

*На правах рукописи*

**Катеров Андрей Максимович**



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ  
КРЕПИ ГЛУБОКИХ СТВОЛОВ ПРИ ОСВОЕНИИ  
КАЛИЙНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ В СЛОЖНЫХ ГОРНО-  
ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

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

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

Санкт-Петербург – 2023

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

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор

*Протосеня Анатолий Григорьевич*

**Официальные оппоненты:**

*Саммаль Андрей Сергеевич*

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Тюльский государственный университет», кафедра механики материалов, профессор;

*Лебедев Михаил Олегович*

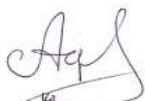
кандидат технических наук, доцент, открытое акционерное общество «Научно-исследовательский, проектно-изыскательский институт «Ленметрогипротранс», заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе.

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

Защита диссертации состоится **14 сентября 2023 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория 1171а.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).  
Автореферат разослан 14 июля 2023 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ  
Павел Игоревич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Вертикальные стволы являются основными магистралями как для доступа к глубоким месторождениям полезных ископаемых, так и для выдачи полезного ископаемого на земную поверхность. Они относятся к повышенной категории ответственности по надежности. Повреждение или разрушение крепи вертикальных стволов сопряжено с продолжительным периодом выполнения ремонтных работ, что определяется существенными материальными и трудовыми затратами, а также вынужденными простоями горного производства.

Строительство подземных сооружений в осадочных породах всегда сопряжено с развитием деформаций контура породного обнажения, величина которых определяется как механическими характеристиками самих пород, так и величиной напряженного состояния породного массива. При строительстве в породах, относящихся по СП 91.13330.2012 к I-III категорий устойчивости, обеспечение нормального технического состояния крепи вертикальных стволов не представляет значительных трудностей, а методики расчета крепей и конструкции крепей вертикальных стволов детерминированы, но при переходе к породам IV категории устойчивости возникают значительные трудности, а сами расчеты крепей и выбор их параметров рекомендуется выполнять на основе методик специализированных организаций. Такие породы как правило обладают склонностью к развитию длительных деформаций, а смещения породного контура и нагрузка на крепь развиваются во времени. Ярким представителем таких пород являются каменная и калийная соли.

В настоящее время в РФ и мире активно осуществляется разработка соляных месторождений на больших глубинах (1000 м и более), к которым можно отнести Гремячинское и Нивенское месторождения в России. Опыт наблюдения за развитием геомеханических процессов соляных пород на столь больших глубинах незначительный, однако разработка соляных месторождений на глубинах 300-500 м показывает, что при строительстве вертикальных стволов в соляных породах возникали

проблемы с обеспечением несущей способности крепи и требуется переход от монолитно-бетонных и железобетонных конструкций к сборным чугунным. Увеличение глубины разработки до глубин 1000 м и более в значительной степени повысит интенсивность развития реологических процессов в породном массиве, напряжения достигнут или даже превысят предел длительной прочности пород. В качестве материала крепи стволов используется высокопрочный железобетон или чугун, что значительно увеличивает стоимость строительства. Типоразмер тубингов и класс материала по прочности определяется величиной нагрузки. Альтернативным способом обеспечения устойчивости стволов в соляных породах является разработка и применение крепей с компенсационным слоем, однако методика прогноза напряженного состояния таких видов крепей еще не в полной мере обоснована и не внедрена в практику проектирования и нормативные документы.

Таким образом, повышение достоверности прогноза развития деформаций породного массива, величин нагрузок на крепь и поиск новых конструктивных решений является актуальной задачей, позволяющей найти оптимальное решение, обеспечивающее надежность крепи при минимизации затрат.

#### **Степень разработанности темы исследования**

Проблемы прогноза напряженно-деформированного состояния массива соляных пород с учетом развития реологических процессов нашли отражения в трудах таких ученых и специалистов как А.А. Барях, Ж.С. Ержанов, С.А. Константинова, Ю.А. Кашников, В.Н. Аптуков, С.Г. Ашихмин, В.А. Соловьев, Н.М. Качурин, И.Б. Ваулина, В.Я. Прушак, В.А. Губанов, А.Н. Башура, В.В.Тарасов.

Большое внимание вопросам описания механизма развития реологических процессов солей и созданию геоматематических моделей было уделено в работах следующих отечественных и зарубежных авторов: А.Н. Ставрогин, А.М. Козела, А.Г. Оловянного, А.О. Ермашова, U. Hunsche, A. Hampel, D.E. Munson, P.R. Dawson, N. D. Cristescu, L. L. Van Sambeek, R.M. Günther, K. Salzer, W. Minkley, Z. Hou и других.

Решению геомеханических проблем по прогнозу нагрузок на крепь вертикальных стволов посвящены работы многих российских

и зарубежных ученых: Д. Даниэля, О. Домка, Г. Линка, Ф. Мора, А.Г. Протосени, Н.С. Булычева, А.Г. Оловянного, А.М. Козела, М. Худека, Г.М. Саркисова, А.А. Репко, Г.А. Крупенникова, Н.А. Филатова, К.В. Руппенейта, В.А. Лыткина, М.А. Долгих, А.Н. Драновского, Н.И. Фотиевой, Б.З. Амузина, И.И. Савина, В.А. Борисова, М.А. Карасева и др.

