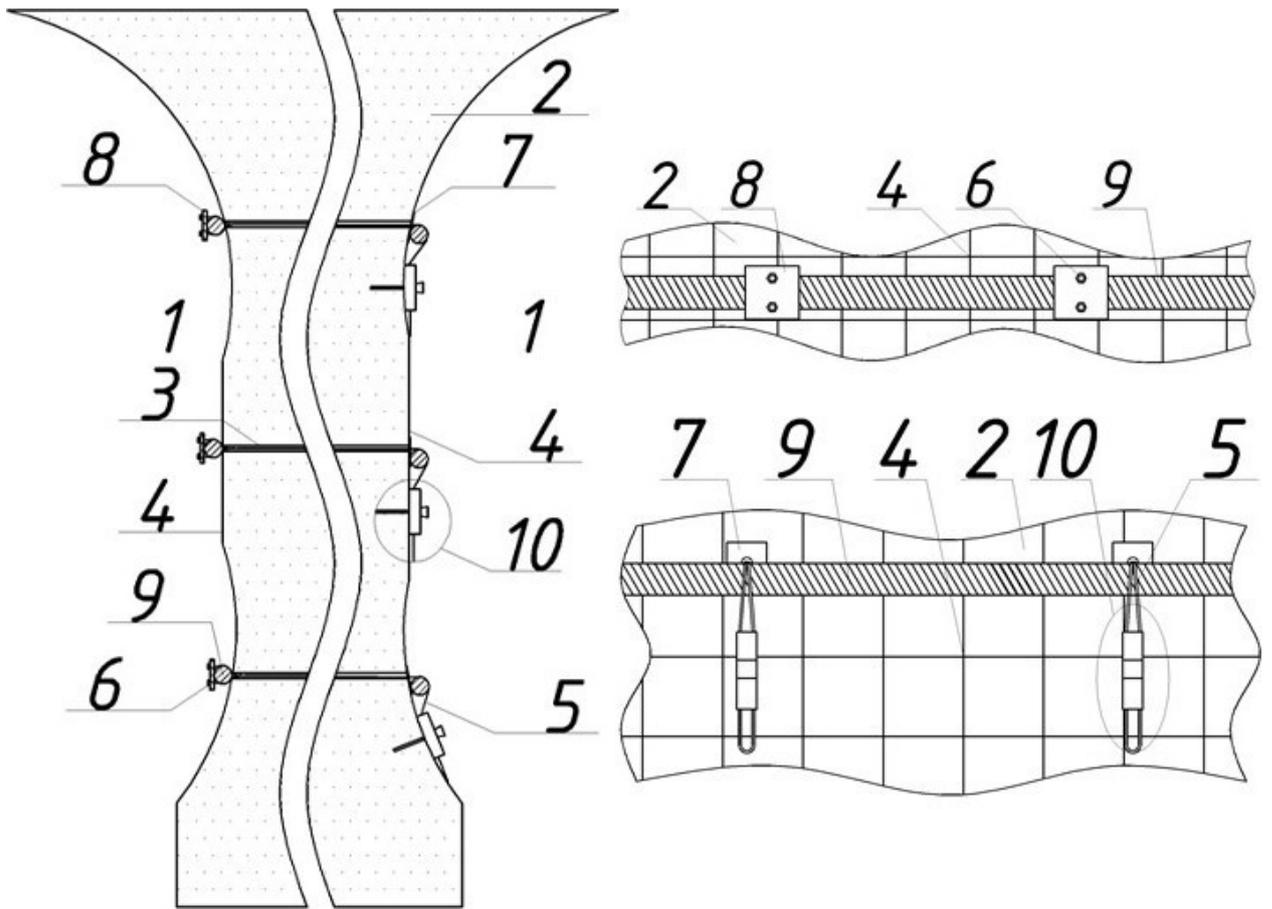


Рисунок 3.18 – Конструкция крепи

1 – очистная камера; 2 – междукамерный целик; 3 – скважина; 4 – арматурная сетка;
 5 – стальной канат; 6 – концы канатов; 7 – опорная плита; 8 – несущая опорная плита;
 9 – арматурный стержень; 10 – узел податливости

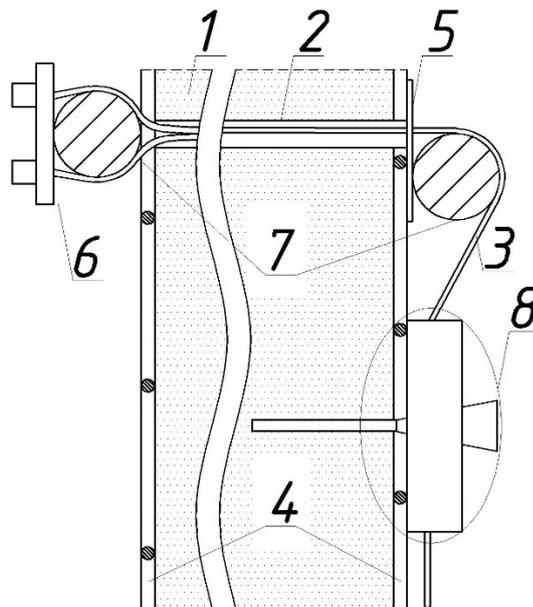


Рисунок 3.19 – Конструкция яруса крепления

1 – целик; 2 – скважина; 3 – стальной канат; 4 – арматурная сетка; 5 – опорная плита;
 6 – несущая опорная плита; 7 – арматурный стержень; 8 – узел податливости

Крепь работает следующим образом [14, 79]. Нагруженные междукамерные целики с течением времени деформируются, расширяясь, что приводит к увеличению натяжения канатов. При достижении заданного усилия происходит реализация податливости крепи посредством проскальзывания каната в узле податливости. По мере исчерпания податливости происходит затухание скорости роста поперечных деформаций и напряжений в целике. После исчерпания податливости нагрузка в полной мере передаётся на канаты – крепь работает жёстко: с увеличением величины натяжения каната увеличивается отпор крепи.

При достижении нагрузки на крепь, превышающей её несущую способность, канаты пластически деформируются и рвутся, что сопровождается исчезновением отпора крепи. Характерный график изменения напряжения в канате и схематическое представление соответствующей деформации закреплённого целика отображено на (Рисунок 3.20). Участок изменения скорости увеличения напряжения в канате указывает на возникновение пластических деформаций. Продолжительность податливого режима работы крепи определяется величиной податливости и скоростью деформации целика при соответствующем отпоре крепи [27, 99]. Прочность стального каната, зависящая от его сечения и свойств стали, в наибольшей степени влияет на длительность жесткого режима работы крепи и ограничивает максимальное значение величины реакции крепи в податливом режиме работы. Выбор максимального диаметра каната ограничивается конструктивными особенностями крепи: продеванием обоих концов каната через скважину, и огибанием петлёй каната арматурного стержня.

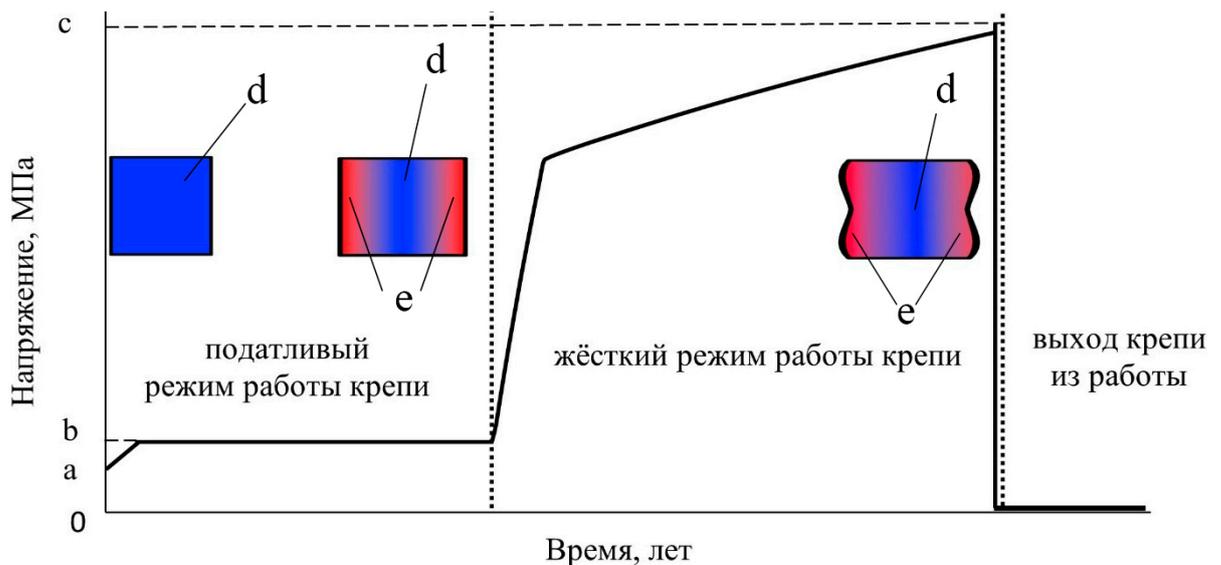


Рисунок 3.20 – Характерный график изменения осевых напряжений в стальном канате
 a – предварительное натяжение; b – реакция крепи в податливом режиме работы;
 c – разрывное усилие каната; d – тёмным обозначены малые смещения;
 e – светлым обозначены большие смещения

Рассмотрим эффективность работы податливой крепи на примере горно-геологических условий разработки пласта АБ в десятой западной панели на руднике СКРУ - 1 на ВКМКС [79]. Прогноз геомеханических процессов, протекающих в междукамерных целиках и в окрестности камер, выполнен в программном комплексе Simulia Abaqus методом конечных элементов. Прогноз осуществлён на срок в 150 лет после проходки камер. Численная модель выполнена в постановке плоской деформации – 2D с дискретизацией рассматриваемой области на четырёхугольные элементы второго порядка.

На (Рисунок 3.21) представлена расчетная схема, отражающая параметры системы разработки. Средняя глубина отработки составляет 366 м. В модели предусмотрено давление вышележащих пород, граничные условия в модели включали ограничение боковых граней расчетной схемы в горизонтальном перемещении, а также ограничение нижней и верхней грани в вертикальных перемещениях.

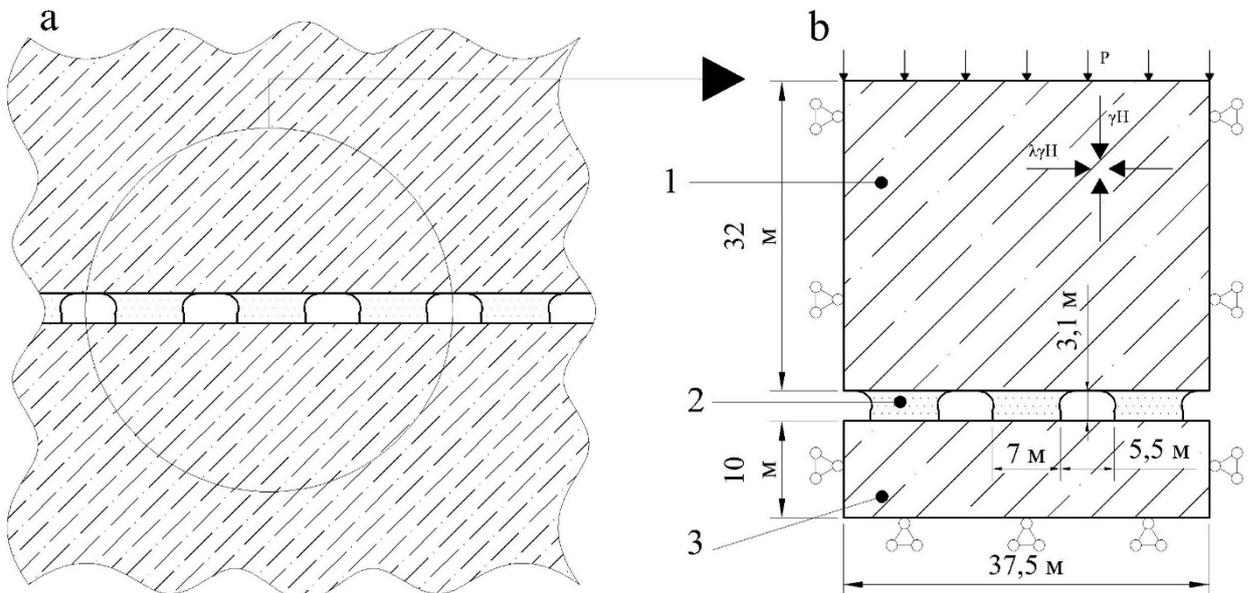
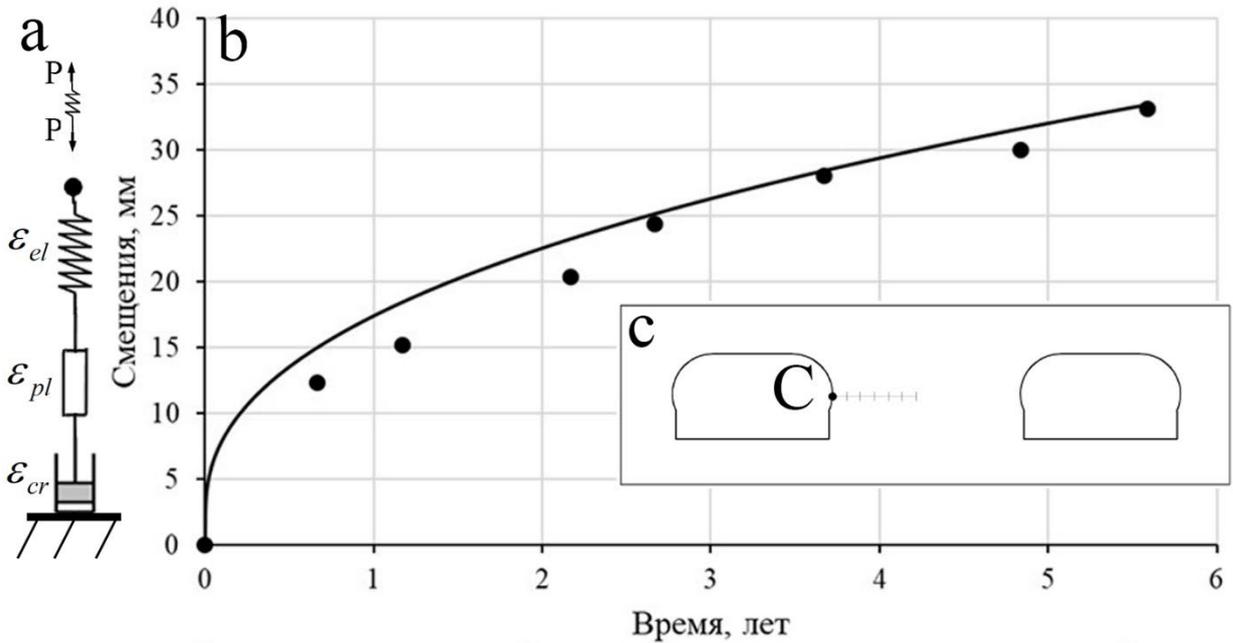


Рисунок 3.21 – Расчетная схема

а – разрез по участку панели, б – моделируемая область; 1 – породы ВЗТ,
2 – междукамерный целик, 3 – породы продуктивной толщи

Для описания поведения соляных пород была использована модель Друкера – Прагера. Подбор параметров модели производился на основе результатов инструментальных наблюдений по пласту АБ в десятой западной панели на руднике СКРУ - 1. На (Рисунок 3.22, б) изображен график горизонтальных смещений поверхности целика в представленной реологической модели и усреднённые по панели результаты инструментальных наблюдений [30].



● Инструментальные наблюдения, усреднённые по панели — Расчет

Рисунок 3.22 – Верификация реологической модели сильвинита

a – схематическое представление реологической модели Друкера – Прагера, ε_{el} , ε_{pl} , ε_{cr} – упругие, пластические и вязкие деформации соответственно, b – горизонтальные смещения боковой поверхности целика, c – схема расположения реперов замерной станции, C – контурный репер

Из (Рисунок 3.22, b) видно, что результаты моделирования показали хорошую сходимость с результатами наблюдений и параметры модели соляных пород корректно отображают длительный характер деформирования междукамерных целиков в рассматриваемых условиях [107, 4]. Мгновенные прочностные и деформационные свойства пород в массиве определяются по результатам лабораторных испытаний, поскольку отсутствует влияние масштабного эффекта. Реологические свойства соляных пород напрямую зависят от длительности воздействия нагрузки, а результаты моделирования подобных свойств – от геометрических размеров модели [60]. Значения ФМС вмещающих пород в модели взяты средними для ВКМКС [38, 5]. Физико-механические свойства пород представлены ниже (Таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Физико-механические свойства пород

Материал	Плотность, кг/м ³	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Угол трения при сдвиге, β , °	Коэффициент текучести, К	Угол дилагансии, ϕ , °	Константы ползучести		
							A	n	m
Сильвинит	2500	200	0,35	40	1	13	$1.9 \cdot 10^{-10}$	1	-0,59
Вмещающие породы	2500	400	0,32	51	-	-	-		

Для сравнительного анализа работы крепи при различных диаметрах канатов и величин реакции крепи в податливом режиме работы рассмотрены четыре варианта канатов диаметром 5.6 мм, 12 мм, 16.5 мм и 22.5 мм согласно ГОСТ 2688-80 и три величины реакции крепи в податливом режиме работы 40 кН, 60 кН и 80 кН для каната диаметром 12 мм и пять – 40 кН, 60 кН, 80 кН, 120 кН и 160 кН для каната диаметром 16.5 мм. Величина реакции крепи для канатов с диаметром 5.6 мм и 22.5 мм будет соответствовать их разрывному натяжению, а именно 19.3 кН и 303.5 кН. Данные варианты приведены для анализа полученных результатов и выявления закономерностей в развитии НДС закреплённых междукамерных целиков. Характеристики элементов крепи, принятые к расчету: канат выполнен из стали марки 50 с пределом текучести 330 МПа; арматурная сетка, выполнена из стали марки А500 с диаметром продольной и поперечной арматуры 16 мм и шагом 200 мм; арматурный стержень диаметром 80 мм, выполненный из стали марки А500.

