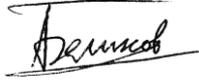


*На правах рукописи*

**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*

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

Санкт-Петербург – 2024

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

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук

*Беляков Никита Андреевич*

**Официальные оппоненты:**

*Ашихмин Сергей Геннадьевич*

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

*Куранов Антон Дмитриевич*

кандидат технических наук, акционерное общество «Научно-исследовательский, проектный и конструкторский институт горного дела и металлургии цветных металлов», директор по горному производству - технический директор.

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

Защита диссертации состоится **27 сентября 2024 г. в 11:30** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д. 2, **аудитория № 1163**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 27 июля 2024 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ  
Павел Игоревич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **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 водопроводящих 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 водопроводящих 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-магниевых 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. Баряха, Ю. А. Кашников, А. О. Ермашов, А. К. Федосеев, Б. З. Арусин, 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 натуральных 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, 2 и 5.

**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.

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.

#### **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 упруго-пластической 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 упруго-пластической 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, 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 международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент.

**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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** изложены актуальность исследования, цель, задачи работы, научная новизна и основные защищаемые положения диссертации.

**В первой главе** выполнен анализ существующих методов определения безопасной подработки ВЗТ и описаны геомеханические процессы формирования зоны водопроводящих трещин.

**Во второй главе** приведен анализ лабораторных испытаний соляных пород и описаны методики обоснования параметров вязко-упруго-пластической модели деформирования массива соляных пород с условием пластичности Друкера-Прагера, обеспечивающей корректный прогноз НДС массива, анализ результатов натурных измерений конвергенции очистных камер и оседаний земной поверхности, а также анализ лабораторных испытаний пород ВЗТ и описание методики обоснования параметров упруго-пластической модели их деформирования.

**В третьей главе** представлена методика построения численной модели массива соляных пород с учетом реологического характера их деформирования, обеспечивающая достоверный прогноз НДС в окрестности горной выработки, а также метод прогноза НДС закреплённых междукамерных целиков и определение параметров их крепи.

**В четвертой главе** отражена методика прогноза НДС ВЗТ на основе вязко-упруго-пластической модели деформирования междукамерных целиков в соляной толще с учетом хрупкого характера разрушения пород водозащитной толщи.

**В заключении** обобщены результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований.

Основные результаты диссертации отражены в следующих защищаемых положениях:

**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.**

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 0.04 до 0.32 диаметра выработки. 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.

Параметры реологической модели массива каменной соли Палашерского участка ВКМКС обеспечивают корректный прогноз НДС вмещающего массива в окрестности одиночной горной выработки на временном промежутке до 40 лет. Обоснование параметров модели подтверждается сходимостью значений скоростей конвергенции выработки, полученных в результате численного моделирования, со средними скоростями конвергенции одиночной выработки, измеренными на наблюдательных станциях месторождения. Также график прогнозных горизонтальных смещений породного контура сопоставим с характерным, и на временном промежутке 40 лет расхождение составляет 3.1 %.

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 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 смещений породного контура горной выработки, величин деформаций ползучести, пластических деформаций и напряжений. Достаточно одного ряда нормально ориентированных к

деформируемой поверхности конечных элементов для исключения на нём локальных экстремум напряжений.

По результатам прогноза деформаций ползучести и смещений на контуре горной выработки на период окончания прогноза прослеживается тренд на сближение результатов с уменьшением размера конечных элементов. С увеличением расстояния от горной выработки до границ модели влияние граничных условий в модели уменьшается.

На основе полученных результатов наиболее рациональными параметрами численной модели будут являться размер конечного элемента 0.8 диаметров выработки и расстояние от деформируемой поверхности до границ модели 16 её диаметров.

Охарактеризовав указанные параметры как рекомендованные, возможно рассчитать относительную погрешность в результатах прогноза деформаций ползучести и смещений, рисунок 1 и рисунок 2 соответственно. По представленным поверхностям видно, что при уменьшении размеров элементов и увеличении расстояния до границ модели величина деформаций ползучести и смещений увеличиваются на 3.2 и 0.3 % соответственно.