В большинстве случаев решения получены в плоской постановке с представлением чугуновой тубинговой крепи как многослойной конструкции, обладающей различными прочностными показателями, что в свою очередь не очень точно соотносится с решением пространственной задачи, учитывающей развитие напряженно-деформированного состояния крепи ствола с учетом геометрической конфигурации.

Вместе с тем, к настоящему времени не разработан комплексный подход, обеспечивающего повышенную точность подбора параметров крепи. Разработка такого подхода, является актуальной задачей, позволяющий учесть развитие напряженно-деформированного состояния чугуновой тубинговой крепи, представленной в пространственной постановке с учетом пластического течения материала крепи и совместной работы с соляным массивом.

Содержание диссертации **соответствует 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.

**Объект исследований** – Глубокие вертикальные стволы, пройденные в соляном массиве

**Предмет исследований** - конструкция крепи вертикальных стволов, пройденных в соляном массиве, на больших глубинах (свыше 1000 м) в сложных горно-геологических условиях.

**Цель работы** – разработка методики, позволяющей выполнить подбор параметров крепи глубоких стволов, обеспечивающих долговременную устойчивость конструкций и надежность эксплуатации соляных месторождений.

**Идея работы:** для определения параметров крепи глубоких стволов, обеспечивающих долговременную устойчивость конструкций необходимо учитывать геомеханические процессы при эксплуатации стволов с учетом конфигурации и пластического характера деформирования чугунной тубинговой крепи.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения следующих задач:

1. Анализ существующих моделей деформирования соляных пород, конструктивных решений крепи вертикальных стволов и методик расчета параметров.

2. Выявление и анализ развития геомеханических процессов соляного массива при строительстве вертикальных стволов и оценка технического состояния крепи, взаимодействующей с породным массивом.

3. Обобщение результатов натуральных наблюдений за развитием напряженного состояния крепи вертикальных стволов и деформаций породных обнажений на больших глубинах.

4. Определение реологических закономерностей деформирования соляных пород по данным лабораторных испытаний и обоснование модели длительного деформирования соляных пород и ее параметров, отражающих действительный характер ее механического поведения.

5. Разработка численных моделей прогноза напряженно-деформированного состояния породного массива системы “крепь вертикального ствола – породный массив” для протяженного участка.

6. Совершенствование методики расчета крепей вертикальных стволов в соляных породах на больших глубинах и разработка конструкций крепи, обеспечивающих безопасный режим работы в течении всего срока эксплуатации.

**Научная новизна работы:**

1. Получены закономерности развития напряженно-деформированного состояния крепей вертикальных стволов во времени в зависимости от принятой конструкции крепи и ее параметров.

2. Получены уточняющие коэффициенты для перехода от величин напряжений, реализуемых в чугунной тубинговой крепи, представленной как многослойная среда, к напряжениям с учетом объемной геометрической конфигурации крепи.

3. Разработана методика построения численных моделей прогноза напряженно-деформированного состояния системы “крепь глубокого вертикального ствола – соляной породный массив” включая и участки контакта двух породных слоев, обладающих различными деформационными характеристиками.

4. Усовершенствована методика расчета нагрузок на крепь и выбора типа и параметров крепи глубоких вертикальных стволов соляных месторождений.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Разработка численной модели прогноза напряженно-деформированного состояния породного массива системы “крепь вертикального ствола – породный массив”.

2. Разработка методики расчета крепей глубоких вертикальных стволов в соляных породах.

3. Разработка новых и совершенствование существующих конструкций крепей глубоких вертикальных стволов на протяженных участках.

4. Результаты и рекомендации диссертационной работы приняты к использованию при определении параметров крепи вертикальных стволов на различных месторождениях полезных ископаемых, добываемых подземным способом, и применены в проектной деятельности компании АО «Гипроцветмет». Акт о

внедрении от 27.04.2023 г., утвержден генеральным директором Липницким Н.А.

**Методология и методы исследования.** Проведение исследований осуществлялось с использованием комплексных методов и подходов, заключающихся в анализе лабораторных испытаний образцов каменной соли и материала крепи, обеспечивающего податливую работу, численное моделирование геомеханических процессов в окрестности горной выработки и его верификации на основании натуральных данных, полученных на горнодобывающих калийных предприятиях.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Прогноз смещений массива соляных пород, вмещающего горную выработку на больших глубинах, должен учитывать различные стадии ползучести, обусловленные горно-геомеханическими условиями и корректность обоснования размеров численной модели.

2. Прогноз напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола необходимо выполнить в пространственной постановке с учетом ее геометрической конфигурации и нелинейного поведения материала.

3. Выбор параметров крепи вертикального ствола на участке контакта породных слоев должен учитывать геомеханическое поведение массива при формировании напряженно-деформированного состояния ее конструкции.

**Степень достоверности результатов исследования** подтверждается сопоставлением результатов натуральных наблюдений с результатами работ других исследователей, а также с результатами современных методов численного моделирования в рамках механики сплошной среды.

**Апробация результатов.** Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: IV Международной научно-практической конференции "Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование"; XVIII Международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования», 15-21 мая 2022 г., Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский Горный университет; «Всероссийская научно-техническая конференция с участием иностранных специалистов»



Прогноз и предупреждение удароопасности при ведении горных работ, в период с 27 по 30 сентября 2022 года, Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук.