Анализ результатов численного моделирования

Исходя из результатов прогноза деформаций незакреплённых междукамерных целиков величина смещения их боковой поверхности равна 123 мм за 150 лет (Рисунок 3.23). Величина смещений породного контура целика в период податливого режима принимается равной половине величины смещения незакреплённого целика 62 мм. Продолжительность жёсткого режима работы крепи определяется из расчета.

В (Таблица 3.2) приведены продолжительность работы крепи и оставшееся время прогноза для каждого рассматриваемого варианта. На (Рисунок 3.23) представлены графики изменения горизонтальных смещений боковой поверхности целиков от времени.

Таблица 3.2 – Продолжительность работы крепи

Диаметр каната, мм	Реакция крепи, кН	Срок службы крепи, лет			Оставшееся время, лет
		в податливом режиме	в жёстком режиме	общий	
5.6	19.3	28.3	40.7	69	81
12	40	28.8	48.5	77.3	72.7
12	60	29.6	49.7	79.3	70.7
12	80	30.4	50.5	81.0	69.0
16.5	40	28.8	58.4	87.1	62.9
16.5	60	29.6	59.6	89.2	60.8
16.5	80	30.4	60.8	91.2	58.8
16.5	120	31.6	63.3	94.9	55.1
16.5	160	33.3	65.7	99	51
22.5	303.5	39.0	104.0	143.0	7.0

Относительное увеличение скорости деформирования целика после разрушения податливой крепи отчётливо видно (Рисунок 3.23) в случае с наибольшей реакцией крепи в

податливым режиме работы, что объясняется наименьшими деформациями целика в течении предшествующих этапах прогноза.

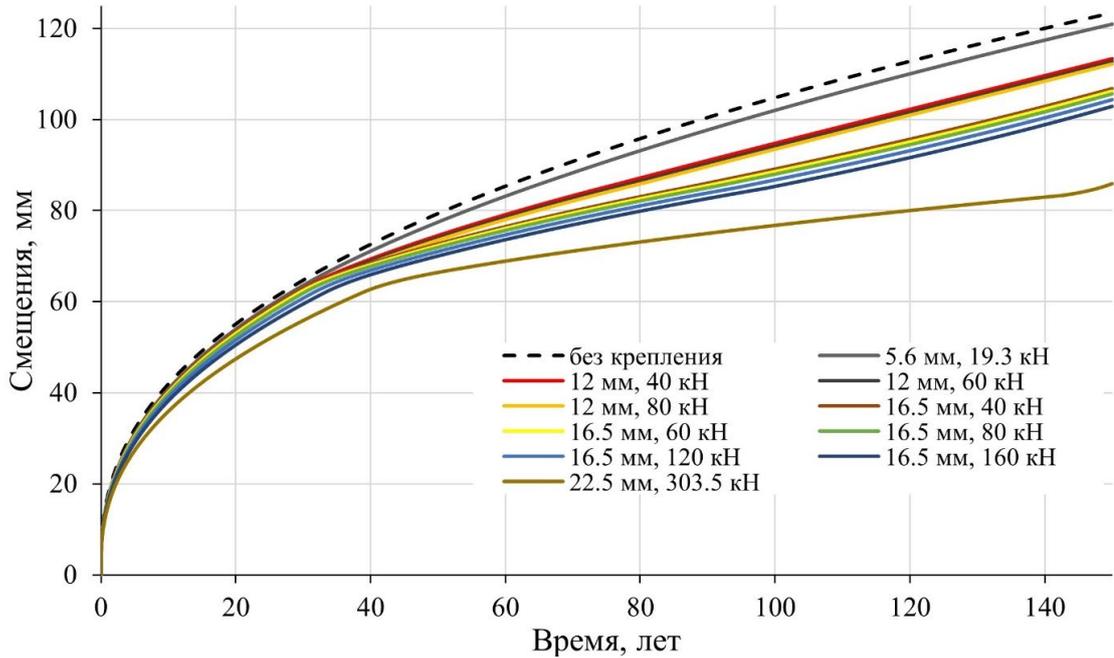


Рисунок 3.23 – Расчетные горизонтальные смещений боковой поверхности целика

На (Рисунок 3.24) приведены расчетные горизонтальные смещения поверхности целиков в заданные промежутки времени, соответствующие максимально допустимым величинам реакций крепи в податливым режиме работы. Они лежат на экспоненциальных аппроксимирующих кривых (3.1), соединив которые, образуется поверхность (Рисунок 3.25).

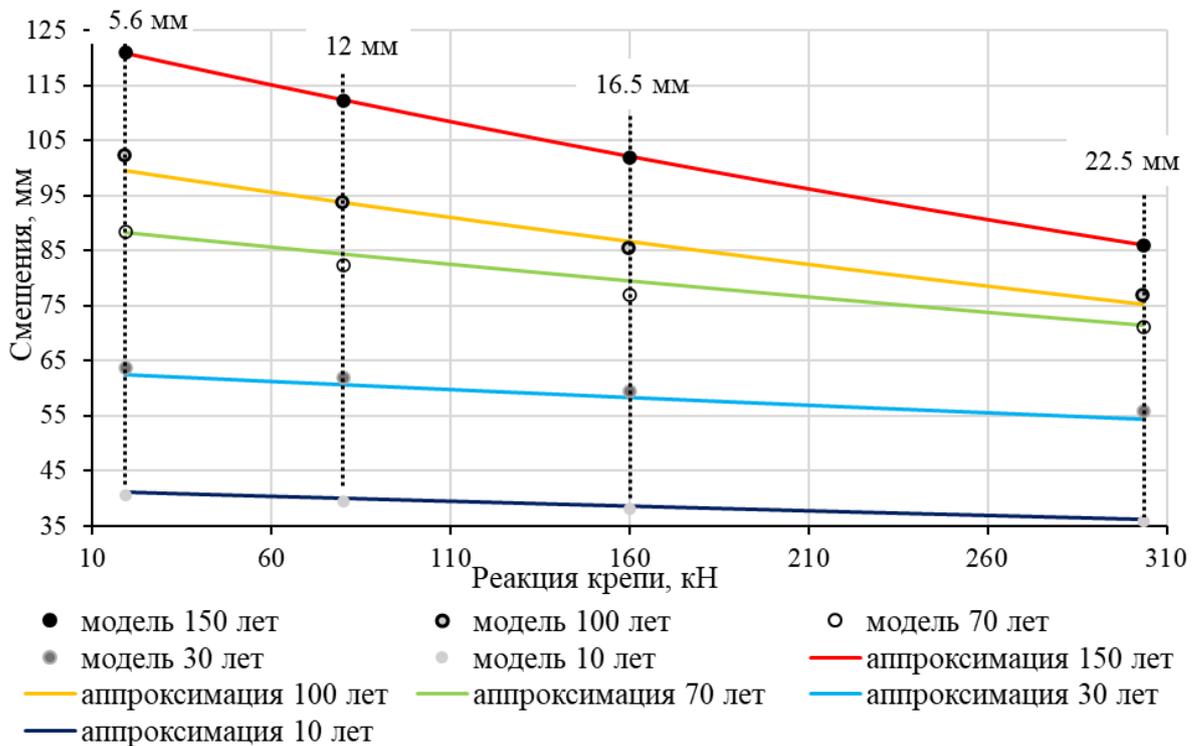


Рисунок 3.24 – Результирующие величины горизонтальных смещений боковой поверхности целика

$$u = A(t) \cdot e^{-C(t) \cdot F} \quad (3.1)$$

где u – горизонтальные смещения боковой поверхности целика на период окончания прогноза, мм; F – предельная реакция крепи для используемого каната, кН; $A(t)$, $C(t)$ – коэффициенты, отражающие время прогноза.

Коэффициенты $A(t)$ и $C(t)$ с достаточной достоверностью аппроксимированы полиномом третьей степени (3.2), (3.3).

$$A(t) = (3.645 \cdot 10^{-5}) \cdot t^3 - 0.011 \cdot t^2 + 1.476 \cdot t + 27.736 \quad (3.2)$$

$$C(t) = (-5.29 \cdot 10^{-10}) \cdot t^3 + (1.27 \cdot 10^{-7}) \cdot t^2 - (2.27 \cdot 10^{-6}) \cdot t + (4.63 \cdot 10^{-4}) \quad (3.3)$$

Подставив уравнения (3.2) и (3.3) в (3.1), получаем уравнение поверхности, характеризующую зависимость горизонтальных смещений боковой поверхности закреплённого целика от времени и реакции крепи в податливом режиме работы (Рисунок 3.25).

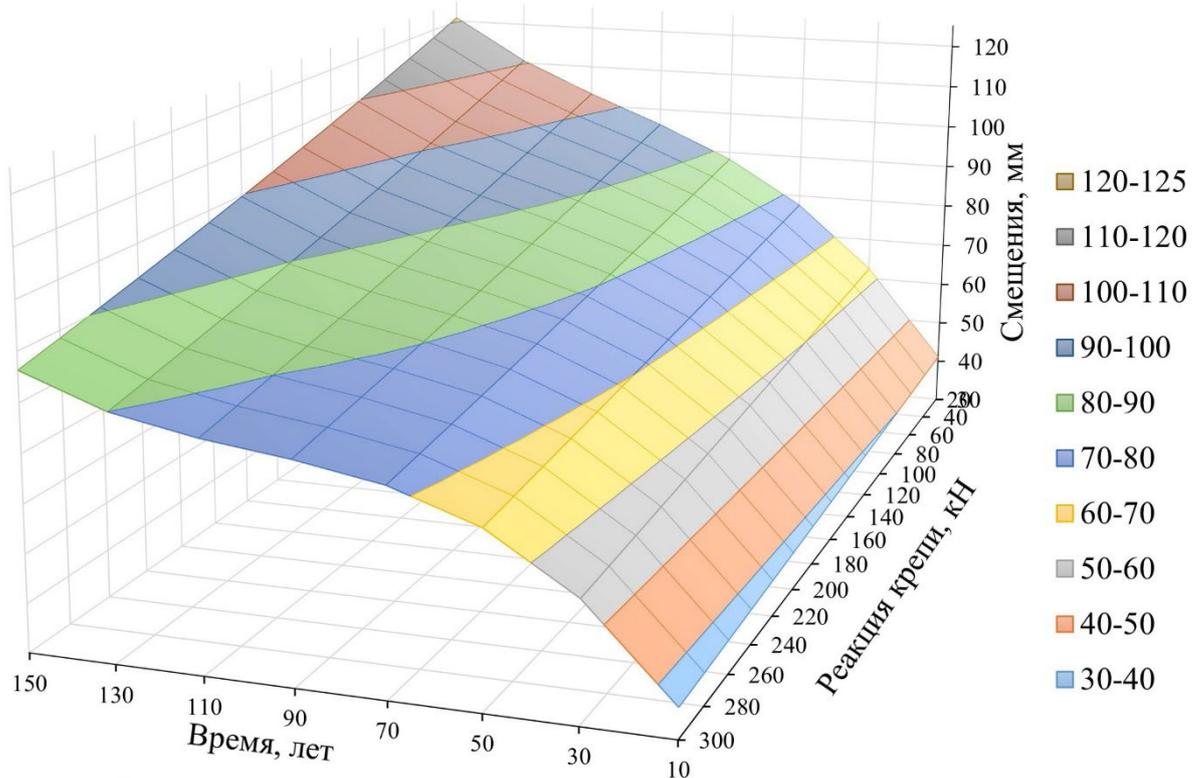


Рисунок 3.25 – Поверхность горизонтальных смещений боковой поверхности закреплённого целика цветом обозначена величина смещения

Увеличение реакции крепи в податливом режиме работы приводит к увеличению длительности податливого и жёсткого режима крепи и, соответственно, к увеличению срока службы крепи. Выбор каната большего сечения приводит к увеличению длительности жёсткого режима крепи. Это объясняется условием жёсткого режима работы крепи. Канат с большим поперечным сечением выдерживает большие нагрузки, вследствие этого

увеличивается как создаваемый отпор крепи, так и длительность его действия. Отпор поперечному деформированию целиков, созданный на начальном этапе срока службы крепи, оказывает влияние на скорости роста поперечных деформаций и напряжений в целике как во время текущего этапа, так и на последующих. Следовательно, наиболее эффективным способом увеличения несущей способности целика будет выбор каната большего сечения и создание максимально допустимой величины реакции крепи в податливом режиме работы.

На (Рисунок 3.26) представлены графики зависимости относительного горизонтального смещения породного контура целика, продолжительности податливого и жёсткого режима работы крепи от диаметра применяемого каната. На графике отражены аппроксимирующие уравнения зависимостей, они имеют достаточно хорошую сходимость с прогнозными данными. Уменьшение относительного горизонтального смещения породного контура целика при выборе каната большего сечения указывает на более эффективную работы крепи, однако на практике величина максимального диаметра каната ограничивается конструктивными особенностями крепи.

Уравнения зависимости продолжительности податливого и жесткого режима работы крепи имеют вид:

$$T = a \cdot e^{c \cdot d} \quad (3.4)$$

где T – продолжительность режима работы крепи, лет; a, c – коэффициенты, отражающие горно-геологические условия; d – диаметр каната, мм.

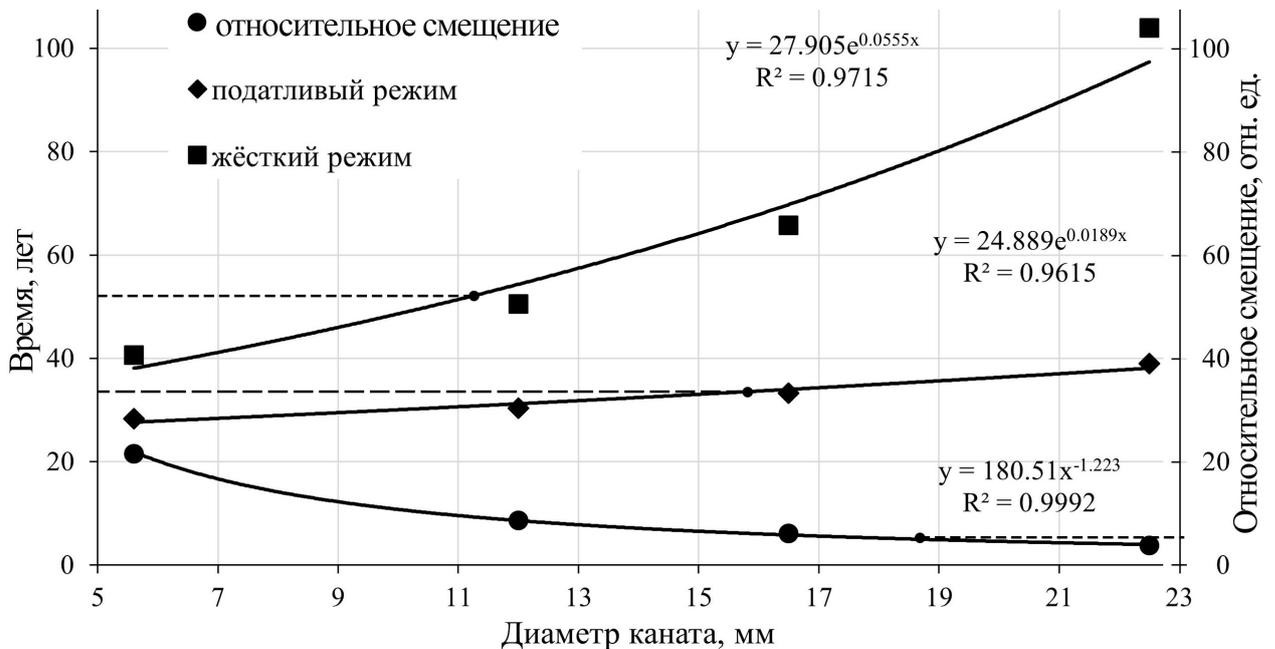


Рисунок 3.26 – Изменение НДС закреплённого МКЦ в зависимости от диаметра используемого каната

Уравнение зависимости относительного горизонтального смещения породного контура закреплённого целика имеет вид:

$$U_{d'} = a \cdot d^c \quad (3.5)$$

где $U_{d'}$ – относительное горизонтальное смещение породного контура, отн. ед.; a, c – коэффициенты, отражающие горно-геологические условия; d – диаметр каната, мм.