График результирующих деформаций ползучести на контуре выработки эллиптического сечения относительно расстояния до границ модели, определяемым большим линейным размером выработки, подтверждает выведенные ранее закономерности.

По результатам 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 деформируемой поверхности до границ модели должно определяться по наибольшему линейным размерам 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.

**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.**

Податливая тросовая крепь (патент РФ № 2788185) устанавливается на междукамерные целики с целью увеличения их несущей способности посредством создания отпора поперечному их деформированию. Отпор крепи возникает вследствие натяжения канатов, концы которых продеты через насквозь пробуренные скважины.

При достижении заданных величин натяжения каната происходит реализация податливости крепи посредством проскальзывания каната в узле податливости. По мере исчерпания податливости происходит затухание скорости роста поперечных деформаций. 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 разрываются.

Продолжительность податливого режима работы крепи определяется величиной податливости и скоростью деформации целика при соответствующем отпоре крепи. Прочность стального каната в наибольшей степени влияет на длительность жесткого режима работы крепи и ограничивает максимальное значение величины реакции крепи в податливом режиме работы.

Сравнительный анализ работы крепи при различных диаметрах канатов и величин реакции крепи в податливом режиме работы проведён для горно-геологических условий разработки пласта АБ на руднике СКРУ-1 ВКМКС. Для описания поведения соляных пород была использована модель Друкера – Прагера. Подбор параметров модели производился на основе результатов инструментальных наблюдений, выполненных на подземных наблюдательных станциях.

Рассмотрены четыре варианта канатов диаметром 5.6 мм, 12 мм, 16.5 мм и 22.5 мм и различные величины реакции крепи в податливом режиме работы от 19.3 до 303.5 кН. Анализ результатов показал, что расчетные горизонтальные смещения поверхности целиков в заданные промежутки времени, для каждого расчетного случая лежат на экспоненциальных аппроксимирующих кривых, соединив которые, образуется поверхность, характеризующая зависимость горизонтальных смещений боковой поверхности закреплённого целика от времени и реакции крепи в податливом режиме работы (рисунок 3).

Увеличение реакции крепи в податливом режиме работы приводит к увеличению длительности податливого и жёсткого режима крепи и срока её службы. Выбор каната большего сечения приводит к увеличению длительности жёсткого режима крепи. Это объясняется тем, что канат с большим поперечным сечением выдерживает большие нагрузки, вследствие этого увеличивается отпор крепи 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. Следовательно, наиболее эффективным способом увеличения несущей способности целика будет выбор каната большего сечения и создание максимально допустимой величины реакции крепи в податливом режиме работы.

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

$$U_{d'} = a \cdot d^c, \quad (1)$$

где  $U_{d'}$  – удельное горизонтальное смещение породного контура, отн. ед.;  $a, c$  – коэффициенты, отражающие горно-геологические условия,  $a > 0$ ,  $c < 0$ ;  $d$  – диаметр каната, мм.

Параметры уравнения (1) –  $a$  и  $c$  зависят от степени нагружения МКЦ, марки стали каната, количества применяемых ярусов крепления и реологических свойств соляных пород продуктивного пласта. 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.

**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  $i = a \cdot m_{\text{ВЗТ}}^c$ .**

Прогноз геомеханических процессов в массиве пород ВЗТ и соляных породах продуктивного пласта основан на модели хрупкого деформирования и модифицированной вязко-упруго-пластической модели деформирования с условием пластичности Друкера-Прагера соответственно. Результаты прогноза НДС МКЦ, отражаются в численной модели ВЗТ в виде вертикальных смещений уровня её подошвы за интересующий временной период.