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; обосновании выбора модели соляного массива, описывающей реологические процессы в окрестности горной выработки; подборе и обосновании ее параметров; разработке метода определения минимального размера численной модели соляного массива, вмещающего горную выработку; обработке и анализе результатов численного моделирования; получении закономерностей распределения напряженно-деформированного состояния тубинговой крепи и его развития по трассе вертикального ствола в зоне контакта двух породных слоев; определении параметров комбинированной крепи вертикального ствола для переходной зоны.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 6 печатных работах, в том числе в 1 статье - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент.

**Структура работы.** Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 122 наименования. Диссертация изложена на 153 страницах машинописного текста, содержит 69 рисунков, 23 таблицы.

#### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

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

**В первой главе** рассмотрены конструкции крепи вертикальных стволов, пройденных на калийных месторождениях.

Рассмотрено формирование напряженно-деформированного состояния соляного массива с учетом срока и совместного взаимодействия системы «соляной массив – крепь вертикального ствола». Рассмотрены геомеханические модели, способные достоверно описывать деформационные свойства массива с учетом реологии. Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

**Во второй главе** рассмотрена реологическая модель деформирования соляного массива Double power law. Представлена методика определения реологических параметров модели, а также условия и величина минимального размера численной модели, достоверно описывающей смещения массива соляных пород, вмещающих горную выработку. Также представлены модели деформирования материалов крепи вертикального ствола и выполнен подбор параметров модели на основании лабораторных испытаний. Выявлено, что минимальный размер численной модели массива соляных пород должен составлять не менее 17 эквивалентных радиусов горной выработки, пройденной в массиве.

**В третьей главе** проведены теоретические исследования основных методов прогноза напряженно-деформированного состояния крепи, когда чугунная тубинговая крепь представлена как многослойная среда с различным жесткостными характеристиками. Представлена методика прогноза напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола с учетом геометрической конфигурации рассматриваемой чугунной тубинговой крепи. Получены основные закономерности развития напряженно-деформированного состояния тубинговой крепи, на основании которых определены уточняющие коэффициенты. Приведено обоснование зоны аномального развития напряженно-деформированного ствола на участке контакта двух сред, в одной из которых происходит ярко выраженные реологические процессы, при этом величина смещений многократно превышает величину смещений другой среды.

**Четвертая глава** посвящена подбору и обоснованию параметров комбинированной крепи протяженного участка

вертикального ствола на сопряжении двух породных слоев в горно-геологических условиях Нивенского месторождения.

В **заключении** сформулированы основные научные и практические выводы по работе.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Прогноз смещений массива соляных пород, вмещающего горную выработку на больших глубинах, должен учитывать различные стадии ползучести, обусловленные горно-геомеханическими условиями и корректность обоснования размеров численной модели.**

Для решения задач прогноза напряженно-деформированного состояния массива соляных пород численным моделированием необходимо обосновать модель деформирования, достоверно описывающую смещения породного контура в окрестности горной выработки. При расчете смещений, реализуемых вокруг глубоких горных выработок, в частности вертикальных стволов, необходимо учитывать реологические свойства соляного массива, а следовательно, и фактор времени.

На основании анализа моделей деформирования соляных пород, позволяющих описывать реологические процессы, а также развития напряженно-деформированного состояния крепи вертикальных стволов, при определении деформации ползучести ограничиваются стадией установившейся ползучести. Для описания реологических процессов, реализуемых в массиве соляных пород, применим модель Double Power Law, описывающую стадию установившейся ползучести, что позволяет достоверно выполнить прогноз развития деформаций в срок эксплуатации до 50 лет и более.

Достоверность прогноза реологических процессов в окрестности горной выработки напрямую зависят от постановки задачи, одним из критериев которой является размер численной модели. В рамках исследования определялся минимальный размер численной модели, позволяющий избежать влияния граничных условий на результаты прогноза напряженно-деформированного состояния соляного массива, вмещающего горную выработку.

Влияние геометрических размеров численной модели исследовалось в плоской постановке и определялось для контура горной выработки, а также для двух точек, расположенных в соляном массиве на расстоянии от контура 3,0 и 6,0 м (рисунок 1, а). В качестве шага увеличения размера численной модели использовался эквивалентный радиус горной выработки, пройденной в соляном массиве, что позволяет унифицировать и определить размер численной модели. Расчетная схема испытаний в осесимметричной постановке (рисунок 1, б) представляет из себя участок соляного массива с гидростатическим полем напряжений, ограниченным от перемещений вдоль осей X и Y.

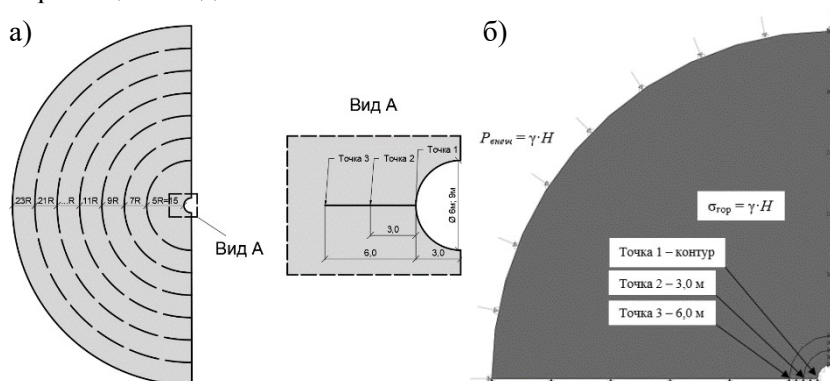


Рисунок 1 – Постановка задачи определения влияния размера численной модели:

- а – общий вид численной модели, при определении влияния геометрических размеров на прогноз смещений контура; б – расчетная схема численной модели.

