

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСИС»

Кириенко Юрий Анатольевич

**ПРОГНОЗ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
КРЕПИ СОПРЯЖЕНИЙ СТВОЛОВ В СОЛЯНЫХ ПОРОДАХ**

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

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор
Плешко Михаил Степанович

Москва, 2025

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Особое место в комплексе стволов шахт и рудников по добыче калийных и магниевых солей занимают участки сопряжений вертикальных выработок с подземными горизонтами, сооружаемые в породах соленосной толщи, склонных к длительной ползучести. Строительство и эксплуатация сопряжений в таких условиях сопряжено со значительными материальными и трудовыми затратами. Например, на всех стволах Солигорского и Верхнекамских калийных рудников выявлены разрушения крепи и армировки в районах сопряжений с горизонтальными выработками. Аналогичная картина наблюдалась в процессе эксплуатации и строительства шахтных стволов на Солотвинском руднике и руднике им. 50-летия Октября на Прикарпатском месторождении, скипового ствола рудника «Интернациональный» АК «АЛРОСА», где стволы деформировались на участках сопряжений, закрепленных чугунными тубингами.

Перечисленные примеры свидетельствуют о том, что применяемые конструкции крепи в районе сопряжений стволов калийных рудников в большинстве случаев не соответствуют условиям ее работы. Безремонтный срок эксплуатации крепи при этом не превышает 5-7 лет.

В этой связи возникает необходимость пересмотра подходов к определению параметров крепи и способов обеспечения устойчивого состояния сопряжений стволов и необходимой долговечности крепи в породах, склонных к длительной ползучести. Решению такой задачи и посвящена настоящая диссертационная работа.

Многолетними усилиями отечественных ученых и специалистов накоплен представительный опыт по обеспечению устойчивости вертикальных стволов горных предприятий, включая участки сопряжений, а также закономерностям проявлений горного давления в околоствольных породах. Представлено множество работ по расчетам крепи горных выработок, их прогнозированию устойчивости, реологическим расчетам и определению механических характеристики каменной соли, мониторингу горных вработок. Большой вклад в решение этих задач внесли Аптуков В.Н., Баклашов И. В., Барях А.А., Ваулина И.Б., Гальперин А.М., Ержанов Ж.С., Зильбершмидт В.Г., Карасев М.А., Карташов Ю.М., Картозия Б.А., Константинова С.А., Проскуряков Н.М., Протосеня А.Г., Саммаль А.С., Соловьев В.А. и многие другие ученые. В их трудах обоснованы эффективные конструкции крепи сопряжений, предусматривающие применение деформационных швов, податливых слоев, разгрузочных щелей и других конструктивных решений.

В тоже время следует отметить, что обеспечение устойчивости участков сопряжений в породах, склонных к длительной ползучести, требует комплексного учета закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) массива соляных пород и крепи сопряжений с учетом их сложной пространственной конфигурации и влияния временного фактора. Ряд теоретических и практических геомеханических вопросов при этом остаются неизученными. Так до настоящего времени не разработан комплексный подход по применению на участках сопряжений нескольких регулятивных элементов, включающих опорные венцы, податливый слой и деформационные швы, что негативно влияет на эффективность применения таких решений на практике.

Цель работы: на основании прогноза геомеханических процессов выполнить обоснование технических решений по повышению долговечности крепи сопряжений стволов различного типа, пройденных в соляных породах.

Идея работы: обеспечение устойчивости сопряжений стволов в соляных породах и повышение долговечности конструкций крепи достигается путем совместного применения податливых, деформационных и опорных регулятивных элементов с оптимальными параметрами, учитывающими закономерности изменения НДС пород соляного массива во времени и пространственную конфигурацию рассматриваемых участков.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо решить следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ опыта эксплуатации и характера разрушений сопряжений стволов в соляных породах.
2. Провести теоретическое обоснование модели деформирования соляных пород для участков сопряжений.
3. Систематизировать объемно-планировочные решения сопряжений. Разработать и валидировать конечно-элементные модели сопряжений.
4. Установить закономерности геомеханических процессов и изменения НДС крепи и пород соленосной толщи на участках сопряжений стволов.
5. Обосновать параметры податливых, деформационных и опорных регулятивных элементов крепи сопряжений в различных условиях.
6. Провести апробацию разработанных решений на практике.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что для обеспечения долговечности крепи сопряжений стволов в соляных породах над и под сопряжением следует возводить участки крепи с податливым слоем, протяжённость которых определяется

установленной корреляционной зависимостью от ожидаемого смещения контура незакрепленной выработки за весь срок её эксплуатации.