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

Параметры реологической модели сильвинита, продуктивного пласта на Палашерском участке ВКМКС, обеспечивают корректный прогноз НДС МКЦ и процесса смещения

подошвы ВЗТ. Обоснование параметров модели подтверждается сходимостью значений горизонтальных деформаций МКЦ, полученными в результате численного моделирования, с усреднёнными по панели результатами инструментальных наблюдений за конвергенцией породного контура очистных камер, а также сходимостью прогнозных значений вертикальных деформаций МКЦ с результатами инструментальных наблюдений за оседанием земной поверхности на рассматриваемом участке Палашерского месторождения после полной отработки панели. Оседания в численной модели сопоставлены с результатами, полученными согласно вычислений по нормативной документации. Наибольшие отклонения в прогнозе возникают на участках: 10 лет – 13% и 150 лет – 6%, что указывает на достаточно хорошую сходимость результатов.

Обоснование параметров модели подтверждается сходимостью результатов виртуальных испытаний образцов с результатами лабораторных испытаний пород, слагающих ВЗТ, что обеспечивает образование трещин в соответствии с деформационными характеристиками пород.

Анализ результатов прогноза НДС ВЗТ выявил условия в возникновении гидравлически связанной системы трещин:

- гидравлическая связь 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 (рисунок 4);
- гидравлически связанная система трещин формируется при наклоне земной поверхности 0.0126 (рисунок 5).

В результате сравнительного анализа прогноза НДС ВЗТ при различных значениях наклонов подошвы ВЗТ установлено, что 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.

Сравнительный анализ НДС ВЗТ при различных их мощностях выявил закономерности в условиях возникновения первичной трещины по кровле ВЗТ. Полученные результаты отражены в виде графиков (рисунок 6), по ним прослеживается

линейный характер зависимости величины оседаний поверхности и расстояния, на котором формируется первичная трещина по кровле ВЗТ относительно середины участка неравномерных сдвижений. Уравнение зависимости наклона поверхности, при котором формируется первичная трещина имеет вид:

$$i = a \cdot m_{\text{ВЗТ}}^c, \quad (2)$$

где  $i$  – наклон поверхности, отн. ед.;  $c$  – коэффициент, зависящий от физико-механических свойств пород, слагающих ВЗТ.

Максимальные значения наклона поверхности, определяемые по формуле 2, 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 мульды сдвижения.

### **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 толще и хрупкого характера разрушения пород водозащитной толще. 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. **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.

2. **Беликов, А. А.** Податливое крепление выработок, пройденных в соляных породах / А. А. Беликов, Н. А. Беляков // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – № 24. – С. 88-95. DOI: 10.26160/2658-3305-2024-24-88-95.

*Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:*

3. Беляков, Н. А. Прогноз целостности водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении калийных руд / Н. А. Беляков, **А. А. Беликов** // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 6–2. — С. 33–46. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_62\_0\_33.

4. **Belikov, A. A.** Method of predicting the stress-strain state of interchamber pillars lined with a compliant rope fastener / A. A. Belikov, N. A. Belyakov // Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2023. – No.4 – P. 20-34. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_4\_0\_20.