Из результатов численного моделирования следует (таблица 1), что затухание влияния внешних границ численной модели можно отметить с 13 эквивалентных радиусов, однако наименьшее влияние менее 1% наблюдается с 17 эквивалентных радиусов. Для прогноза напряженно-деформированного состояния соляного массива в окрестности вертикального ствола минимальный размер численной модели должен составлять не менее 17 эквивалентных радиуса.

Дальнейшее построение численных моделей при разработке методики прогноза напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола учитывало минимально допустимый размер численной модели.

**2. Прогноз напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола необходимо выполнять в пространственной постановке с учетом ее геометрической конфигурации и нелинейного поведения материала.**

В соответствии с существующими методиками расчета напряженно-деформированного состояния тубинговой крепи вертикальных стволов в большинстве случаев прогноз выполняется в плоской постановке без учета геометрической конфигурации тубинговой крепи, что не позволяет численно и качественно оценить место развития предельных напряжений, а также выделить те или иные слабые места конструкции. Этим обуславливается необходимость разработки подхода к прогнозу напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола (рисунок 2).

Для сравнения численных методик прогноза напряженно-деформированного состояния (НДС) тубинговой крепи была построена численная модель участка соляного массива с высотой, равной высоте сегмента чугунной обделки 1,5 м. Геометрическая конфигурация массива в плане представлена на рисунке 3. Геометрический размер равен 17 эквивалентных радиусам и составляет 70,55 м при диаметре вертикального ствола в проходке равным 4,15 м. Смещения по нижней и боковым границам модели запрещены в направлении ортогональным к данным поверхностям. К верхней границе модели приложено напряжение в соответствии с градиентом развития горного давления 0,0226 МПа/м, которое составило 22,6 МПа для рассматриваемой глубины в 1000 м. Распределение напряжений в соляной толще принято гидростатическим. Температура породного массива принята равной 303 К. Напряжения в крепи определялись на основании накопленных деформаций соляного массива за 50 лет.

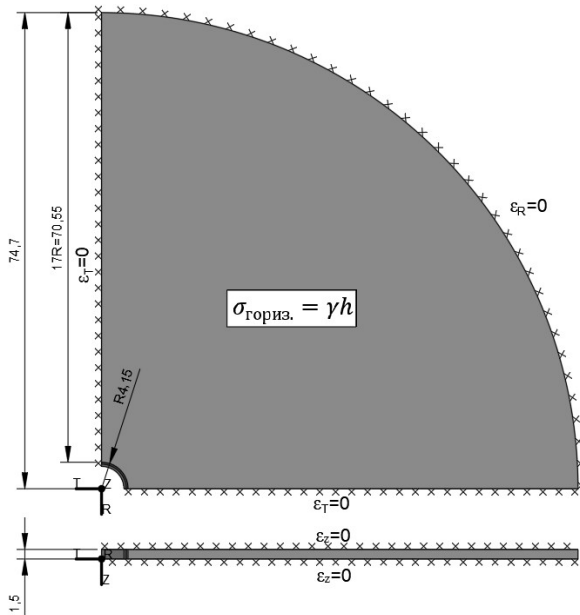


Рисунок 3 – Расчетная схема сравнения методик прогноза напряженно-деформированного состояния комбинированной трубинговой крепи вертикального ствола.

Реологические параметры модели деформирования соляного массива (таблица 2) подбирались, решая обратную геомеханическую задачу и сопоставляя с натурными данными, полученными при наблюдении конвергенции горизонтальной горной выработки, пройденной в соляном массиве на глубине 950 м. Зависимость между приращением деформаций ползучести и состоянием породного массива (1):

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = A_1 \exp\left(-\frac{B_1}{\theta - \theta_z}\right) \cdot \left(\frac{q}{\sigma_0}\right)^{C_1} + A_2 \exp\left(-\frac{B_2}{\theta - \theta_z}\right) \cdot \left(\frac{q}{\sigma_0}\right)^{C_2}, \quad (1)$$

где  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  – реологические параметры модели;  $\theta$  – температура породы;  $\theta_z$  – температура абсолютного нуля;  $\sigma_0$  – регулирующий параметр, принимаемый равным 1 МПа;  $q$  – интенсивность касательных напряжений.

Таблица 2 - Реологические постоянные для модели Double Power Law

$A_1$	$A_2$	$B_1$	$B_2$	$C_1$	$C_2$	$\sigma_0$
0,04	0,019	4800	7800	2,4	6,8	1

Установлено, что развитие НДС крепи вертикального ствола с применением плоской модели значительно превышает результаты прогноза, полученными для объемных постановок. На рисунке 4 наглядно представлена эпюра развития тангенциальных напряжений в тубинговой крепи с учетом упругого поведения чугунной крепи, показывая участки концентрации напряжений, требующие большего внимания при подборе параметров тубинга. Для повышения достоверности прогноза учитывается пластическое поведение чугуна, применение пластической модели Cast Iron Plasticity, позволяющей реализовывать накопленные напряжения на деформации, вызванные радиальными напряжениями. Эпюра развития максимальных тангенциальных напряжений с учетом пластического поведения чугуна представлена на рисунке 5.