2. Определено, что для компенсирования критических концентраций напряжений в тубинговой крепи стволов на участках сопряжений, многократно превышающих средние уровни и обусловленных неравномерностью пространственных деформаций в процессе длительной ползучести соляных пород, требуется размещение выше сопряжения горизонтального осадочного шва, защищенного податливым слоем, на высоту не менее одного тубингового кольца.

3. Доказано, что для повышения долговечности и увеличения запаса несущей способности крепи стволов на участках сопряжений в соляных породах на 20% необходимо применять комплекс конструктивных мер, включающий горизонтальные осадочные швы, податливый слой и опорные венцы, при этом место заложения последних определяется площадью их поперечного сечения и ожидаемыми смещениями контура незакрепленной выработки за проектный срок её службы.

Научная новизна работы:

1. Установлены зависимости размеров участков крепи ствола с податливым слоем от величин максимальных вертикальных смещений свода сопряжения за расчетный срок ее эксплуатации, а также степени неравномерности горизонтальных деформаций контура ствола.

2. Установлены зависимости изменения концентраций напряжений в крепи сопряжений стволов, пройденных в соляных породах, на период эксплуатации 50 лет от соотношения диаметра ствола и площади поперечного сечения сопряжения, учитывающие влияние горизонтального деформационного шва и податливого слоя.

3. Определены параметры податливых, деформационных и опорных регулятивных элементов на участках сопряжений стволов, обеспечивающих уменьшение напряжений в крепи и ее необходимую долговечность при взаимодействии с породами, склонными к длительной ползучести.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: корректной постановкой исследовательских задач, применением как метода конечных элементов в пространственной постановке, так и классических методов механики подземных сооружений, удовлетворительной сходимостью результатов численных экспериментов и данных по натурным исследованиям в условиях Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей, внедрением полученных результатов на практике.

Методология и методы исследования. Проведение диссертационного исследования осуществлялось с использованием комплексных методов и подходов, заключающихся в обобщении и анализе российского и международного опыта оценки напряженно-деформированного состояния соляных пород в окрестности выработок, использовании классических аналитических методов механики подземных сооружений, численных методов моделирования (метод конечных элементов) с проведением процедуры валидации моделей по натурным данным, полученным в условиях Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей.

Практическая значимость работы

1. Разработана конструкция крепи сопряжений с применением податливых, деформационных и опорных регулятивных элементов, обоснованное взаимное расположение которых позволяет перераспределить нагрузку и, тем самым, уменьшить максимальные напряжения в крепи.

2. Разработаны рекомендации по выбору и определению элементов конструкции крепи сопряжений различного типа (сопряжений шахтных стволов с горизонтами, сопряжений общешахтных бункеров с камерой питателей), пройденных в соленосных породах, позволяющих обеспечить их длительную устойчивость.

Реализация выводов и рекомендаций работы. Результаты диссертационной работы реализованы в виде технических решений в проектах по проходе и креплению общешахтного бункера и сопряжений стволов Усольского калийного комбината.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: международный научный симпозиум «Неделя горняка», Москва, 2020 г.; расширенное заседание кафедры «Строительство подземных сооружений и горных предприятий» Москва, 2020, 2021, 2022, 2023 гг.; 18-я международная конференция по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» г. Тула, 2022 г.