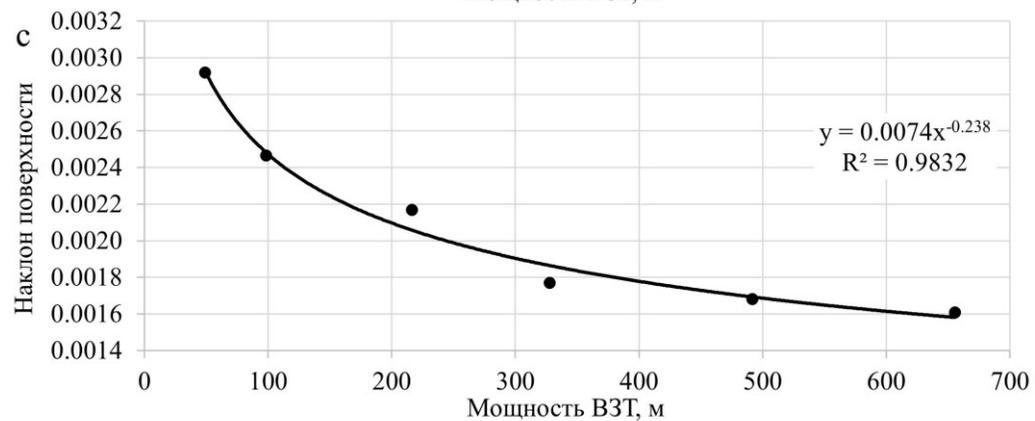
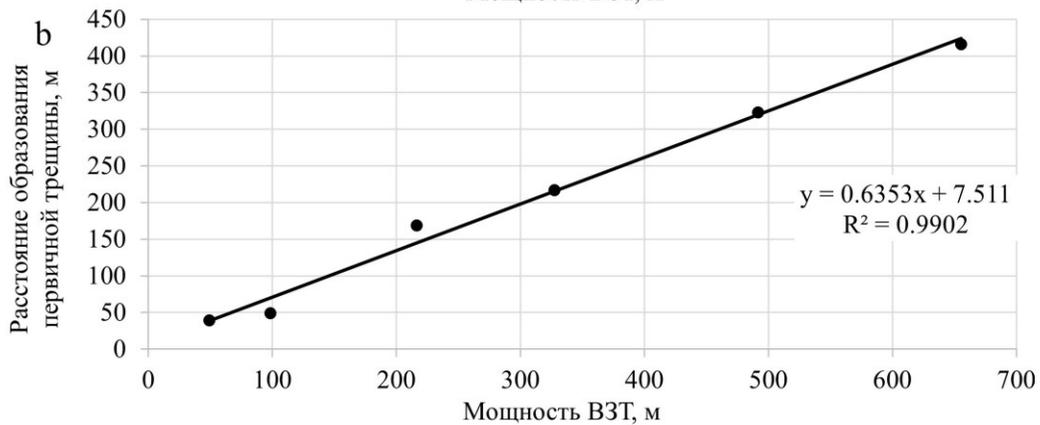
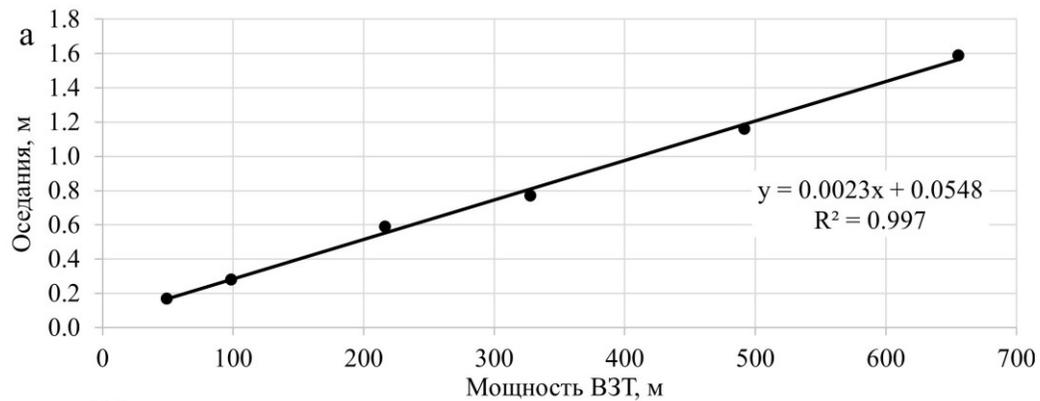
*Публикации в прочих изданиях:*

5. **Беликов, А. А.** Анализ крупных аварий при подземной разработке соляных пород / А. А. Беликов // 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.

6. **Беликов, А. А.** Прогноз целостности водозащитной толщи при использовании твердеющей закладки / А. А. Беликов // 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.