Результаты прогноза позволяют сделать выводы, что величины НДС, полученные при решении плоской задачи (Рисунок 4, а), превышают результаты объемной постановки для многослойной среды (Рисунок 4, б) на 17% и 28% для объемной постановки с представлением геометрической конфигурации тубингового кольца (Рисунок 4, в).

Формирование напряженного состояния крепи ствола, расположенного в соляном массиве, на его протяженном участке, показывает, что применение упругой модели деформирования материала крепи при решении задачи в пространственной постановке (Рисунок 5, а), дает завышенные результаты по сравнению с использованием упругопластической модели (Рисунок 5, в). Разница в результатах составила 10%

**3. Выбор параметров крепи вертикального ствола на участке контакта породных слоев должен учитывать геомеханическое поведение массива при формировании напряженно-деформированного состояния ее конструкции.**

Прогноз напряженно-деформированного состояния крепи должен учитывать развитие взаимодействия породных слоев, слагающих массив горных пород. При пресечении зоны перехода от

прочных пород к соляным породам, склонным к интенсивному развитию реологических процессов вблизи горной выработки приводит к формированию зоны влияния, которую необходимо учитывать при подборе параметров. Под переходной зоной понимается контакт двух породных слоев: один из которых представлен прочными породами, для калийных месторождений – ангидрит-доломиты и второй слой соляных пород, обладающих ярко выраженными деформациями, вызванными развитием реологических процессов, приводящим к формированию сложного напряженно-деформированного состояния массива.

Для оценки напряженно-деформированного состояния массива, вмещающего вертикальный ствол, разработана численная модель (Рисунок 6) для изучения зоны развития НДС крепи вблизи контакта слоев.

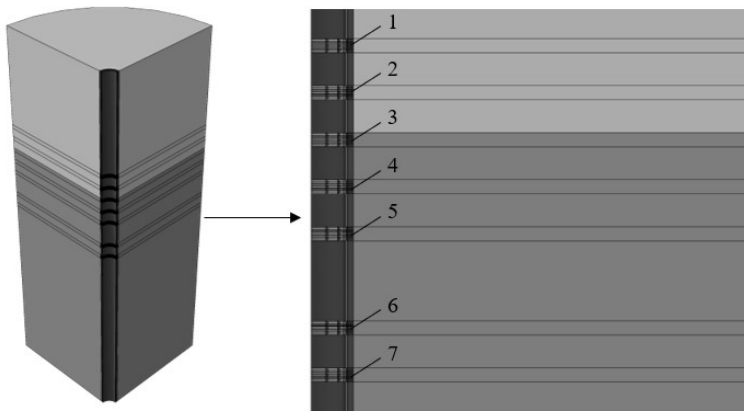


Рисунок 6 - Схема расположения участков измерения напряжений по трассе ствола в крепи: 1-7 – положения участков, в которых выполнены замеры напряженного состояния крепи.

Результаты прогноза напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола по трассе протяженного участка (рисунок 7), полученные при сравнении развития тангенциальных напряжений в чугунной тубинговой крепи ствола с учетом геометрической конфигурации конструкции для упругой



модели деформирования чугуна и пластической  $\sigma_{\text{упр}}/\sigma_{\text{пласт}}$  (рисунок 7, а). На рисунке (рисунок 7, б) представлены результаты расчета при решении объемной задачи, где тубинговая крепь представлена как многослойная среда учитывающая упругое поведения чугуна с результатами, полученными при решении объемной задачи с учетом геометрической конфигурации крепи и учетом пластических деформаций  $\sigma_{\text{танг.упр}}/\sigma_{\text{танг.пласт}}$  по трассе рассматриваемого участка ствола.

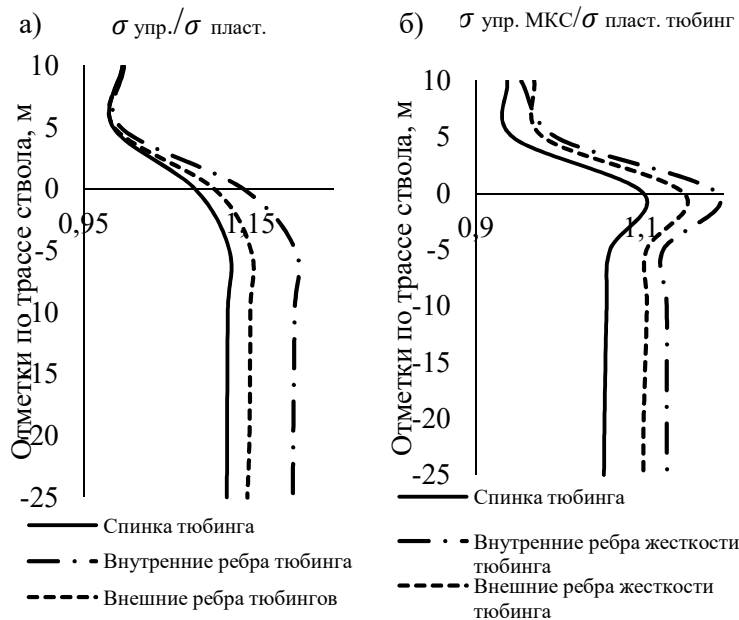


Рисунок 7 – Результаты прогноза тангенциальных напряжений по трассе ствола на участке контакта породных слоев (а) для упругого и пластического законов деформирования чугунной крепи; (б) для многослойной крепи с учетом упругого деформирования чугуна и с учетом геометрической конфигурации крепи, учитывая пластическое поведение чугуна.