Параметры уравнений (3.4) и (3.5) – a и c зависят от степени нагружения МКЦ, марки стали каната, количества применяемых ярусов крепления и реологических свойств соляных пород продуктивного пласта.

3.6 Выводы по III главе

Первое защищаемое положение подтверждается результатами анализа многовариантного моделирования НДС массива в окрестности одиночной горной выработки, пройденной в массиве соляных пород. Выявлены параметры численной модели пород, обеспечивающие корректные результаты прогноза:

- Расстояние от контура выработки до границ модели должно определяться наибольшим линейным размером поперечного сечения выработки и превышать его не менее чем в 16 раз.
- Размер конечного элемента численной модели должен определяться по наименьшему радиусу кривизны поверхности и составлять не более 1/6 от него.
- Конечные элементы, находящиеся на контуре выработки, должны быть структурированы, а их рёбра ориентированы нормально относительно него.
- Сетка конечных элементов в окрестности контура выработки должна состоять из четырех узловых элементов.

Приведённые выше результаты нашли отражение в первом защищаемом положении.

Запатентованный способ податливого крепления междукамерных целиков в соляных породах увеличивает несущую способность целика как во время работы крепи, так и после её разрушения, уменьшая горизонтальные и вертикальные деформации МКЦ, что приводит к уменьшению величины сдвижения земной поверхности и значения её максимального наклона.

В результате сравнительного анализа работы тросовой крепи при различных реакциях крепи в податливом режиме работы и диаметрах каната получены следующие результаты:

- По кривым зависимостям изменения величины горизонтального смещения породного контура от реакции крепи в податливом режиме работы и времени построена

поверхность зависимости, определено её уравнение, параметры и представлено графическое отображение.

- Установлен вид зависимости продолжительности податливого и жёсткого режима работы крепи от диаметра используемого каната и выполнена её аппроксимация в форме показательной функции.

- Установлен вид зависимости относительного горизонтального смещения породного контура закреплённого целика от диаметра каната податливой крепи и выполнена её аппроксимация в форме степенной функции.

Приведённые результаты анализа работы тросовой крепи подтверждают второе защищаемое положение: прогноз НДС междукамерных целиков, закреплённых податливой тросовой крепью, и определение её параметров должны быть основаны на методике, учитывающей применение вязко-упруго-пластической модели деформирования соляных пород, степень нагружения целиков, величину реакции крепи в податливом режиме работы, пластическую деформацию троса в жестком режиме работы крепи и выявленную степенную зависимость относительного горизонтального смещения породного контура от диаметра тросовой крепи.

ГЛАВА 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТОДИКИ МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД, ПОДРАБАТЫВАЕМОЙ ВОДОЗАЩИТНОЙ ТОЛЩИ

В предыдущей главе разработаны методики численного моделирования НДС массива соляных пород и МКЦ, закреплённых податливой тросовой крепью. Учитывая результаты прогноза НДС МКЦ, представляется возможным разработать методику прогноза формирования и развития водопроводящих трещин в подрабатываемой толще.

В данной главе приводится метод прогноза НДС ВЗТ с учетом реологических свойств продуктивной толщи. В исследовании рассматриваются горно-геологические условия разработки Палашерского участка ВКМКС, а именно 3 и 4 западные блоки, 2 юго-западная панель. Выполняется оценка эффективности податливой крепи по увеличению несущей способности МКЦ. На основе анализа полученных результатов выводятся закономерности возникновения трещин и развития гидравлически связанной их системы.

4.1 Метод исследования

Прогноз геомеханических процессов в массиве пород ВЗТ и соляных породах продуктивного пласта основаны на модели хрупкого разрушения CDP и модифицированной вязко-упруго-пластической модели деформирования с условием пластичности Друкера-Прагера соответственно. В модели CDP применяется явный решатель, а в реологической – неявный, что обуславливает последующее использование двух численных моделей. Результаты прогноза НДС МКЦ, полученные при использовании неявного решателя, отражаются в численной модели ВЗТ с явным решателем в виде вертикальных смещений уровня её подошвы за интересующий временной период. Участок, вдоль которого переносятся вертикальные смещения, является кровля пласта АБ.

Таким образом, представляется возможность поэтапно переносить вертикальные смещения МКЦ вдоль отработанной панели, разделив период прогноза НДС ВЗТ на составляющие временные промежутки – этапы. Описанный метод позволяет увеличить точность прогноза путем уменьшения продолжительности этапа.

В модели породы, слагающие ВЗТ, имеют изотропные физико-механические свойства в соответствии с параметрами модели CDP. Слой четвертичных отложений (Q) задан в модели как ортотропный материал таким образом, что жесткость в горизонтальном направлении отсутствует, в вертикальном направлении – свойства упругой модели деформирования материала в соответствии с модулем упругости и коэффициентом Пуассона, определёнными по результатам лабораторных испытаний. Данный подход позволяет сосредоточить горизонтальные напряжения в породах ВЗТ и исключить влияние

упругого слоя на результаты расчета. Параметры модели деформирования слоя четвертичных отложения определены матрицей упругой жесткости (4.1):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{1111} & D_{1122} & D_{1133} & 0 & 0 & 0 \\ & D_{2222} & D_{2233} & 0 & 0 & 0 \\ & & D_{3333} & 0 & 0 & 0 \\ & & & D_{1212} & 0 & 0 \\ & sym & & & D_{1313} & 0 \\ & & & & & D_{2323} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{Bmatrix} = [D^{el}] \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{23} \end{Bmatrix}, \quad (4.1)$$

где σ – нормальные напряжения; D – упругая жесткость материала; ε – относительная деформация.

Значения параметров матрицы упругой жесткости определяются следующими выражениями (4.2):

$$\begin{aligned} D_{1111} &= E_1(1 - \nu_{23}\nu_{32})\Upsilon, \\ D_{2222} &= E_2(1 - \nu_{13}\nu_{31})\Upsilon, \\ D_{3333} &= E_3(1 - \nu_{21}\nu_{12})\Upsilon, \\ D_{1122} &= E_1(\nu_{21} - \nu_{31}\nu_{23})\Upsilon = E_2(\nu_{12} - \nu_{32}\nu_{13})\Upsilon, \\ D_{1133} &= E_1(\nu_{31} - \nu_{21}\nu_{32})\Upsilon = E_3(\nu_{13} - \nu_{12}\nu_{23})\Upsilon, \\ D_{2233} &= E_2(\nu_{32} - \nu_{12}\nu_{31})\Upsilon = E_3(\nu_{23} - \nu_{21}\nu_{13})\Upsilon, \\ D_{1212} &= G_{12}, \\ D_{1313} &= G_{13}, \\ D_{2323} &= G_{23}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

где E – модуль упругости материала; ν – коэффициент Пуассона; G – модуль сдвига; Υ – коэффициент, являющийся общим множителем в уравнениях расчета параметров матрицы упругой жесткости, определяемый из уравнения (4.3):

$$\Upsilon = \frac{1}{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}, \quad (4.3)$$

Рассмотрим работу податливой крепи в описанных ранее (II Глава) горно-геологических условиях разработки пласта КрII на Палашерском участке ВКМКС. Прогноз НДС МКЦ выполнен на основе численного моделирования в программном комплексе Simulia Abaqus методом конечных элементов. Прогноз осуществлялся на срок в 150 лет после проходки камер. Численная модель выполнена в постановке плоской деформации – 2D с дискретизацией рассматриваемой области на четырёхугольные элементы. Параметры реологической модели продуктивного паста и модели хрупкого разрушения пород ВЗТ обоснованы во II Главе. На (Рисунок 4.1) представлена расчетная схема, отражающая параметры системы разработки, для определения полумульды сдвижения земной поверхности.

В работе рассматривается 3-х ярусное крепление МКЦ ввиду их высоты – 5,7 м (Рисунок 2.23). Характеристики элементов крепи, принятой к расчету: канат выполнен из стали марки 50 с пределом текучести 330 Мпа, диаметр каната 22.5 мм согласно ГОСТ 2688-80; арматурная сетка, выполнена из стали марки А500 с диаметром продольной и поперечной арматуры 16 мм и шагом 200 мм; арматурный стержень диаметром 80 мм, выполненный из стали марки А500. Величина реакции крепи соответствует разрывному натяжению каната, а именно 303.5 кН [79].

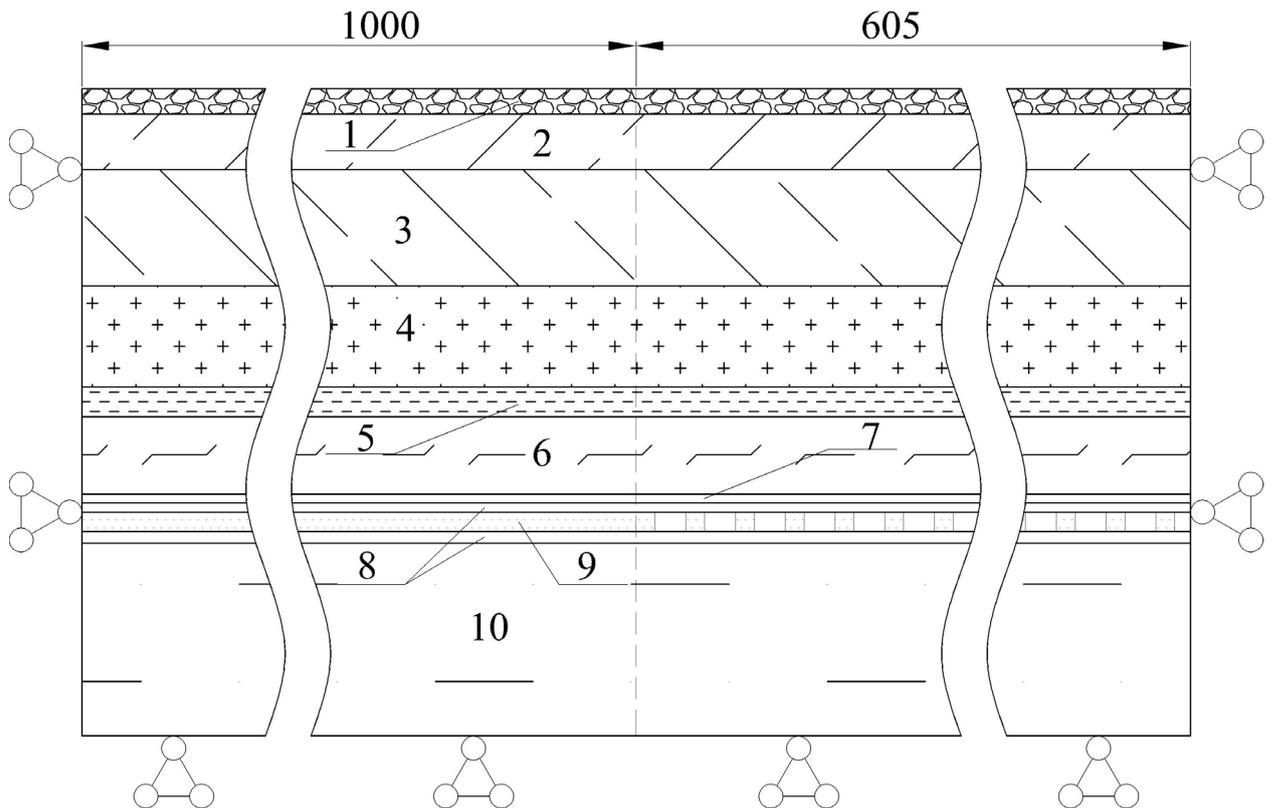


Рисунок 4.1 – Расчетная схема для прогноза вертикальных смещений уровня подошвы ВЗТ

1 – четвертичные отложения; 2 - 8 – характерные толщи ВЗТ; 9 – пласт КрII;
10 – подстилающая каменная соль.

4.2 Анализ увеличения несущей способности МКЦ

Исходя из результатов прогноза деформаций незакреплённых МКЦ, расположенных в центральной части мульды сдвижения земной поверхности, величина смещения их боковой поверхности равна 770 мм за 150 лет (Рисунок 4.2). Продолжительность работы крепи в режиме податливости принята равной 70 лет, что обеспечивает величину горизонтальных смещений боковой поверхности МКЦ равной 397 мм. Продолжительность жёсткого режима работы крепи определяется из расчета её НДС, и составляет 44,7 лет. В течении оставшегося времени прогноза – 35,3 года на МКЦ не оказывается воздействия со стороны крепи, поскольку она к окончанию периода жесткого режима работы вышла из

работы. На (Рисунок 4.3) представлены графики вертикальных деформаций МКЦ, расположенных в центральной части панели, от времени.

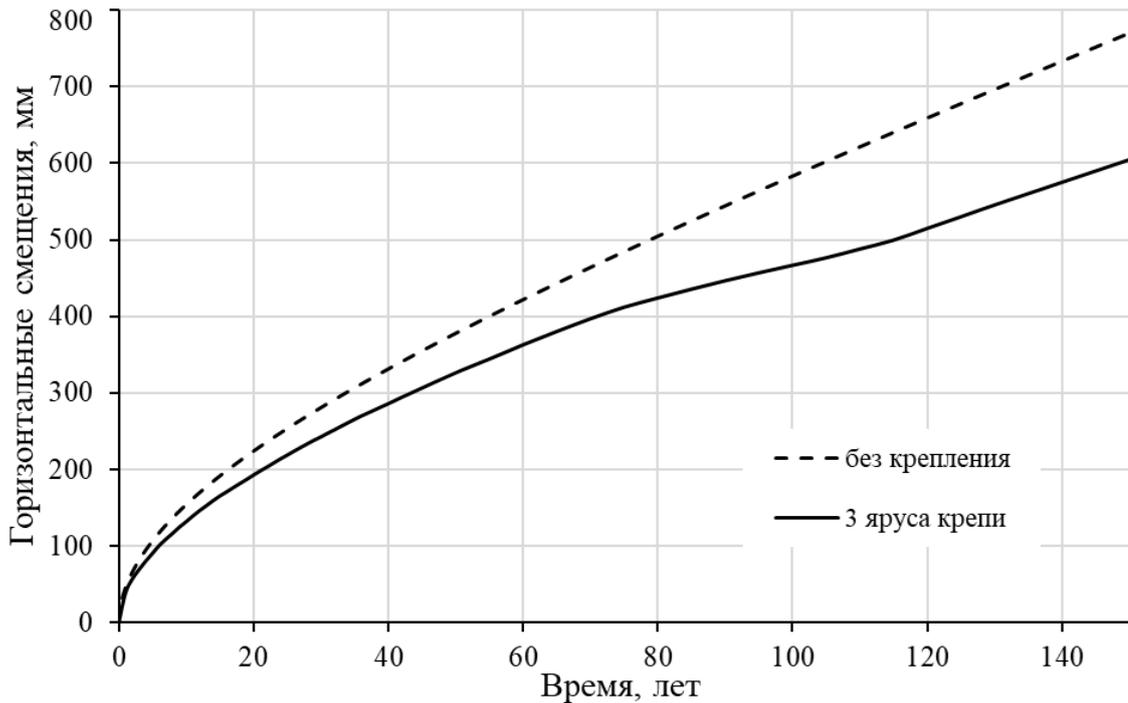


Рисунок 4.2 – Расчетные горизонтальные смещения боковой поверхности целиков в центральной части панели

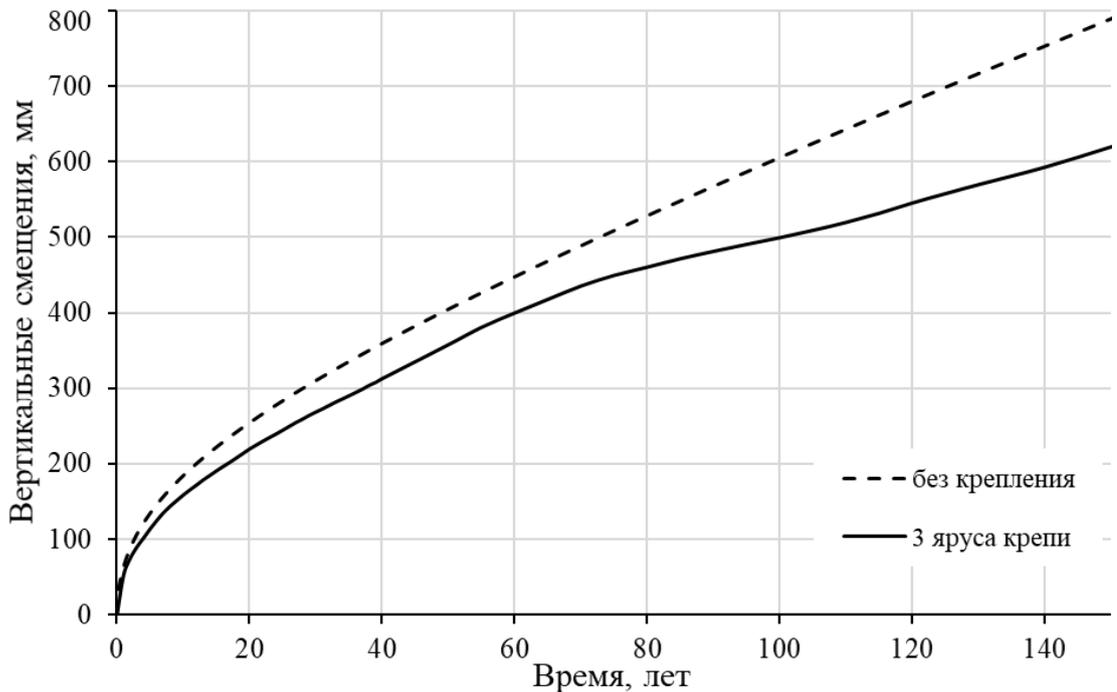


Рисунок 4.3 – Расчетные вертикальные смещения целиков в центральной части панели

Рассмотрим развитие полумульды вертикальных смещений по подошве ВЗТ (кровле пласта А-Б) с течением времени при отсутствии крепления и с его использованием, (Рисунок 4.4 и Рисунок 4.5), соответственно.