*Патент:*

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



● Результаты численного моделирования — аппроксимирующее уравнение

Рисунок 6 – Условия генезиса первичной трещины по кровле ВЗТ

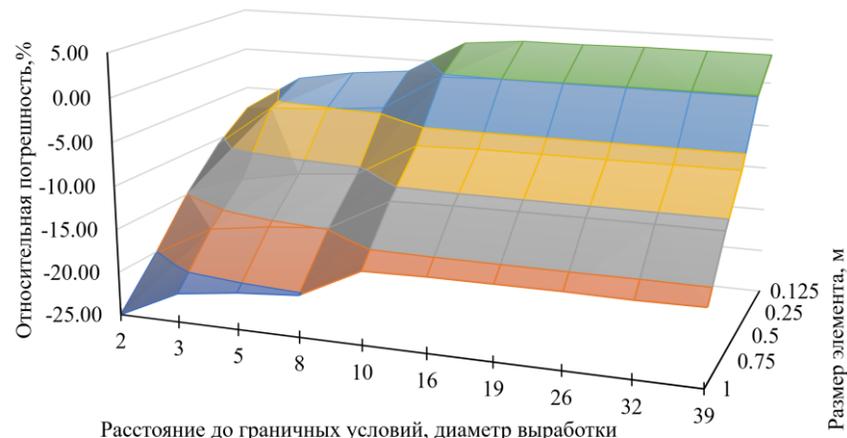


Рисунок 1 – Относительная погрешность в результатах прогноза деформаций ползучести

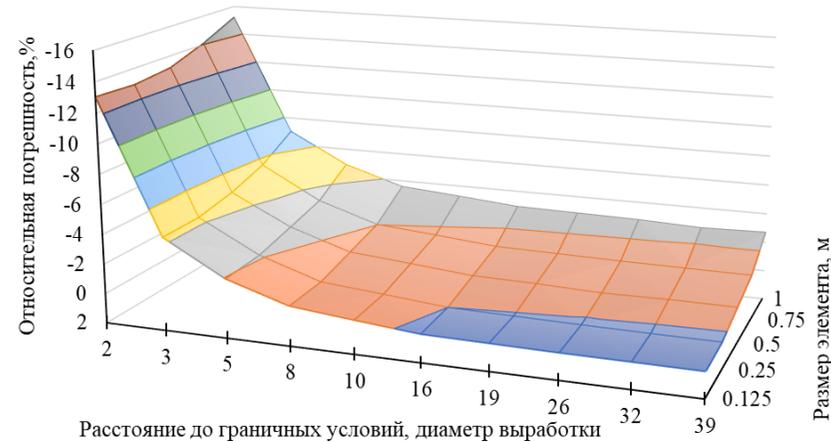


Рисунок 2 – Относительная погрешность в результатах прогноза смещений

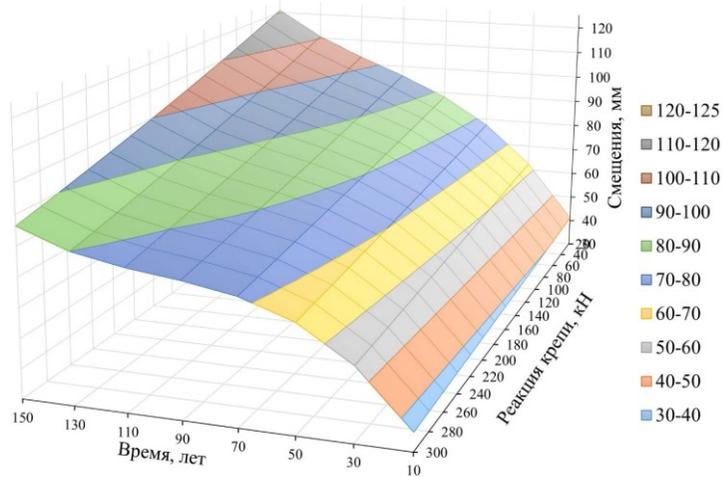


Рисунок 3 – Поверхность горизонтальных смещений боковой поверхности закреплённого целика; цветом обозначена величина смещения