Результаты численного моделирования показали, что зона влияния участка контакта породных слоев составляет 10 метров и распространяется равномерно по 5 метров в смежных породах.

Определены величины переводных коэффициентов для участка переходной зоны, обеспечивающие переход от рассмотрения упрощенного расчета напряженно-деформированного состояния чугунной тюбинговой крепи описанной в рамках теории упругости, представленной как многослойная среда к напряженно-деформированному состоянию чугунной тюбинговой крепи учитывающей пространственную конфигурацию и пластическое течение материала крепи: для спинки тюбинга 1,1; для внутренних ребер жесткости – 1,2; для внешних ребер жесткости – 1,15. Стоит отметить, что для участка крепи, расположенного в прочных породах значения вне зоны влияния контакта равны для спинки – 0,9; для внутренних ребер жесткости – 0,95; для внешних ребер жесткости 0,97. Для участка вне зоны влияния, расположенного в соляном массиве переводные коэффициенты равны для спинки тюбинга – 1,05; для внутренних ребер жесткости – 1,13; для внешних ребер жесткости – 1,1.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе представлены результаты пространственного численного моделирования различных комбинированных конструкций крепи вертикальных стволов, пройденных в соляных массивах. По результатам диссертационной работы получены следующие выводы и рекомендации:

1. Выполненные исследования подтвердили, что прогноз напряженно-деформированного состояния чугунной тюбинговой крепи необходимо выполнять с учетом геометрической конфигурации конструкции.

2. Установлено, что при расчете конструкции необходимо учитывать пластическое поведение чугуна, рассматриваемого в качестве материала постоянной крепи.

3. Разработана методика построения численной модели прогноза напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола, пройденного в соляных породах на больших глубинах.

4. Определена зона развития напряженно-деформированного состояния массива горных пород на контакте двух породных слоев,

один из которых описывается уравнениями нелинейной ползучести, а второй - теории пластичности, приводящая к неравномерному развитию напряжений в крепи по трассе вертикального ствола.

5. На основе полученных данных выполнено обоснование переводных коэффициентов, позволяющих уточнить величины тангенциальных напряжений в чугунной тубинговой крепи описанной в рамках теории упругости, представленной как многослойная среда к величинам напряженно-деформированного состояния чугунной тубинговой крепи, учитывающей пространственную конфигурацию и пластическое течение материала крепи.

6. В рамках диссертационной работы предложена комбинированная конструкция крепи, обеспечивающая компенсацию напряжений, развивающихся в переходной зоне и на участке соляных пород.

Дальнейшее развитие темы диссертации предполагает проведение исследований, направленных на разработку нормативной документации, учитывающей развитие напряжений в крепи, реализуемых за счет реологических процессов.

#### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Протосеня, А.Г. Анализ подходов к прогнозу напряженно-деформированного состояния крепи вертикального ствола, пройденного в соляном массиве/ Протосеня А.Г., Карасев М.А., Катеров А.М., Петрушин В.В. // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2023. – № 19. – С. 129-137. DOI: 10.26160/2658-3305-2023-19-129-137

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

2. Karasev, M.A. Analysis of shaft lining stress state in anhydrite-rock salt transition zone/ Karasev M.A., Protosenya A.G., Katerov A.M., Petrushin V.V // Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik. – 2022. – Volume 37(1). – №. 57, – PP. 151–162. DOI: 10.17794/rgn.2022.1.13.

3. Protosenya, A.G. Development of stress and strain state of combined support for a vertical shaft driven in salt massif / Protosenya A.G., Katerov A.M. // Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2022. – № 6-1. – P. 100-113.

4. Protosenya, A.G. Substantiation of rheological model parameters for salt rock mass / Protosenya A.G., Katerov A.M. // Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2023. – № 3. – P. 16–28.

*Публикации в прочих изданиях:*

5. Катеров, А.М. Прогноз напряженного состояния комбинированной крепи ствола в переходной зоне // Тезисы докладов IV Международной научно-практической конференции «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование. – 2021. – С. 53-54.

6. Катеров, А.М. Анализ работы комбинированной крепи вертикального ствола, расположенного на больших глубинах в соляном массиве // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции с участием иностранных специалистов. – 2022. – С. 29-31.

*Патент:*

7. Патент № 2748790 Российская Федерация, МПК E21D 5/11 (2006.01). Способ обеспечения податливости крепи вертикального ствола, расположенного в соляных породах: № 2020135730: заявл. 30.10.2020; опубл. 30.10.2021 / Карасев М.А., Синегубов В.Ю., Катеров А.М.; заявитель СПГУ. - 9 с.: 5 ил.

Таблица 1 – Результаты прогноза смещений соляного массива в окрестности вертикального ствола.