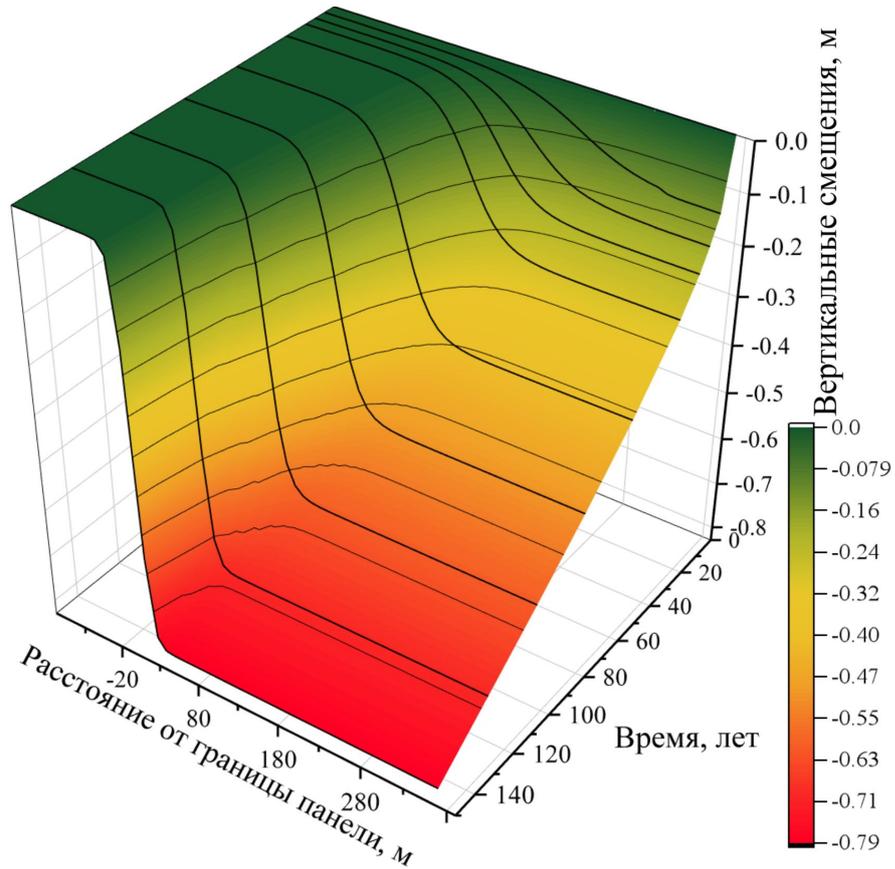


Рисунок 4.4 – Поверхность развития вертикальных смещений по подошве ВЗТ, без крепления МКЦ

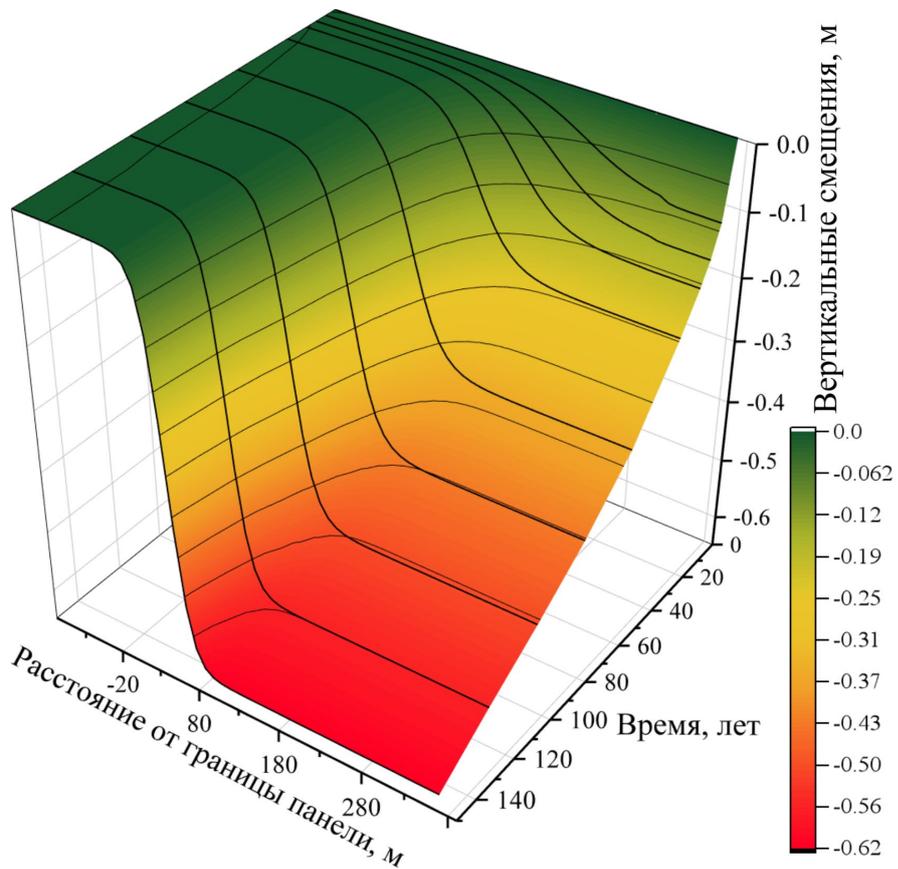


Рисунок 4.5 – Поверхность развития вертикальных смещений по подошве ВЗТ, податливое крепление МКЦ

4.3 Анализ результатов прогноза НДС ВЗТ

Рассмотрим влияние податливого крепления на оседания земной поверхности. Особое внимание необходимо уделить нескольким ключевых параметрам. Основным таковым является полумульда оседаний (Рисунок 4.6, а) показывает форму и глубину оседания, что позволяет понять, как податливое крепление изменяет геометрию оседаний. Во-вторых, её наклон (Рисунок 4.6, б) указывает на степень изменения угла поверхности, что критически важно для оценки стабильности склонов и сооружений на поверхности. Далее, поверхности развития оседаний земной поверхности без применения податливого крепления (Рисунок 4.6, с) и с его использованием (Рисунок 4.6, д) показывают различия в деформациях подработанного массива. Без податливого крепления оседания могут быть более резкими и неравномерными, что увеличивает риски разрушений. С применением податливого крепления оседания становятся более контролируруемыми и равномерными, что помогает снизить риск возникновения трещин в ВЗТ и деформаций и повреждений сооружений на поверхности.

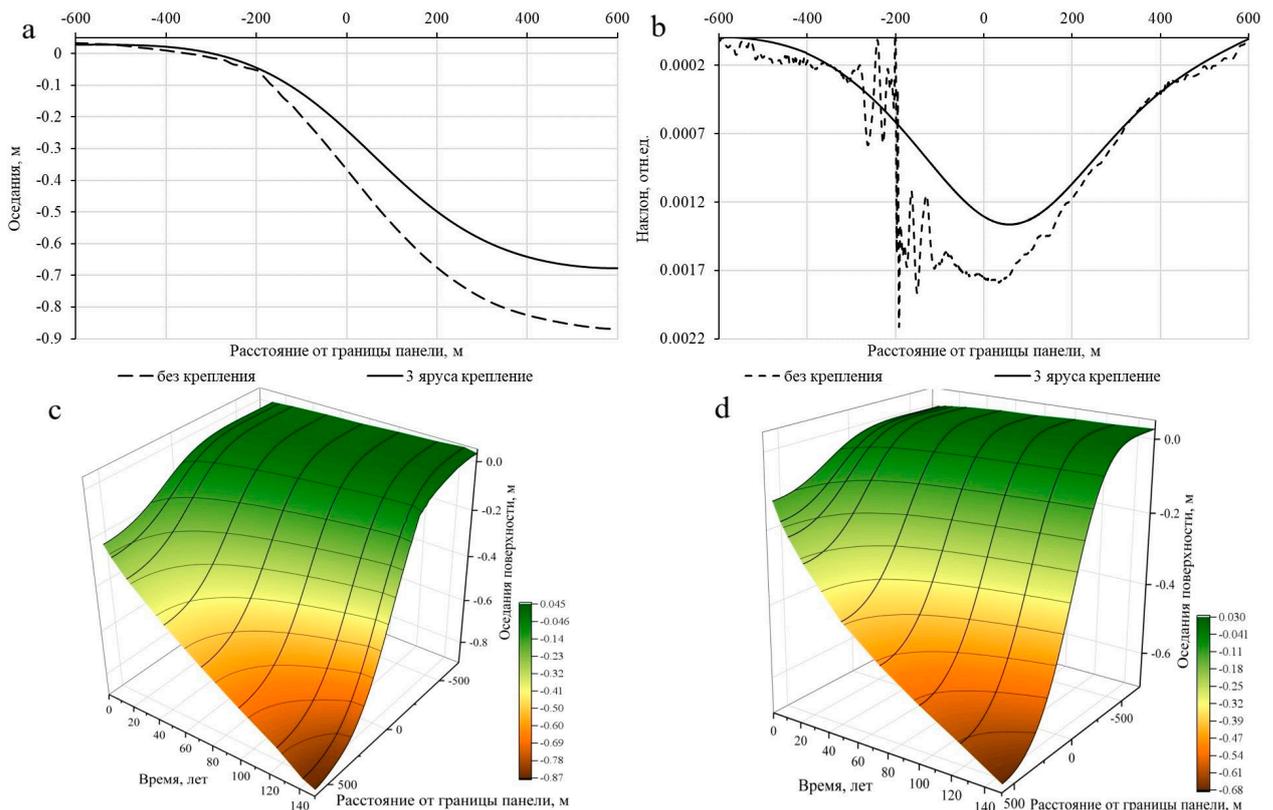


Рисунок 4.6 – Влияние податливого крепления на развитие оседаний земной поверхности
 а – полумульда оседаний земной поверхности; б – наклон земной поверхности;
 с – поверхность развития оседаний земной поверхности, без крепи;
 д – поверхность развития оседаний земной поверхности, 3 яруса крепления

В результате применения приведенной конфигурации податливой тросовой крепи, состоящей из 3-х ярусов, сдвигание земной поверхности и значение её максимального наклона уменьшилось на 22 % и 35.1 %, соответственно. На графиках и поверхности

(Рисунок 4.6, а, b, с) видна образовавшаяся спустя 142 года после окончания проходки трещина на расстоянии в 196 м. от границы панели. Относительно земной поверхности трещина возникает на расстоянии в 217 м от середины участка с максимальным её наклоном в 0.00177, при значениях оседаний 0.77 м. Трещина имеет гидравлическую связь с грунтовыми водами, поскольку пересекает водоносный горизонт, Пестроцветную толщу (ПЦТ) и заканчивается в Терригенно-карбонатной толще (ТКТ), (Рисунок 4.7). Состояние ВЗТ в зоне её деформируемой подошвы отражено на (Рисунок 4.8). В случае с использованием податливой крепи трещин в модели ВЗТ за период прогноза не возникает.

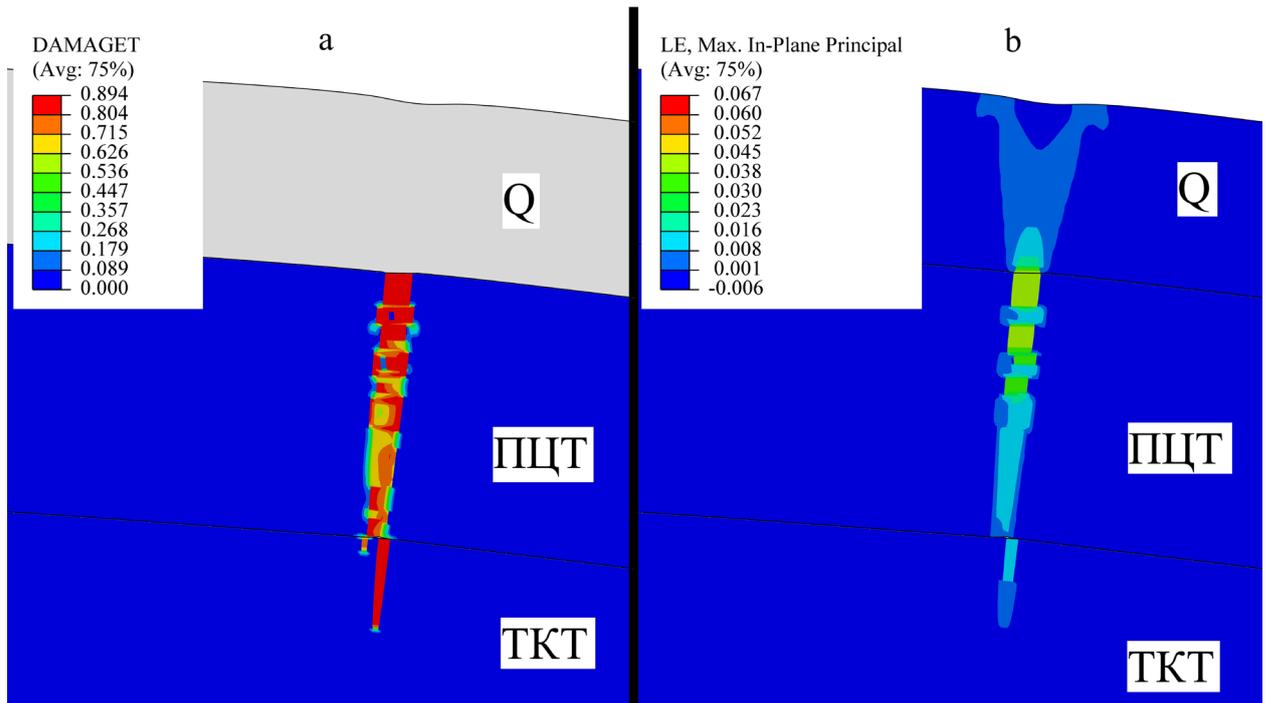


Рисунок 4.7 – Образование трещины по кровле ВЗТ на период 142 года (масштаб деформаций 100:1); а – показатель повреждённости материала, б – максимальные относительные деформации

Рассмотрим деформации ВЗТ по окончании прогноза в случае использования податливой крепи, (Рисунок 4.9). Величина относительной деформации не превышает 0.004, а раскрытие контактов толщ достигают максимальных значений в 0.00119 м в окрестности границы отработанной панели. Результаты указывают на эффективность податливого крепления в качестве меры по сохранению целостности ВЗТ.