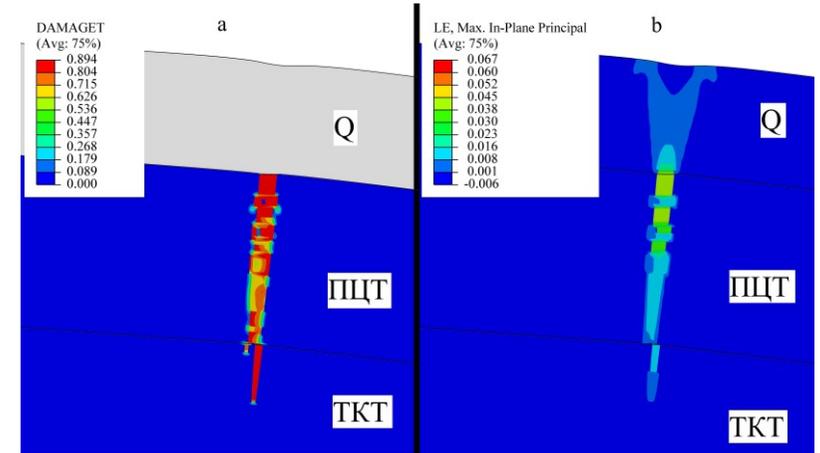


Рисунок 4 – Образование первичной трещины по кровле ВЗТ  
 а – показатель повреждённости материала\*,  
 б – максимальные относительные деформации

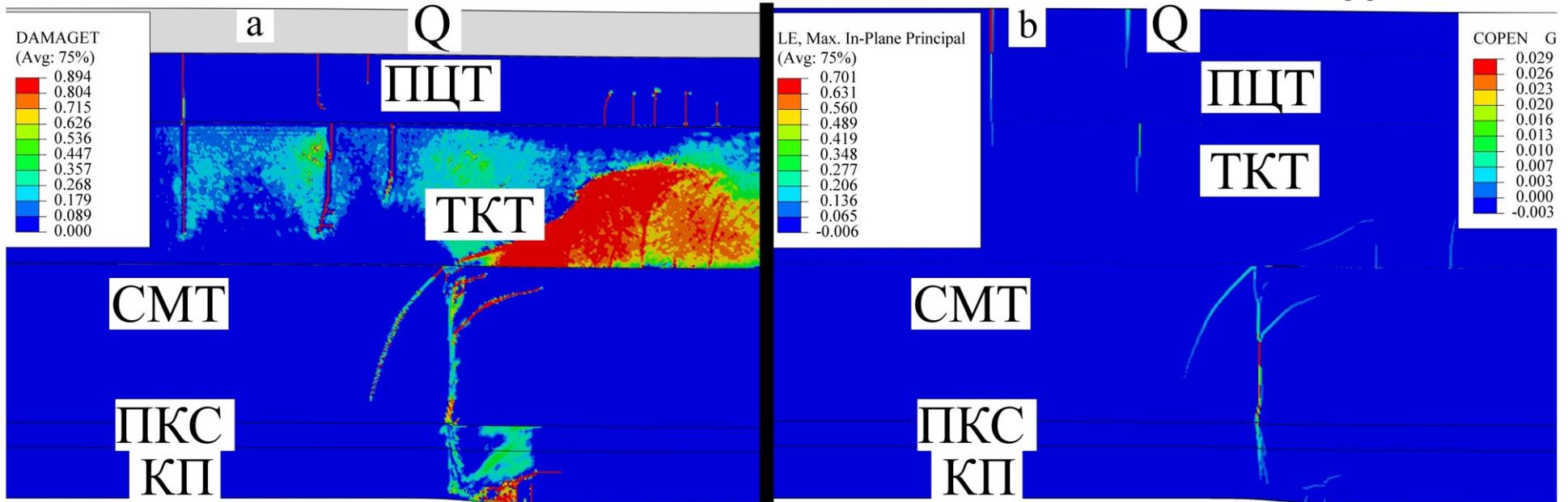


Рисунок 5 – Гидравлически связанная система трещин

а – показатель повреждённости материала\*, б – максимальные относительные деформации

\* Примечание: показатель повреждённости материала – это относительная потерянная доля начального модуля деформации