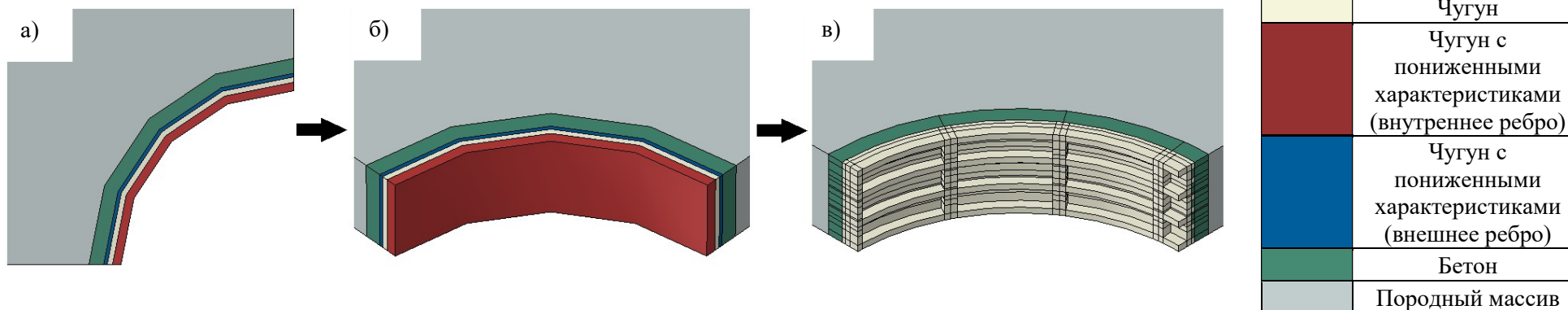
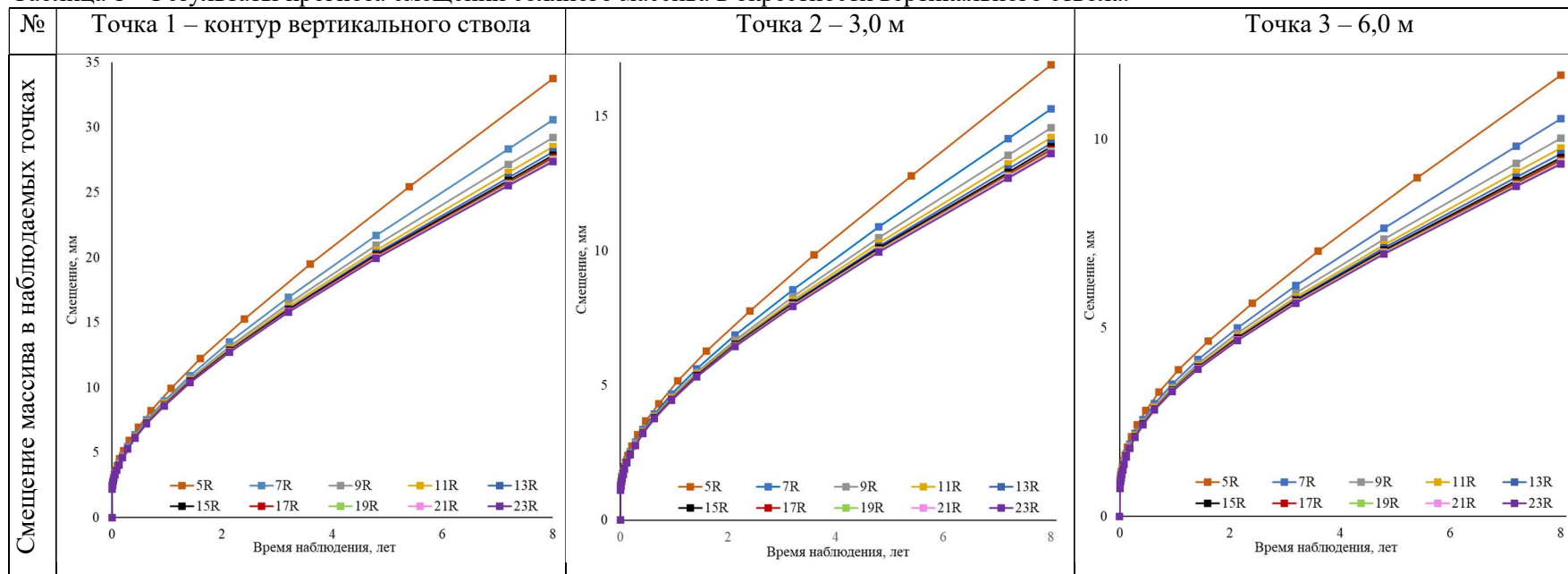


Рисунок 2 - Методы моделирования тубинговой крепи: а) расчетное представление тубинговой крепи как многослойной конструкции в плоской постановке б) расчетное представление тубинговой крепи как многослойной конструкции в объемной постановке; в) расчетное представление тубинговой крепи в условиях осесимметричной постановки.