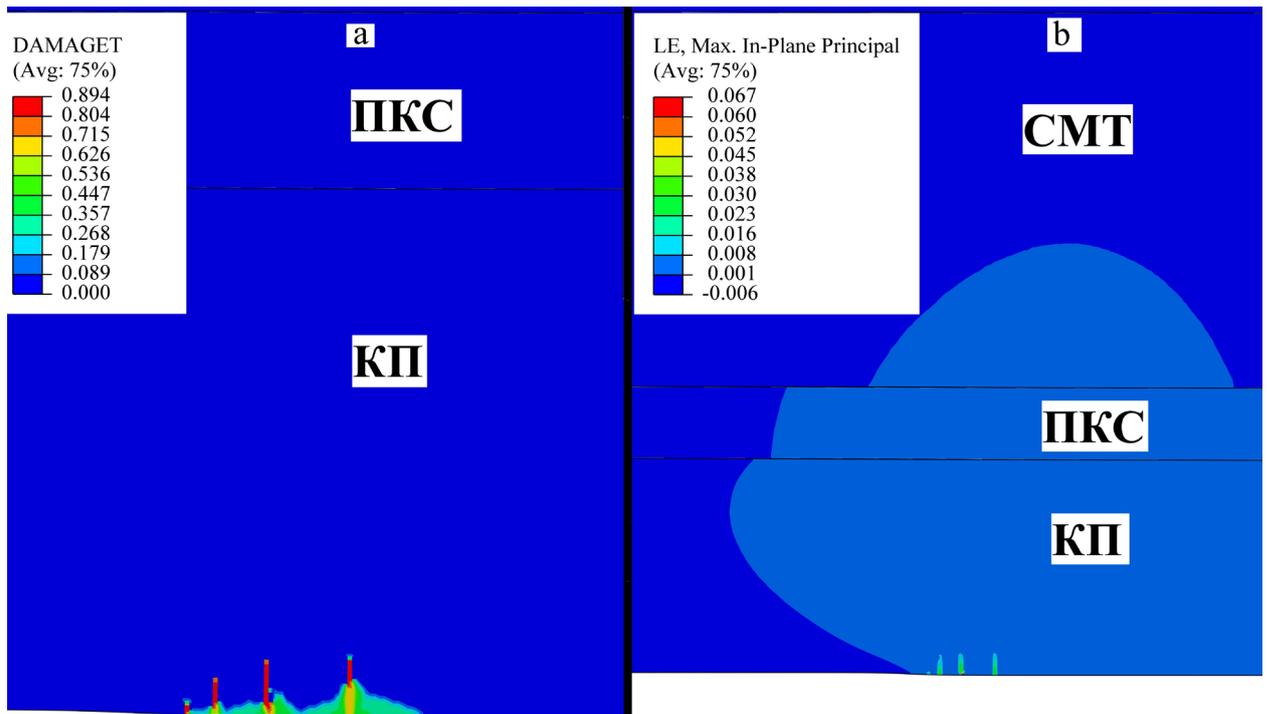


Рисунок 4.8 – Образование разрушенной зоны по подошве ВЗТ на период 142 года
 а – показатель повреждённости материала, б – максимальные относительные деформации

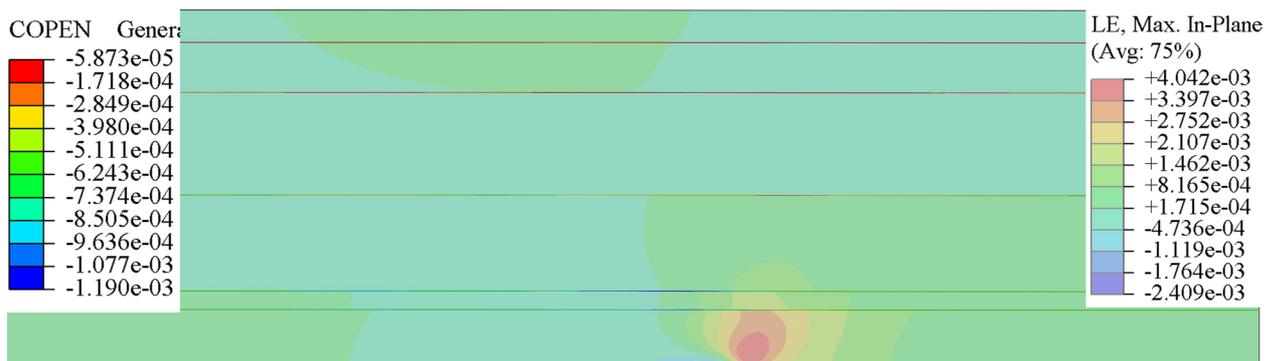


Рисунок 4.9 – Деформация ВЗТ и раскрытие контактов толщ

Развитие трещин в ВЗТ по прошествию 150 лет после отработки панели представлено на (Рисунок 4.10). Значительные изменения произошли в развитии трещины по кровле ВЗТ - глубина распространения увеличилась до 138 м, остановившись в толще ТКТ, а раскрытие контактов толщ не превышает 0.00121 м.

Согласно «Указаниям...» [35] величина максимальных оседаний поверхности при рассматриваемой системе отработки составляет 1.95 м. Состояние ВЗТ при данных величинах оседаний представлено на (Рисунок 4.11), 1. Несмотря на значительные размеры разрушенной зоны в пластах Карналлитовой пачки (КП) и Покровной каменной соли (ПКС), а также трещин во всех вышележащих толщах система гидравлически связанных трещин в ВЗТ не формируется. Величина раскрытия контактов между толщами достигает максимальных значений в 0.004 м. окрестности трещин. При оседаниях поверхности в 1.96

м образуется система трещин протяженностью от кровли Соляно-мергельной толщи (СМТ) до продуктивного пласта, (Рисунок 4.11, 2).

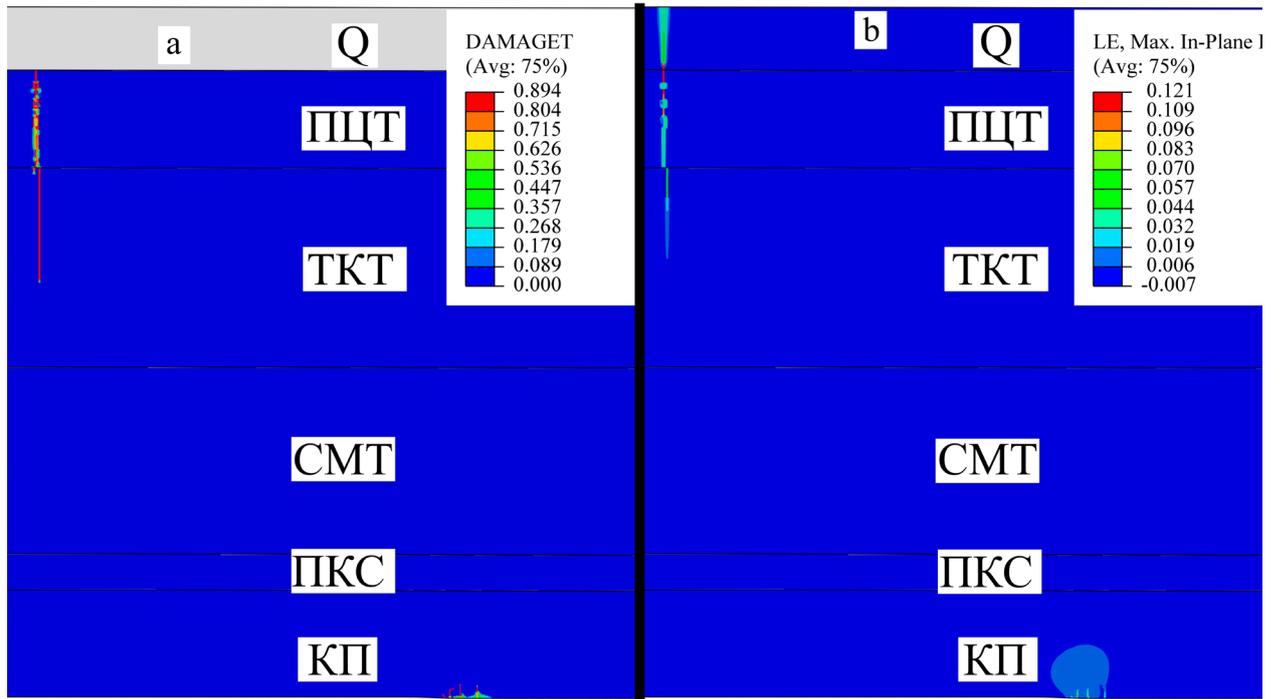


Рисунок 4.10 – Развитие трещин в ВЗТ на период 150 при отсутствии податливого крепления МКЦ

а – показатель повреждённости материала, б – максимальные относительные деформации

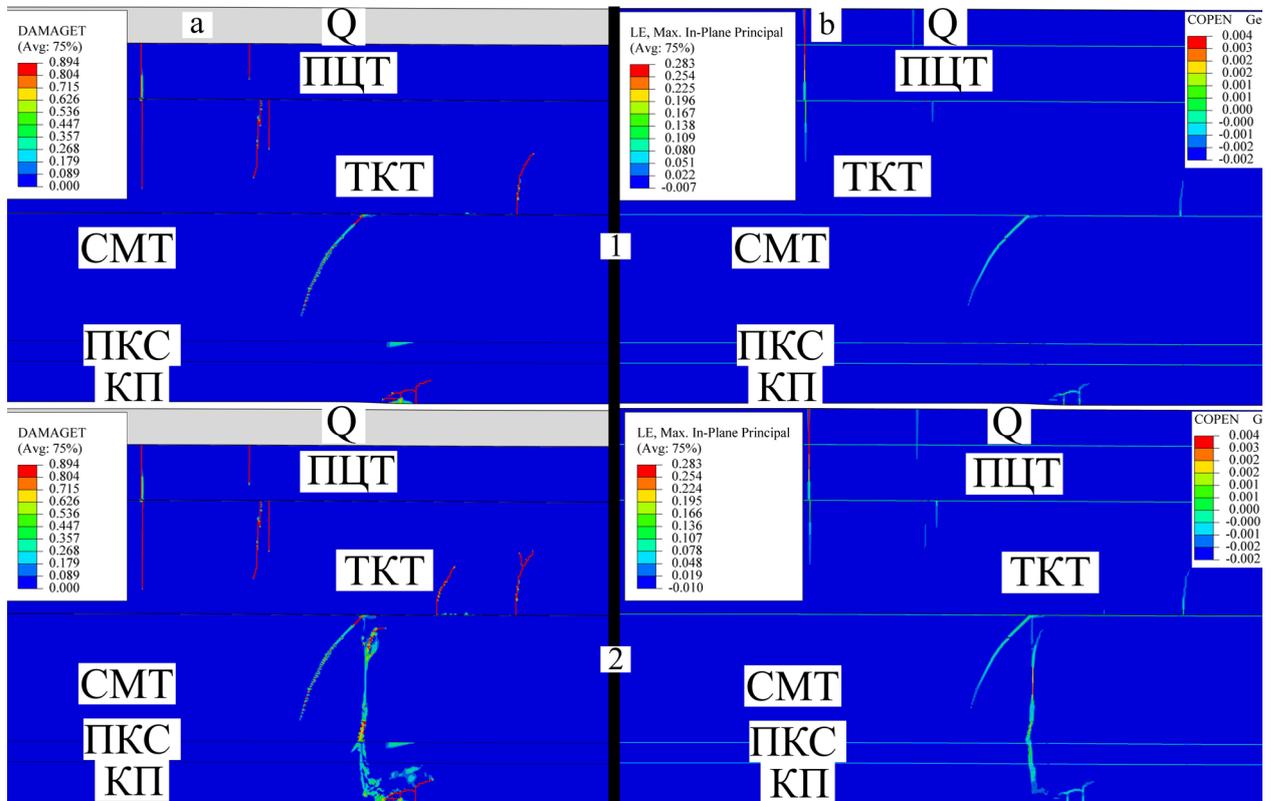


Рисунок 4.11 – Развитие трещин в ВЗТ

1 – при максимальных оседаниях рассматриваемой системы разработки;

2 – развитие трещин, проходящих сквозь толщу СМТ;

а – показатель повреждённости материала, б – максимальные относительные деформации

Гидравлически связанная система трещин в ВЗТ образуется при достижении оседаний в 3.6 м и максимального наклона поверхности в 0.0126, (Рисунок 4.12). Из результатов видно, что гидравлическая связь системы трещин с грунтовыми водами осуществляется через первичную трещину по кровле ВЗТ, что определяет практическую значимость в прогнозе её возникновения.

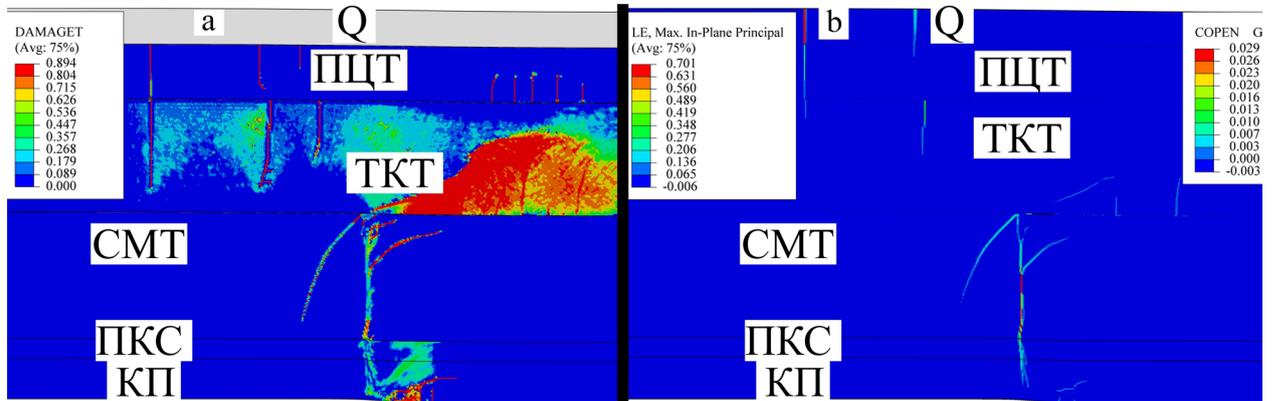
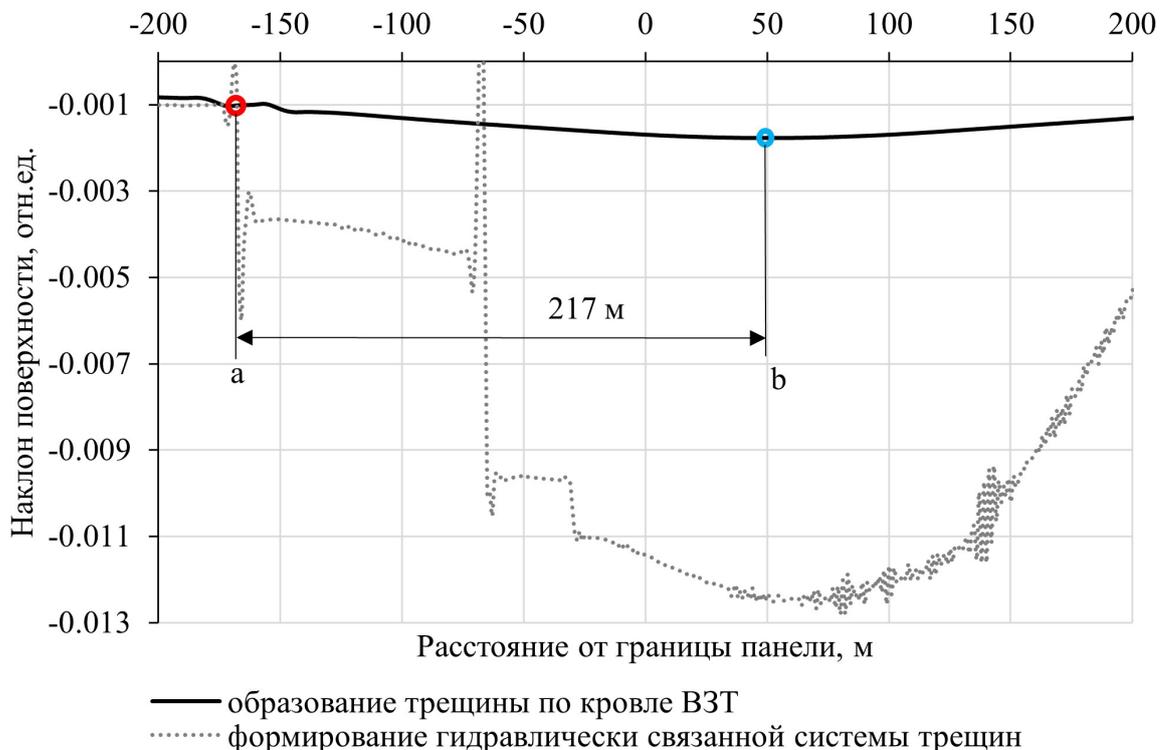


Рисунок 4.12 – Образование гидравлически связанной системы трещин в ВЗТ
 а – показатель повреждённости материала, б – максимальные относительные деформации

На (Рисунок 4.13) схематично отражена первичная трещина по кровле ВЗТ и наклон земной поверхности, при которой она образуется, а также наклон земной поверхности, при котором возникает гидравлически связанная система трещин.



— образование трещины по кровле ВЗТ
 формирование гидравлически связанной системы трещин
 Рисунок 4.13 – Наклоны земной поверхности, отражающие основные этапы формирования трещин в ВЗТ
 а – первичная трещина; б – середина участка с максимальным наклоном

Рассмотрим изменения главных напряжений в окрестности трещины в толщах СМТ и ПКС в процессе её развития и увеличения оседаний земной поверхности (Рисунок 4.14 и Рисунок 4.15). Процесс возникновения трещины наглядно отражается в резком изменении величин относительных деформаций растяжения и сжатия. Из полученных данных видно, что главные растягивающие напряжения увеличиваются, в то время как главные сжимающие напряжения снижаются до момента появления трещины на наблюдаемом участке.