Личный вклад автора. Личный вклад автора заключается в теоретическом обосновании модели деформирования соляных пород для участков сопряжений; теоретическом обосновании моделей деформирования соляных пород; систематизации объемно-планировочных решений сопряжений; раз-

работке и валидации пространственных математических моделей и проведении численных экспериментов; установлении закономерностей деформирования соляных пород и изменения напряженно-деформированного состояния крепи сопряжений, разработке рекомендаций по применению крепи с применением податливых, деформационных и опорных регулятивных элементов.

Публикации. Основные положения диссертационной работы опубликованы 4-х печатных работах, в том числе три из них в периодическом научном и научно-образовательном издании Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), индексируемом в базе данных скопус (Scopus) и входящим в перечень ВАК.

Объем работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 разделов с выводами по каждой из них, заключения, списка литературных источников из 93 наименований. Работа изложена на 147 страницах машинописного текста, содержит 71 рисунок и 23 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе представлен анализ научно-технической литературы и нормативных методик по расчету нагрузок на крепь сопряжений вертикальных выработок, описаны и проанализированы существующие подходы по расчету крепи сопряжений горных выработок, пройденных в массиве с ярко выраженными реологическими свойствами. Показано, что для расчета нагрузок на крепь сопряжений стволов в данных условиях некорректно использовать:

- нормативные методики, основанные на методах строительной механики с введением ряда корректирующих эмпирических коэффициентов;
- аналитические решения, основанные на механике сплошной среды.

По результатам анализа сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе выполнен анализ результатов проведенных натурных экспериментов конвергенции породного контура выработок, пройденных в солях. Приведены данные о деформационно-реологических показателях пород для условий верхнекамского месторождения. Выбраны метод расчета и математические модели деформирования соляных пород.

Точность прогноза при численном моделировании значительно зависит от принятой модели механического поведения горного массива и модели контактного взаимодействия. В связи с этим выполнен ряд валидационных расчетов методом конечных элементов для сопоставления с результатами натурных замеров конвергенции.

В расчетной модели массива задавались реологические параметры $\alpha = 0,7$ и $\delta = 0,0044 \text{ с}^{\alpha-1}$, полученные в результате обработки данных натурального эксперимента в условиях Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей для подстилающей каменной соли на глубине $H=480$ м.

Наибольшее распространение в механике горных пород для описания реологических процессов получила теория наследственной ползучести, которая позволяет учитывать историю нагружения тела, а также предоставляет широкие возможности для выбора ядер ползучести различного вида.

Предел длительной прочности солей в условиях одноосного сжатия для Верхнекамского месторождения $\sigma_{\infty} = 0,3 \sigma_{сж.}$, где σ_{∞} – предел длительной прочности.

При нагрузках $\sigma \leq \sigma_{\infty}$ деформирование соляных пород во времени удовлетворительно описывается в рамках теории линейной наследственности с двухпараметрическим ядром ползучести Абеля.

При нагрузках $\sigma \geq \sigma_{\infty}$ размерный параметр ядра ползучести δ с возрастанием нагрузки на породные образцы увеличивается в несколько раз.

Линейно-наследственная теория ползучести применима к соляным породам для уровней нагрузки из области линейности свойств деформаций, границей которой является предел длительной прочности породы.

Чтобы учесть деформации за ее пределом необходимо применение нелинейной модели. Для этого в расчетах для обратимой части деформаций воспользуемся ядром ползучести типа Абеля, а необратимая деформация будет описываться в рамках модели Мизеса с мультилинейным упрочнением.

Таким образом, для описания поведения модели соляных пород принята нелинейная модель пластического тела (модель Мизеса с мультилинейным упрочнением) с параметрами линейной наследственной ползучести.

Далее выполнена систематизация объемно-планировочных решений сопряжений по размерному признаку сопрягающихся выработок. Выделены четыре характерных типа сопряжений, для каждого из них построены расчетные пространственные компьютерные модели (рис. 1). Использовался метод конечных элементов в программном комплексе для геотехнических расчетов Midas FEA NX.