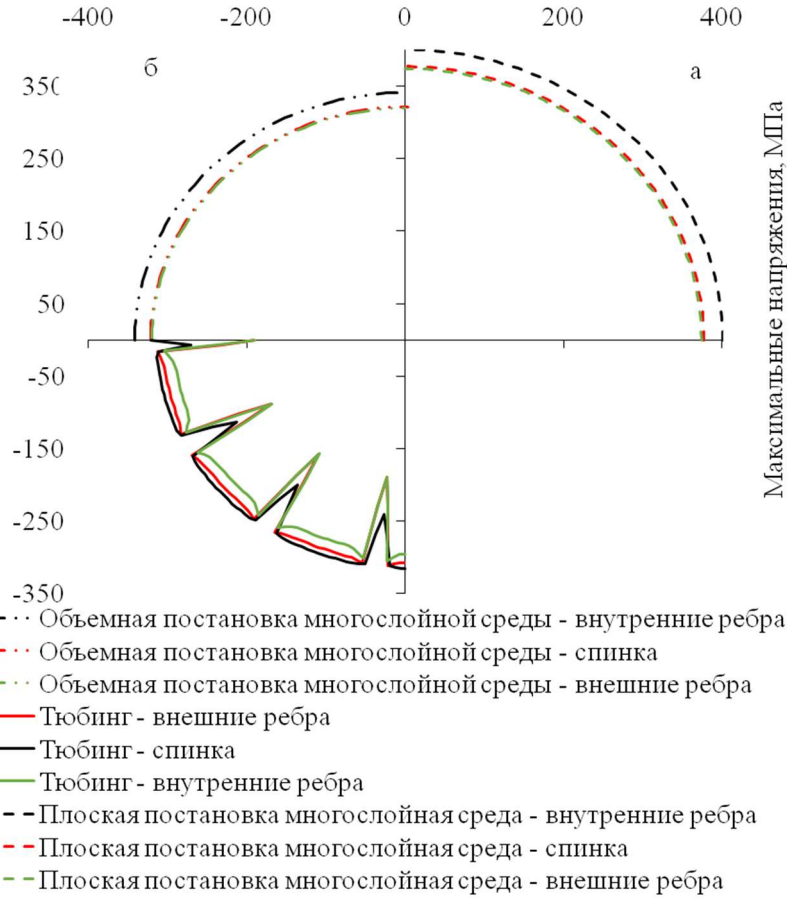


Рисунок 4 - Развитие НДС в конструктивных элементах тюбинга для сечения на глубине 1000 м. (а) Плоская постановка, крепь представлена как многослойная среда; (б) пространственная постановка, крепь с учетом геометрической конфигурации тюбинговой крепи; (в) пространственная постановка, крепь представлена как многослойная среда.

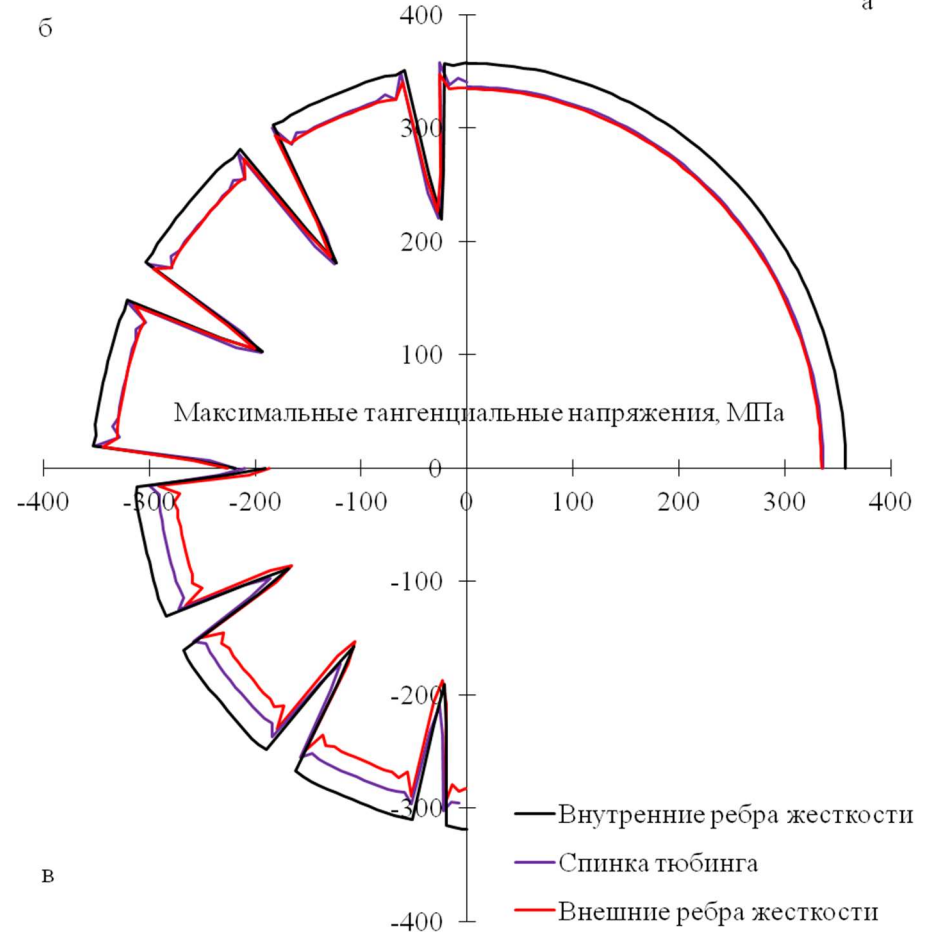


Рисунок 5 – Эпюра развития максимальных тангенциальных напряжений, реализуемых в тюбинговой крепи: (а) чугунная тюбинговая крепь представлена как многослойная среда, чугун деформируется в рамках теории упругости; (б) тюбинговая крепь с учетом геометрической конфигурации, чугун деформируется в рамках теории упругости; (в) тюбинговая крепь с учетом геометрической конфигурации, чугун деформируется с учетом пластического поведения.