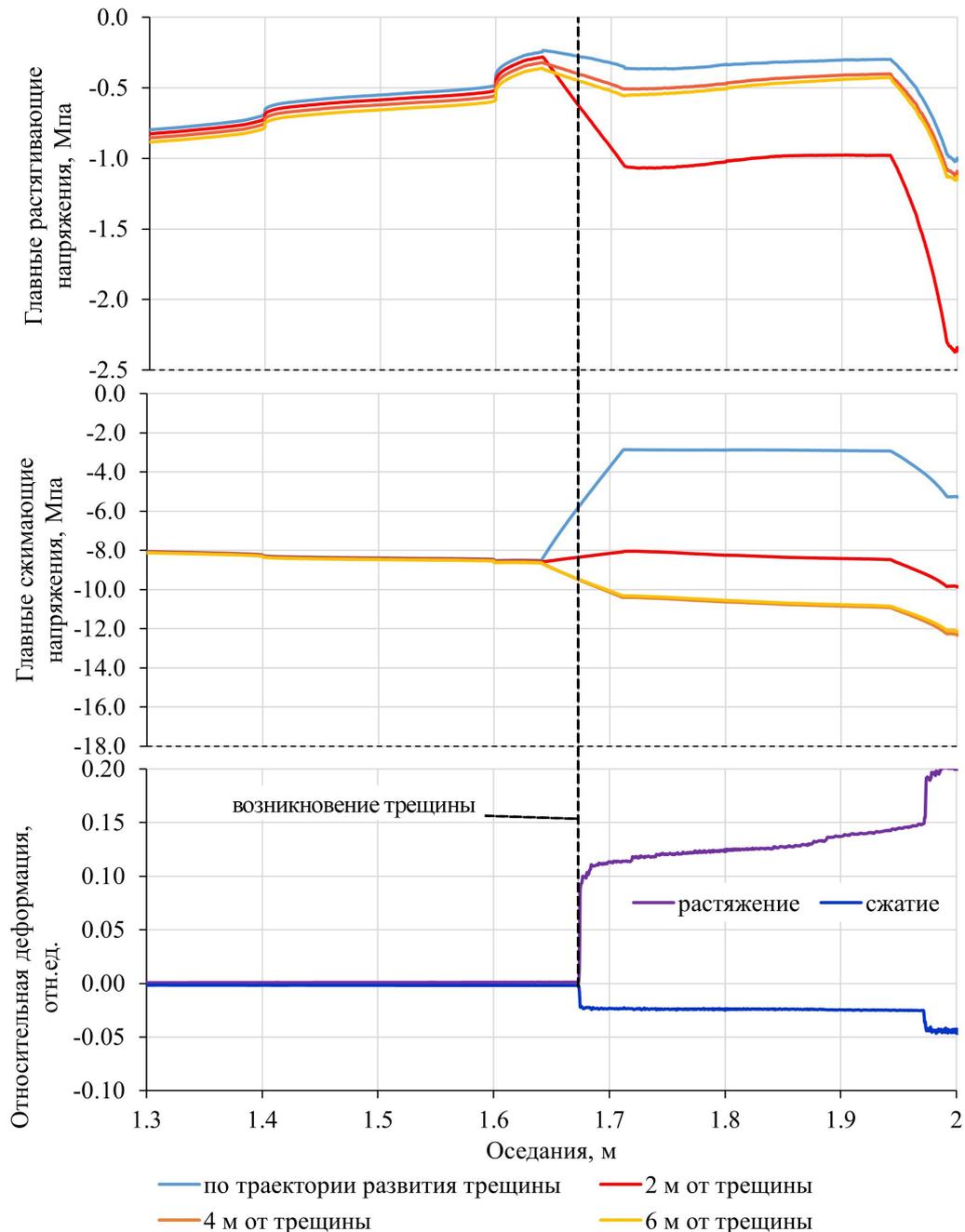


Рисунок 4.14 – Изменение главных растягивающих и сжимающих напряжений в окрестности при развитии трещины, СМТ

Появление трещины вызывает резкое увеличение главных сжимающих напряжений в её окрестности. Это связано с перераспределением напряжений вокруг новой трещины,

что усиливает локальное сжатие в непосредственной близости от неё. По характеру изменения главных напряжений можно выделить зону влияния трещины в характерных толщах ВЗТ, которая распространяется на 4 метра от трещины.

Эти наблюдения помогают понять механизмы развития трещин и их влияние на напряженно-деформированное состояние горных пород. Анализ изменений главных напряжений в окрестности трещины позволяет разработать более эффективные методы управления трещинообразованием и предотвращения разрушений в горных породах подработанной толщи, что особенно важно для обеспечения целостности ВЗТ.

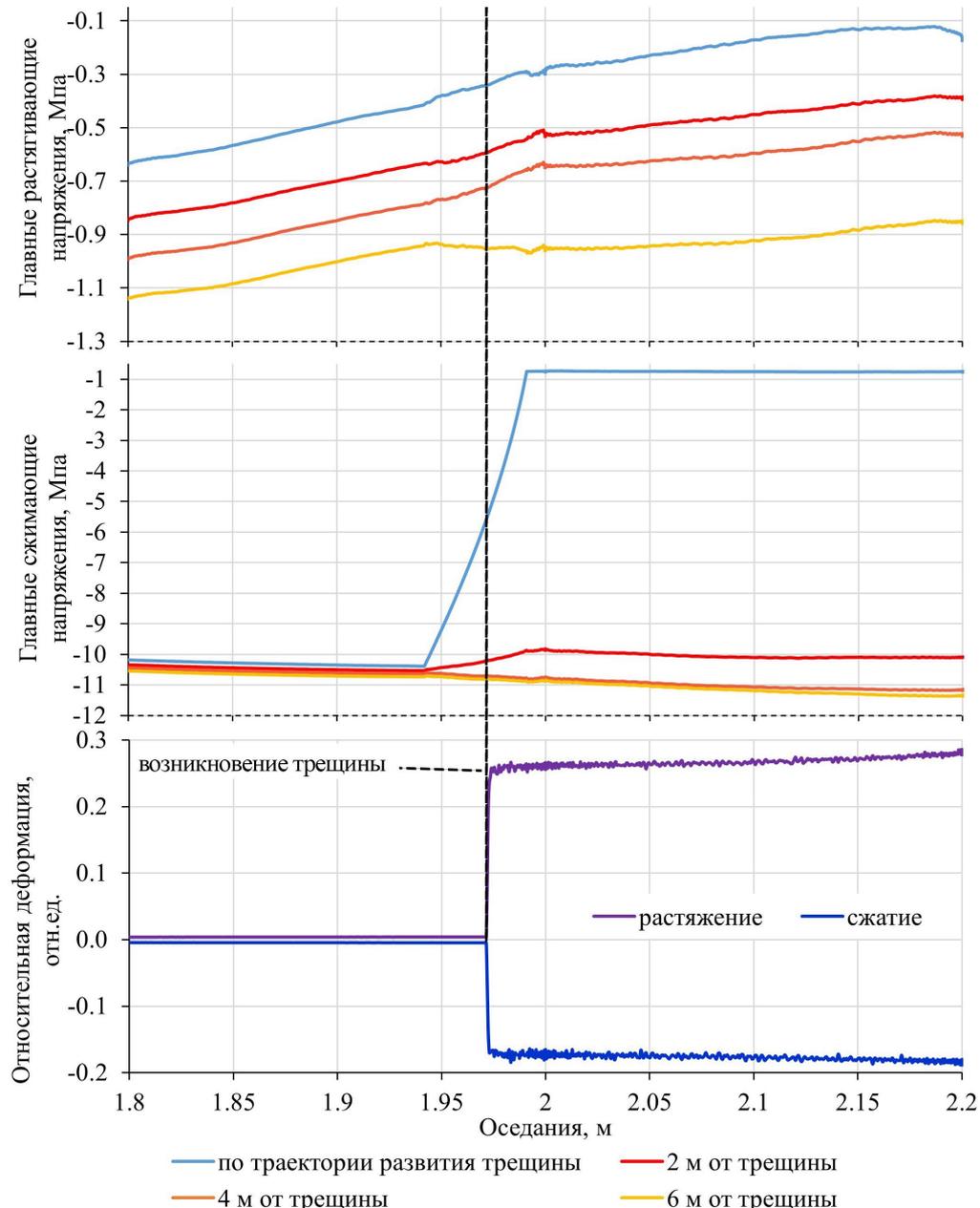


Рисунок 4.15 – Изменение главных растягивающих и сжимающих напряжений в окрестности при развитии трещины, ПКС

Необходимо установить взаимосвязь возникновения первичной трещины и наклонов уровня подошвы ВЗТ. Для этого рассмотрим два дополнительных расчетных случая, в

котором уровень подошвы ВЗТ будет иметь значения наклонов больше и меньше рассмотренного выше. Приведенные схемы деформации ВЗТ достигаются за счет изменения размера зоны её подошвы, находящейся между недеформированным участком и зоной максимальных оседаний. На (Рисунок 4.16) отражены наклоны поверхностей и уровня подошвы ВЗТ в момент формирования первичной трещины по её кровле. Из результатов видно, что большие значения наклона подошвы ВЗТ обеспечивают большие значения наклона и, соответственно, кривизны поверхности в окрестности первичной трещины. Трещина имеет большую глубину распространения в момент образования в таком случае деформирования подошвы ВЗТ.

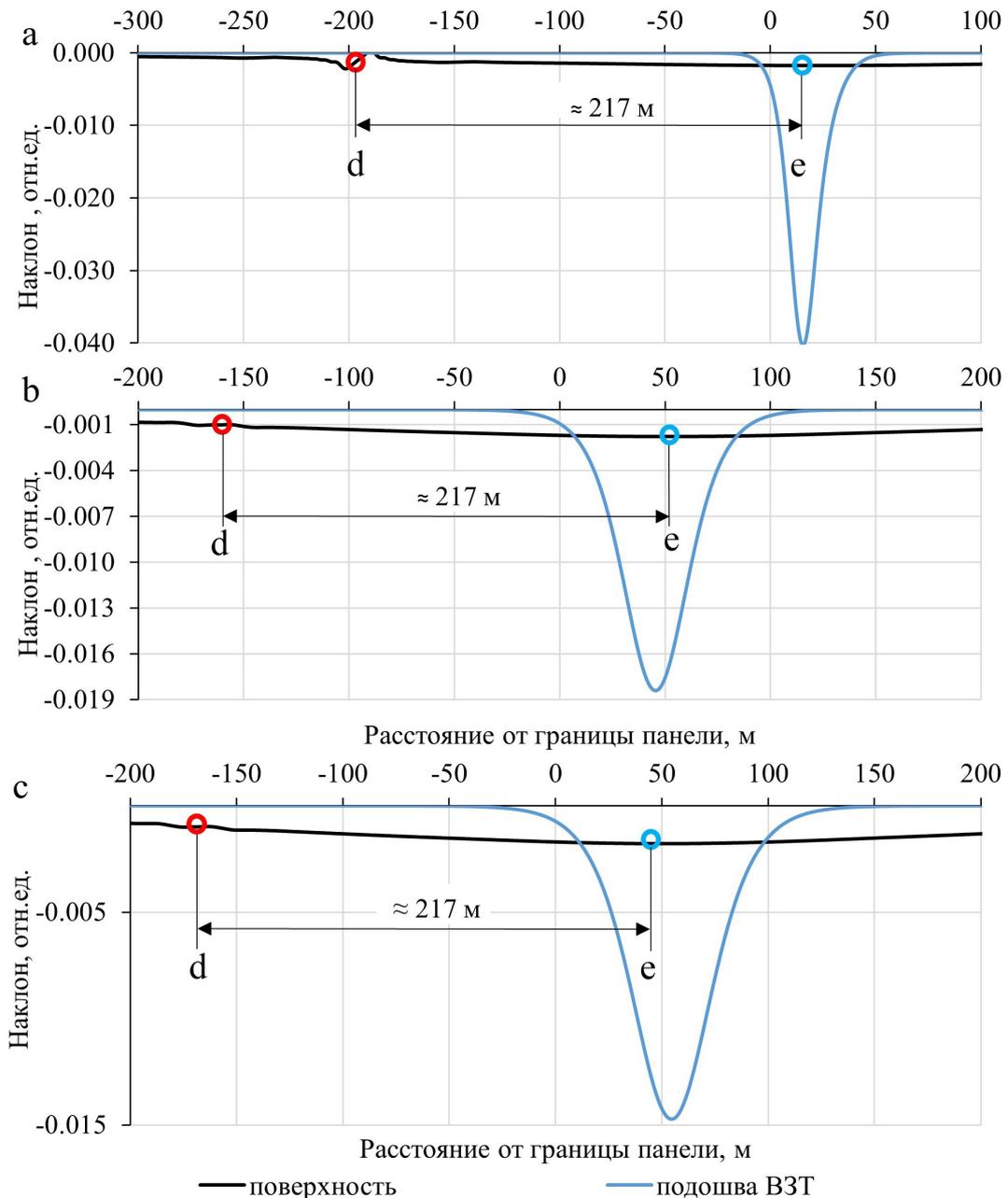


Рисунок 4.16 – Наклоны поверхности и уровня подошвы ВЗТ на момент формирования первичной трещины
 а, б, с – рассмотренные расчетные случаи;
 d – первичная трещина; e – середина участка с максимальным наклоном

Во всех рассмотренных случаях первичная трещина возникает при тех же значениях наклона поверхности (0.00177), величины её оседаний (0.77 м) и выявленном расстоянии (217 м) от середины участка с максимальным значением наклона. Момент возникновения первичной трещины в процессе оседания поверхности наступает при достижении выявленного значения величины оседания поверхности.

Приведённые основные этапы образования трещин и их развития в гидравлически связанную систему не зависят от наклонов и кривизны подошвы ВЗТ, а связаны со значениями максимальных наклонов земной поверхности.

Необходимо представить полученные результаты в общем виде, поскольку они в численном виде зависят от мощности ВЗТ. Рассмотрим водозащитные толщи с тем же соотношением мощностей характерных толщ, имеющие суммарную мощность, равную 0.3, 0.66, 1.5 и 2 мощности ВЗТ в условиях на Палашерском участке ВКМКС. Сравнительный анализ НДС представленных расчетных моделей даёт возможность вывести закономерности в условиях возникновения первичной трещины по кровле ВЗТ. Для достоверности результатов прогноза почва ВЗТ имеет единые размеры участка неравномерных вертикальных смещений при их одинаковых величинах. Смещения уровня почвы ВЗТ определяется уравнением (4.4):

$$U = -a + \frac{a}{1 + 10^{(\log 45 - x)(-0.04167)}}, \quad (4.4)$$

где U – величина вертикальных смещений, м; a – параметр, определяющий величину максимальных смещений в заданный этап деформации почвы ВЗТ, м; x – расстояние от границы панели, м.

Полученные результаты можно представить в виде таблицы и графиков, (Таблица 4.1 и Рисунок 4.17), соответственно. Из результатов прослеживается линейный характер зависимости величины оседаний поверхности и расстояния, на котором формируется первичная трещина по кровле ВЗТ относительно середины участка неравномерных сдвижений. Зависимость максимальных значений наклона поверхности от мощности ВЗТ имеет вид степенной функции. Максимальные значения наклона поверхности проявляются в середине участка неравномерных сдвижений. Уменьшение величины наклона поверхности с увеличением мощности ВЗТ объясняется увеличением линейных размеров участка неравномерных сдвижений, что в свою очередь приводит к увеличению площади мутьды сдвижения.

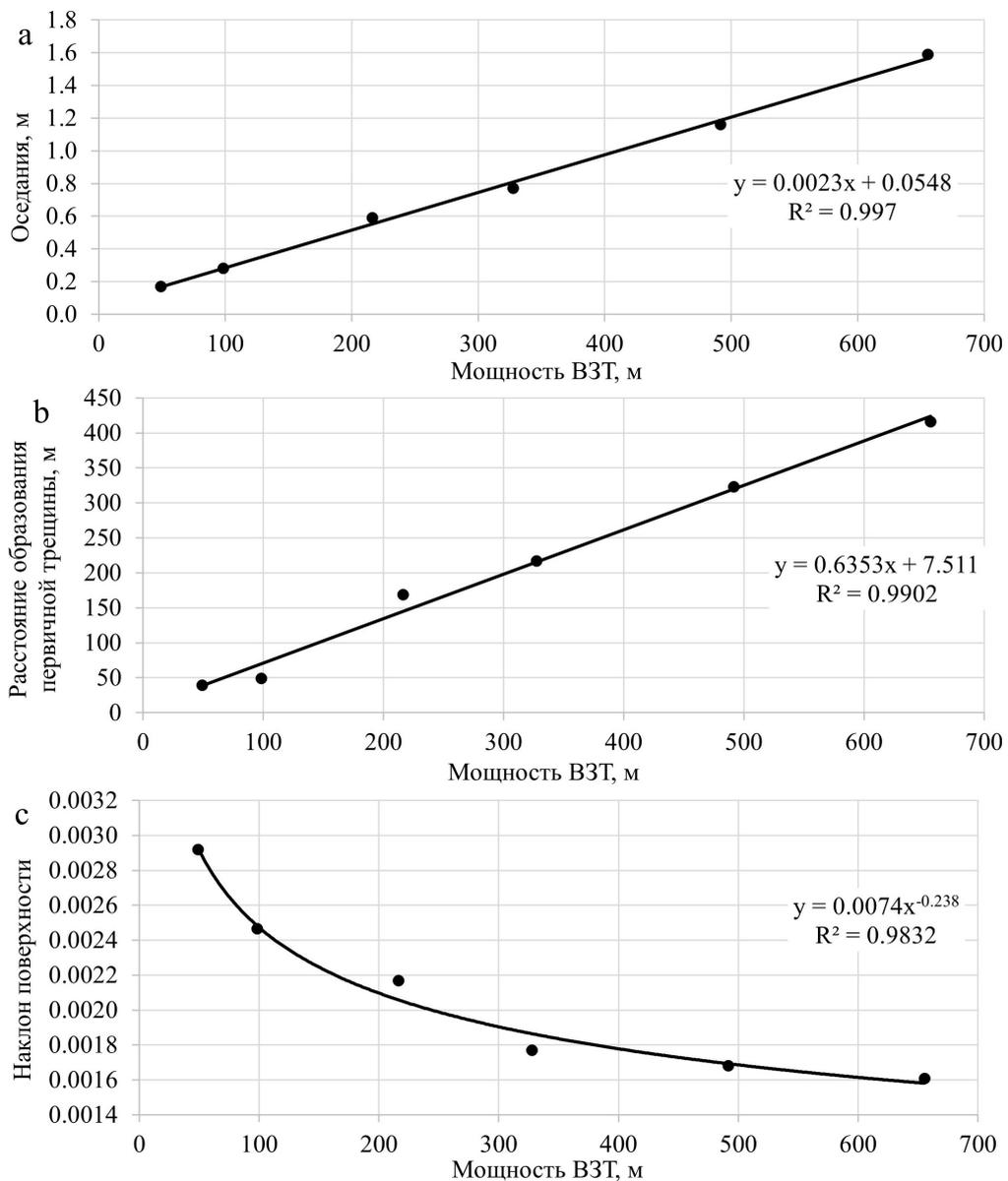
Уравнения зависимости оседаний поверхности и расстояния, на котором формируется первичная трещина имеют вид (4.5):

$$L = k \cdot m_{\text{ВЗТ}} + b, \quad (4.5)$$

где L – расстояние относительно середины участка неравномерных сдвижений, м;
 $m_{\text{ВЗТ}}$ – мощность ВЗТ, м; b – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств пород ВЗТ.

Таблица 4.1 – Условия возникновения первичной трещины по кровле ВЗТ

Масштаб модели ВЗТ	0.15	0.3	0.66	1	1.5	2
Глубина обработки, м	54.1	108.21	238.1	360.7	541.05	721.4
Мощность ВЗТ, м	49.15	98.31	216.32	327.7	491.55	655.4
Оседания, м	0.17	0.28	0.59	0.77	1.16	1.59
Наклон поверхности	0.00292	0.00247	0.002169	0.00177	0.00168	0.00161
Расстояние образования первичной трещины, м	39	49	169	217	323	416



● Результаты численного моделирования — аппроксимирующее уравнение

Рисунок 4.17 – Условия возникновения первичной трещины по кровле ВЗТ

Уравнения зависимости наклона поверхности, при котором формируется первичная трещина имеет вид (4.6):

$$i = a \cdot m_{\text{ВЗТ}}^c, \quad (4.6)$$

где i – наклон поверхности, при котором формируется первичная трещина, отн. ед.;
 c – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств пород ВЗТ.

4.4 Выводы по IV главе

Результаты численного моделирования прогноза НДС ВЗТ демонстрируют положительный эффект податливой крепи МКЦ по сохранению её целостности за счет увеличения несущей способности целиков.

Анализ результатов моделирования напряженно-деформированного состояния ВЗТ на Палашерском участке ВКМКС определил закономерности в возникновении гидравлически связанной системы трещин:

- Гидравлически связанная система трещин формируется при наклоне земной поверхности 0.0216;
- Гидравлическая связь системы трещин с грунтовыми водами осуществляется посредством первичной трещины по кровле ВЗТ, возникшей на расстоянии в 217 м от середины участка с наклоном 0.00177, при значениях оседаний 0.77 м;

В результате сравнительного анализа НДС ВЗТ при различных их мощностях получены следующие результаты:

- Установлен вид зависимости наклона поверхности, при котором формируется первичная трещина и выполнена её аппроксимация в форме степенной функции.
- Установлен вид зависимости оседаний поверхности и расстояния, на котором формируется первичная трещина относительно середины участка неравномерных смещений и выполнена её аппроксимация в форме линейной функции.

Приведённые выше результаты анализа моделирования напряженно-деформированного состояния ВЗТ подтверждают третье защищаемое положение: методика прогноза НДС ВЗТ при разработке соляных месторождений должна основываться на использовании модели деформирования с накоплением повреждений, учитывать длительные прогнозные вертикальные смещения по её подошве и возможность возникновения гидравлической связи с грунтовыми водами посредством первичной трещины, формирование которой происходит на расстоянии, определяемом линейной зависимостью от мощности ВЗТ, и отмеряемом от середины участка, наклон которого достигает значений $i = a \cdot m_{\text{ВЗТ}}^c$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научная задача применения модифицированной вязко-упруго-пластической модели деформирования с условием пластичности Друкера-Прагера для прогноза НДС массива соляных пород и упруго-пластической модели деформирования пород ВЗТ для прогноза её НДС и возможности накопления повреждений в процессе деформирования МКЦ. Основные научные и практические результаты исследований заключаются в следующем:

1. Предложен метод обоснования реологической модели деформирования соляных пород и ее параметров по результатам обработки лабораторных испытаний образцов горных пород и натуральных измерений конвергенции породного контура горных выработок.

2. Определены параметры реологической модели массива каменной соли Палашерского участка ВКМКС, обеспечивающей корректный прогноз НДС вмещающего массива в окрестности одиночной горной выработки на временном промежутке до 40 лет.

3. Определены параметры реологической модели сильвинита, продуктивного пласта на Палашерском участке ВКМКС, обеспечивающей корректный прогноз НДС МКЦ и процесса деформирования подошвы ВЗТ.

4. Установлены параметры численных моделей, обеспечивающие корректные результаты прогноза НДС массива соляных пород в окрестности одиночной горной выработки:

- расстояние от деформируемой поверхности до границ модели должно определяться наибольшим линейным размером поперечного сечения выработки и превышать его не менее чем в 16 раз;
- размер конечного элемента численной модели должен определяться по наименьшему радиусу кривизны поверхности и составлять не более $1/6$ от него;
- конечные элементы, находящиеся на деформируемой поверхности, должны быть структурированы, а их рёбра ориентированы нормально относительно неё;
- сетка конечных элементов в окрестности деформируемой поверхности должна состоять из четырех узловых элементов.

5. Разработан способ податливого крепления междукамерных целиков. Применение податливой крепи увеличивает несущую способность целика как во время работы крепи, так и после её разрушения, а также приводит к уменьшению величины сдвига земной поверхности и значения её максимального наклона.

6. Сравнительный анализ работы тросовой крепи выявил следующие результаты, подтверждающие второе защищаемое положение:

- по кривым зависимостям изменения величины горизонтального смещения породного контура от реакции крепи в податливом режиме работы и времени построена поверхность зависимости, определено её уравнение, параметры и представлено графическое отображение;

- установлен вид зависимости продолжительности податливого и жёсткого режима работы крепи от диаметра используемого каната и выполнена её аппроксимация в форме показательной функции;

- установлен вид зависимости относительного горизонтального смещения породного контура закреплённого целика от диаметра каната податливой крепи и выполнена её аппроксимация в форме степенной функции.

7. Представлен метод обоснования параметров упруго-пластических моделей деформирования подрабатываемых толщ, обеспечивающих хрупкий характер разрушения, на основе анализа результатов лабораторных испытаний пород, слагающих ВЗТ.

8. Разработан метод прогноза НДС ВЗТ на основе вязко-упруго-пластической модели деформирования междукамерных целиков в соляной толщине и хрупкого характера разрушения пород водозащитной толщине. Модель обеспечивает накопление повреждений в ВЗТ, учитывая длительные прогнозные вертикальные смещения по её подошве.

9. В результате сравнительного анализа НДС при различных мощностях ВЗТ определены закономерности в возникновении гидравлически связанной системы трещин:

- гидравлическая связь системы трещин с грунтовыми водами осуществляется посредством первичной трещины по кровле ВЗТ;

- установлен вид зависимости наклона поверхности, при котором формируется первичная трещина и выполнена её аппроксимация в форме степенной функции;

- установлен вид зависимости оседаний поверхности и расстояния, на котором формируется первичная трещина относительно середины участка неравномерных сдвижений и выполнена её аппроксимация в форме линейной функции.

Приведённые выше результаты нашли отражение в третьем защищаемом положении.

Дальнейшее развитие темы диссертации предполагает обоснование методики прогноза НДС МКЦ и технологического междупластья, учитывающей наличия в них глинистых прослоев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрейчев, А. Н. Разработка калийных месторождений / Андрейчев А. Н. – М.: Недра. – 1966. – 244 с.
2. Асанов, В. А. Деформирование соляных пород при длительном нагружении / Асанов, В. А., Паньков, И. Л., Аникин, В. В. // Горный институт УрО РАН. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – №4. – С. 50-56.
3. Асанов, В. А. Изучение особенностей деформирования соляных пород при длительном нагружении / Асанов В. А., Паньков, И. Л. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2010. – №1. – С. 105-110.
4. Асанов, В. А. Методические аспекты определения прочностных, деформационных и энергетических характеристик соляных пород при прямом растяжении породных образцов в лабораторных условиях / Асанов В. А., Паньков И. Л., Кузьминых В. С., Морозов И. А. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2018. – № 4. – С. 58-68. DOI: 10.15593/pern.mech/2018.4.05.
5. Барях, А. А. О мерах охраны калийных рудников от затопления / Барях А. А., Губанова Е. А. // Записки Горного института. – 2019. – № 240. – С. 613–620. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.613.
6. Барях, А. А. Анализ изменения степени нагружения междукамерных целиков во времени на Верхнекамском месторождении солей / Барях А. А., Лобанов С. Ю., Ломакин И. С. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. № 4. – С. 70-83.
7. Барях, А. А. Деформирование соляных пород / Барях А. А., Константинова С. А., Асанов. В. А. – Свердловск: изд-во УрО РАН, 1996. – 180 с.
8. Барях, А. А. Критерии и особенности разрушения слоистой кровли камер при разработке Верхнекамского месторождения калийных солей / Барях А. А., Шумихина А. Ю., Токсаров В. Н., Лобанов С. Ю., Евсеев А. В. // Горный журнал. – 2011. – № 11. – С. 15-19.
9. Барях, А. А. Об одном подходе к реологическому анализу геомеханических процессов / Барях А. А., Самоделкина Н. А. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – №6. – С. 32-41.
10. Барях, А. А. Прогноз нарастания оседаний земной поверхности при отработке свиты калийных пластов / Барях А. А., Телегина Е. А., Самоделкина Н. А., Девятков С. Ю. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – №4. – С. 26-34.

11. Барях, А. А. Прогноз оседаний земной поверхности по данным измерений деформаций горных выработок / Барях А. А., Евсеев А. Е., Глебова П. А., Васильева Е. Л. // Горный журнал. – 2023. – № 11. – С. 10-14. DOI: 10.17580/gzh.2023.11.01.
12. Барях, А. А. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения / Барях А. А., Асанов В. А., Паньков И. Л. – Пермь : изд-во Пермского государственного технического университета, 2008. – 199 с.
13. **Беликов, А. А.** Анализ крупных аварий при подземной разработке соляных пород / Беликов А. А. // Актуальные вопросы науки и практики : сборник научных статей по материалам IX Международной научно-практической конференции, Уфа, 01 ноября 2022 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр «Вестник науки», 2022. – С. 358-365.
14. **Беликов, А. А.** Податливое крепление выработок, пройденных в соляных породах / Беликов А. А., Беляков Н. А. // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – № 24. – С. 88-95. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-24-88-95.
15. **Беликов, А. А.** Прогноз целостности водозащитной толщи при использовании твердеющей закладки / Беликов А. А. // Инновационный потенциал развития науки в современном мире: достижения и инновации : Сборник научных статей по материалам XIII Международной научно-практической конференции, Уфа, 12 декабря 2023 года. – Уфа: Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр «Вестник науки», 2023. – С. 178-184.
16. Беляков, Н. А. Прогноз целостности водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении калийных руд / Беляков Н. А., **Беликов А. А.** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6-2. – С. 33-46. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_33.
17. Борзаковский, Б. А. Прогноз негативного влияния затопления рудника БКПРУ-1 ОАО «Уралкалий» на городскую и промышленную застройку г. Березники / Борзаковский Б. А., Мараков В. Е., Тенисон Л. О. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 7. – С. 381-396.
18. Булычев, В. Г. Механика дисперсных грунтов / Булычев В. Г. – М.: Стройиздат, 1974.
19. Вялов, С. С. Реологические основы механики грунтов / Вялов С. С. – М.: Высшая школа, 1978. – 317 с.

20. Гимм, В. Новые научные данные горной механики в соляных залежах и их практическое использование при современной технологии / Гимм В., Хёфер К. Г., Духров Г. – М.: ВНИИГ. Пер. – № 1024.
21. ГОСТ СССР. Породы горные. Метод определения деформационных характеристик при одноосном сжатии. // ГОСТ 28985-91. Комитет стандартизации и метрологии СССР. Москва. Издательство стандартов. – 1991.
22. ГОСТ СССР. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. // ГОСТ 21153.8-88. Комитет стандартизации и метрологии СССР. Москва. Издательство стандартов. – 1988.
23. ГОСТ СССР. Породы горные. Метод определения предела прочности при одноосном растяжении. // ГОСТ 21153.3-85. Комитет стандартизации и метрологии СССР. Москва. Издательство стандартов. – 1985.
24. Гусев, В. Н. Геомеханика техногенных водопроводящих трещин / Гусев В. Н. – СПб.: Санкт-Петербургский горный ин-т, 1999. – 156 с.
25. Гусев, В. Н. Определение параметров зоны водопроводящих трещин через горизонтальные деформации подрабатываемой толщи / Гусев В. Н., Илюхин Д. А., Алексенко А. Г. // Записки Горного института. – 2013. – № 204. – С. 69-73.
26. Гусев, В. Н. Прогноз безопасных условий разработки свиты угольных пластов под водными объектами на основе геомеханики техногенных водопроводящих трещин / Гусев В. Н. // Записки Горного института. – 2016. – Т.221. – С.638-643. DOI 10.18454/PMI.2016.5.638.
27. Дементьева, А. В. Конструкции податливых крепей в соляных породах/ Дементьева А. В., Карасев М. А. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 10-1. – С. 136 – 144. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_101_0_136.
28. Демин, В. Ф. Аналитическое моделирование геомеханических процессов в приконтурном массиве горных выработок / Демин В. Ф., Немова Н. А., Демина Т. В. // Журнал СФУ. Техника и технологии. – 2015. – Т. 8. – № 1. – С. 74-97.
29. Ержанов, Ж. С. Ползучесть соляных пород / Ержанов Ж. С., Бергман Э. И. – Алма-Ата.: Наука, 1977.
30. Ермашов, А. О. Геомеханическое обоснование расчетов оседания земной поверхности при добыче калийно-магниевых руд (на примере Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей): Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Пермь: Горный институт УрО РАН, 2015.

31. Жабко, А. В. Теоретические и экспериментальные аспекты пластического деформирования и разрушения горных пород / Жабко А. В. // Известия УГГУ. – 2018. – № 1(49). – С. 68-79. DOI 10.21440/2307-2091-2018-1-68-79.
32. Зильбершмидт, В. Г. Технология подземной разработки калийных руд / Зильбершмидт В. Г., Синопальников К. Г., Нолянина Г. Д. – М.: Недра, 1977. – 207 с.
33. Зубов, В. П. Снижение рисков затопления калийных рудников при прорывах в горные выработки подземных вод / Зубов В. П., Смычник А. Д. // Записки Горного института. – 2015. – Т. 215. – С. 29-37.
34. Инструкция по выполнению периодического визуального контроля выработанного пространства рудника ООО «ЕвроХим - Усольский калийный комбинат» / ООО «ЕвроХим - Проект», ООО «ЕвроХим - УКК». – Пермь-Березники, 2020.
35. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород, земной поверхности и подрабатываемыми сооружениями на угольных и сланцевых месторождениях (Мин-во угольной промышленности СССР, Разраб. ВНИМИ) / ред. А.С. Ягунов. - М.: Недра, 1989.
36. Карташов, Ю. М. Методические указания по ускоренным лабораторным испытаниям слабых горных пород на длительную прочность // Ленинград. ВНИМИ. – 1966. – 34 С.
37. Карташов, Ю. М. Ускоренные методы определения реологических свойств горных пород / Карташов, Ю. М. – М.: Недра. – 1973. – 112 с.
38. Кашников, Ю. А. Геолого-геомеханическая модель участка Верхнекамского калийного месторождения / Кашников Ю. А., Ермашов А. О., Ефимов А. А. // Записки Горного института. – 2019. – №. 237. – С. 259-267. DOI: 10.31897/PMI.2019.3.259.
39. Кологривко, А. А. Снижение геоэкологических последствий при подземной разработке калийных месторождений / Кологривко А. А. // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. Прикладные науки. Строительство. – 2014. – № 16. – С. 101-110.
40. Константинова, С. А. Об одной феноменологической модели деформирования и разрушения соляных пород при длительном действии сжимающих нагрузок / Константинова С. А. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1983. – № 3. – С. 8-13.
41. Константинова, С. А. Оценка категорий устойчивости соляных и соленосных пород вокруг горных выработок в проектных решениях для строящихся рудников / Константинова С. А., Соловьев В. А., Секунцов А. И., Аптуков В. Н. // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2012. – № 3. – С. 70-73. – EDN OXROJR.

42. Кошелев, А. Е. Обоснование и разработка метода определения механических свойств каменной соли с учетом начального поля напряжений: диссертация // канд. тех. наук: 25.00.20. – Москва. 2013. – 143 с.
43. Кузнецов, Г. Н. Механические свойства горных пород / Кузнецов Г. Н. – М.: Углетехиздат, 1947. – 179 с.
44. Лобанов, С. Ю. Анализ изменения степени нагружения междукамерных целиков во времени / Лобанов С. Ю. // Стратегия и процессы освоения георесурсов. – 2014. – № 12. – С. 72-76.
45. Ломакин, И. С. Оценка длительной несущей способности междукамерных целиков / Ломакин, И. С. // Стратегия и процессы освоения георесурсов. – 2014. – № 12– С.88-91.
46. Мероприятия по защите рудника от затопления и поверхностных объектов от вредного влияния горных работ в условиях Гремячинского месторождения калийных солей / ИПКОН РАН, 2015.
47. Мозер, С. П. Мониторинг состояния водозащитной толщи на калийных рудниках / Мозер С. П., Ковалёв О. В., Тхориков И. Ю. // *Górnictwo i geologia* – 2010 – Том 5. – С. 89-102.
48. Мор, О. Чем обусловлен предел прочности и временное сопротивление материала. // «Новые идеи в технике».- Сборник №1. Теория прочности.- Петроград.- Из-во «Образование». – 1915.
49. Морозов, И. А. Оценка устойчивости горных выработок в соляных породах Гремячинского месторождения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Пермь: Горный институт УрО РАН, 2022.
50. Морозов, К. В. Многокомпонентные датчики деформаций для оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород / Морозов К. В., Демёхин Д. Н., Бахтин Е. В. // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6–2. — С. 80—97. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_80.
51. Отчет «Провести комплекс лабораторных исследований образцов горных пород и проб подземных вод с Палашерского участка ВКМКС» // ОАО «Галургия». – Березники. – 2009 г.
52. Отчет о НИР по теме «Геомеханические исходные данные для проектной документации «Технический проект отработки запасов сильвинита Верхнекамского месторождения калийно- магниевых солей» // ООО «ЕВРОХИМ - ПРОЕКТ». – Санкт-Петербург. – 2021 г.

53. Отчет о НИР по теме «Определение вертикальной и горизонтальной составляющих горного давления в массиве горных пород и изменения горизонтального давления на крепь во времени» // ООО «ТОМС-ПРОЕКТ». – Санкт-Петербург. – 2019 г.

54. Отчет о НИР по теме «Определение физико-механических свойств горных пород в лабораторных условиях» // ГИ УрО РАН. – Пермь. – 2021 г.

55. Патент № 2788185 С1 РФ, МПК E21D 11/15. Способ податливого крепления междукамерных целиков в соляных породах / **Беликов А. А.**, Беляков Н. А.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский горный университет. – № 2022129460; заявл. 14.11.2022; опубл. 17.01.2023.

56. Пермяков, Р. С. Справочник по разработке соляных месторождений / Пермяков, Р. С., Ковалев О. В., Пинский В. Л., Романов В. С., Нестеров М. П., Проскуряков Н. М., – М.: Недра, 1986. – 212 с.

57. Пономаренко, Т. Экологические, экономические и социальные последствия аварийных ситуаций на калийных рудниках / Пономаренко Т. // Management Systems in Production Engineering. – 2012. –№ 2 (6). – С. 28-31.

58. Правила по защите рудников от затопления в условиях Старобинского месторождения калийных солей / ОАО «Белгорхимпром». Минск-Солигорск, 2014.

59. Проскуряков, Н. М. Физико-механические свойства соляных пород / Проскуряков Н. М. – Л.: Недра. – 1973. – 30 с.

60. Протосеня, А. Г. Обоснование параметров реологической модели соляного массива / Протосеня А. Г., Катеров А. М. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 3. – С. 16-28. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_16.

61. Работнов, Ю. Н. Избранные труды. Проблемы механики деформируемого твердого тела / Работнов Ю. Н. Фролов К. В., Махутов Н. А. – М.: Наука, 1991. – 196 с.

62. Работнов, Ю. Н. Элементы наследственной механики твердых тел / Работнов Ю. Н. – М.: Наука, 1977, – 27-38 с.

63. Соловьев, В. А. Поддержание горных выработок в породах соленосной толщи. Теория и практика / Соловьев В. А., Аптуков В. Н., Ваулина И. Б. – Новосибирск: Наука, 2017. – 264 с.

64. Тавостин, М. Н. Влияние вида напряженного состояния на реологические свойства каменной соли / Тавостин М. Н. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – №8. – С. 125-128.

65. Тавостин, М. Н. Исследование физико-механических свойств каменной соли с учетом предварительного всестороннего нагружения / Тавостин М. Н., Кошелев А. Е.,

Осипов Ю. В. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2015. – №2. – С. 89-96.

66. Телегина, Е. А. Оценка безопасных условий подработки водозащитной толщи при различных вариантах камерной системы разработки / Телегина Е. А. // Стратегия и процессы освоения георесурсов. – 2012. - № 10. – С. 77.

67. Указания по защите рудников от затопления и охране подрабатываемых объектов в условиях Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей / ГИ Уро РАН, 2014.

68. Федосеев, А. К. Анализ критериев нарушения сплошности водозащитной толщи / Федосеев А. К. // Стратегия и процессы освоения георесурсов. – 2014. – № 12. – С. 81-83.

69. Хажыылай, Ч. В. Расчет паспорта прочности горных пород, находящихся в естественных условиях массива, с использованием критерия Хука-Брауна и программы Rocdata / Хажыылай Ч. В., Еременко В. А., Косырева М. А., Янбеков А. М. // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2018. – № 12. – С. 92-101.

70. Цытович, Н. А. Механика грунтов / Цытович, Н. А. – М.: Высшая школа, 1979.

71. Черный, Г. И. Устойчивость подрабатываемых бортов карьеров / Черный Г. И. – М.: Недра, 1980. – 216 с

72. Шиман, М. И. Предотвращение затопления калийных рудников / Шиман М. И. Недра, Москва 1992, 176 с.

73. Шумихина, А. Ю. Геомеханическая оценка эффективности дополнительных мер охраны водозащитной толщи методами математического моделирования / Шумихина А. Ю. // Стратегия и процессы освоения георесурсов. – 2014. – № 12. – С. 92.

74. Экспериментальная оценка устойчивости междукамерных целиков и определение сроков закладки очистных камер пласта КрII: отчет о НИР, дог. № 210-0451008 от 03.06.2019 с ООО «ЕвроХим - Усольский калийный комбинат» // ГИ Уро РАН. – Пермь, 2020.

75. Aydan, Ö. ISRM Suggested Methods for Determining the Creep Characteristics of Rock / Aydan Ö., Ito T., Özbay U., Kwasniewski M., Shariar K., Okuno T., Özgenoğlu A., Malan D. F., Okada T. // Rock Mech Rock Eng. – 2013. – Vol. 47. – PP. 275-290. DOI: 10.1007/s00603-013-0520-6.

76. Baryakh, A. A. Operational control of rib pillar stability / Baryakh A. A., Evseev A. V., Lomakin I. S., Tsayukov A. A. // Eurasian Mining. – 2020. – No. 2. – PP. 7-10.

77. Baryakh, A. A. Seismic – geomechanical control of water-impervious strata in potassium mines / Baryakh A. A., Sanfirov I. A., Fedoseev A. K., Babkin A. I., Tsayukov A. A. //

Journal of Mining Science. – 2017. – Vol. 53. –No. 6. – PP. 981-992. DOI: 10.1134/S1062739117063041.

78. **Belikov, A. A.** Method of numerical modeling of rheological processes on the contour of single mine working / Belikov A. A., Belyakov N. A. // Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2024. – No. 1. - P. 94-108. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_1_0_94.

79. **Belikov, A. A.** Method of predicting the stress-strain state of interchamber pillars lined with a compliant rope fastener / Belikov A. A., Belyakov N. A. // Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2023. – No.4 – PP. 20-34. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_4_0_20.

80. Berest, P. Dry mine abandonment / Berest P., Brouard B., Feuga B. // SMRI Fall 2003 Conference, 5-8 October, Chester, United Kingdom / Solution Mining Research Institute. – 2003. – 28 p.

81. Chen, W. F. Plasticity for structural engineers / Chen W. F., Han D. J. – New York: Springer-Verlag, 1988.

82. Doering, T. Das primaeren, sekudaeren und tertiaeren kreichen von steinsalz -ein dreidimensionales rheonomes stoffgesetz / Doering T., Kiehl J. R. // Geotechnik. – 1996. – Vol. 19. – No. 3. – PP. 194-199.

83. Dreyer, W. Die bedeutung von modellversuchen an salzgesteinen fiir die beurteilung gebursmechanischer probleme im kalibergbau / Dreyer W. // Bergakademie. – 1964. – No. 16.

84. Erichsen, C. A three-dimensional constitutive law for rock salt including transient, steady state and accelerated creep, failure and post-failure behaviour and applications in rock engineering / Erichsen C. // Proc. EUROCK, 2006, Liege. – 2006.

85. Esteves Motta, G. New constitutive equation for salt rock creep / Esteves Motta G., Lopes Pinto C.L. // REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto. 2014. – Vol. 67(4). – PP. 397-403. DIO: 10.1590/0370-44672014670165.

86. Firme, P. A. L. P., Enhanced double-mechanism creep laws for salt rocks / Firme P. A. L. P., Brandao N. B., Roehl D., Romanel C. // Acta Geotechnica. – 2018. – No 13. – PP. 1329-1340. DOI: 10.1007/s11440-018-0689-7.

87. Gimm, W. Kali-und steinsalz bergbau. Bd.1. Aufschluss und abbau von kali-und steinsalzlagerstätten. Leipzig, 1966.

88. Goolbaugh, M. I. Special problem of mining in deep potash / Goolbaugh M. I. // Min Eng. – 1967. – Vol. 19. – No 5. – PP. 54-62.

89. Gusev, V. N. Assessment of development of water conducting fractures zone in the massif over crown of arch of tunneling (construction) / Gusev V. N., Maliukhina E. M., Volokhov E. M., Tyulenev M. A., Gubin M. Y. // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2019. – No.10(2). – PP. 635-643.

90. Habibi R. Stability analysis of complex behavior of salt cavern subjected to cyclic loading by laboratory measurement and numerical modeling using LOCAS (case study: Nasrabad gas storage salt cavern) / Habibi R., Moomivand H., Ahmadi M., Asgari A. // *Environmental Earth Sciences*. – 2021 – Vol.80. No. 8. – PP. 1–21. DOI: 10.1007/s12665-021-09620-8.
91. Halwany, S. Applied soil mechanics with ABAQUS applications / Helwany S. // *Library of Congress Cataloging – Publication Data*. Publishing Wiley. – 2007.
92. Hoek, E. Practical rock engineering / Hoek E. – London: Institution of Mining and Metallurgy, 2002. – p. 325.
93. Hofer, K. H. Triaxial tests on salt rocks / Hofer K. H., Thoma K. // *Ira. J. Rock Mech. Min. Sci.* – 1968. – Vol. 5. – PP. 195-203.
94. Jun, H. Creep crack analysis of viscoelastic material by numerical manifold method / Jun H., Quansheng L., Zhijun W. // *Engineering Analysis with Boundary Elements*. – 2017. – Vol. 80. – PP.72-86. DOI: 10.1016/j.enganabound.2017.04.005.
95. Khaledi, K. Finite-element modeling of the behavior of underground caverns excavated in rock salt / Khaledi K., Schanz T., Datcheva M. // *Conference: UMGE 2014 At: Delft, The Netherlands*.
96. Kiehl, J. R. A three-dimensional constitutive law for rock salt including transient, steady-state and accelerated creep, dilatancy, creep and tensile failure as well as post failure behaviour. / Kiehl J. R., Reim J. // *Proc. 9th ISRM Congr.* – Vol. 2. – Paris. – 1999.
97. Kiehl, J. R. Ein räumliches Stoffgesetz für Steinsalz unter Berücksichtigung von primärem, sekundärem und tertiärem Kriechen, Dilatanz, Kriech- und Zugbruch sowie Nachbruchverhalten / Kiehl J. R., Döring T., Erichsen C. // *Geotechnik* 21. – 1998. – PP. 254-258.
98. Kiehl, J. R. Stability of underground openings in rock salt. / Kiehl J. R., Erichsen C. // *Proc. 5th European Conf. on Numerical Methods in Geotechnical Eng. (NUMGE)*, Paris. – 2002.
99. Moghadam, S. I. Unified bounding surface model for monotonic and cyclic behaviour of clay and sand / Moghadam S. I., Taheri E., Ahmadi M., Ghoreishian Amiri S. A. // *Acta Geotechnica*. – 2022. – Vol. 17 (10). – PP. 4359-4375. DOI: 10.1007/s11440-022-01521-9.
100. Taheri, S. R. Investigation of rock salt layer creep and its effects on casing collapse / Taheri S. R., Pak A., Shad, S., Mehrgini B., Razifar M. // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2020. – No. 30 – PP. 357-365. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.02.001.
101. Taheri, S. R. Casing failure in salt rock: numerical investigation of its causes / Taheri S. R., Pak A. // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. – 2020. – No. 59. – PP. 3903-3918. DOI: 10.1007/s00603-020-02161-9.
102. Vermeer, P. A. Non-Associated Plasticity for Soils: Concrete and Rock / Vermeer P. A., de Borst R. // *Heron*. – 1984. – Vol. 29. – № 3. – P. 3-64.

103. Volterra, V. Fonctions de lignes, Gauthier-Villard, Paris, 1913.
104. Wallner, M. Standsicherheitsberechnungen fuer Pfeilerdimensionierung im Salzbergbau / Wallner M. // Proc. 5th ISRM Congress, Melbourne. – 1983. – PP. 8-14.
105. Wittke, B. Permeabilität von Steinsalz. Theorie und experiment. Geotechnik in Forschung und Praxis. WBI-Print 4. Verlag Glueckauf GmbH. Essen, 1999.
106. Wittke, W. Rock mechanics. Theory and applications with case histories / Wittke W. – Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 1990. – 1076 p.
107. Zhang, Y. Analysis of a compressive strength model for FRP-confined damaged concrete columns based on the Drucker–Prager yield criterion / Zhang Y., Xiong X., Musa M., Lyu X. // Structural Concrete. – 2022. – Vol. 24. – PP.721-735. DOI: 10.1002/suco.202100584.
108. Xiexing Miao. The height of fractured water-conducting zone in undermined rock strata/ Xiexing Miao, Ximin Cui, Jin'an Wang, Jialin Xu//Engineering Geology,120,2011 p.32-39

ПРИЛОЖЕНИЕ А**Акт об использовании результатов кандидатской диссертации****Утверждаю**

Директор по проектированию
горных работ
ООО «СПб-Гипрошахт»

Д.В. Климов

Дата «16» октября 2023 г.

**АКТ**

о внедрении результатов кандидатской диссертации
Беликова Артема Артуровича
по научной специальности 2.8.6 – Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика.

Комиссия в составе:

Председатель:

Мирончук Дмитрий Петрович – начальник центра гидрогеомеханики и
шахтного строительства

Члены комиссии:

1. Степанов Евгений Сергеевич – начальник горного отдела;
2. Врещ Сергей Викторович – главный инженер проекта.

составили настоящий акт о том, что результаты диссертации на тему «Обоснование геомеханической модели соляных пород и её параметров для прогноза напряженно-деформированного состояния водозащитной толщи при разработке месторождения каменных солей», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в деятельности ООО «СПб - Гипрошахт» при разработке проекта проведения подземных горных работ на соляных месторождениях в виде методики построения численной модели массива горных пород в окрестности горных выработок, пройденных в породах, склонных к проявлению реологических свойств, длительного прогноза напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности выработок.

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 в условиях Палашерского участка Верхнекамского месторождения и изучения возможности применения вязко-упругопластической модели Друкера-Прагера в качестве реологической модели горных пород.

Председатель комиссии

Начальник центра
гидрогеомеханики и шахтного
строительства



Мирончук Д.П.

Члены комиссии:

Начальник горного отдела



Степанов Е.С.

Главный инженер проекта



Врещ С.В.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2788185

СПОСОБ ПОДАТЛИВОГО КРЕПЛЕНИЯ
МЕЖДУКАМЕРНЫХ ЦЕЛИКОВ В СОЛЯНЫХ
ПОРОДАХ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Беликов Артем Артурович (RU), Беляков Никита Андреевич (RU)*

Заявка № 2022129460

Приоритет изобретения 14 ноября 2022 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 17 января 2023 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 14 ноября 2042 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