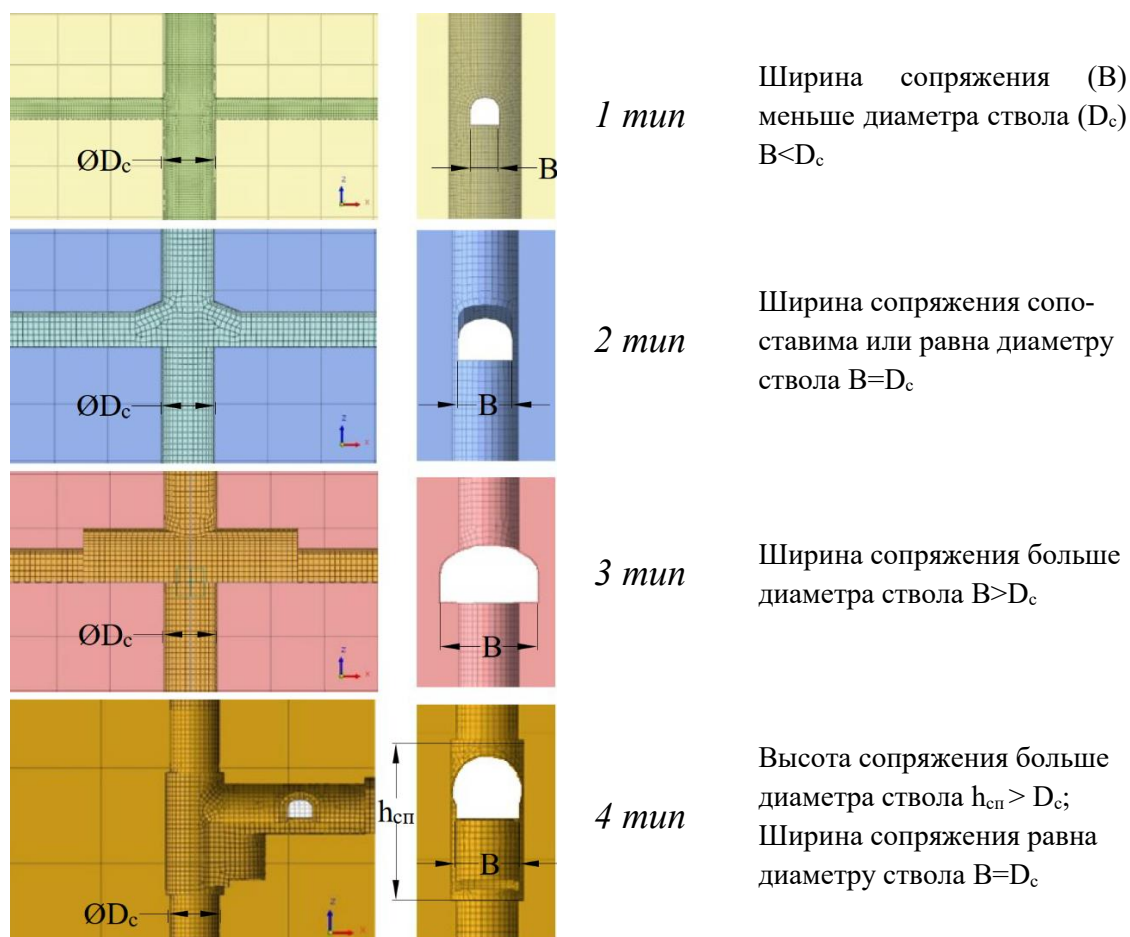


Рисунок 1 – Характерные типы моделей сопряжений, рассмотренные в работе

Защита жесткой крепи сопряжений ствола осуществляется с применением податливого слоя, расположенного между породной стенкой и жесткой крепью. Представляет интерес детальный анализ работы многослойной конструкции крепи узла сопряжения с целью:

- обоснования расположения и определение оптимальной толщины податливого слоя в кровле и боках выработок;
- оценки необходимости, оптимальные расположения и размеры деформационных швов в стволе и сопряжении;
- оценки влияния и оптимальное расположение опорного венца в схеме узла сопряжения ствола с комплексом загрузки скипов.

Пример узла сопряжения с крепью, имеющего податливый слой, приведен на рис. 2.

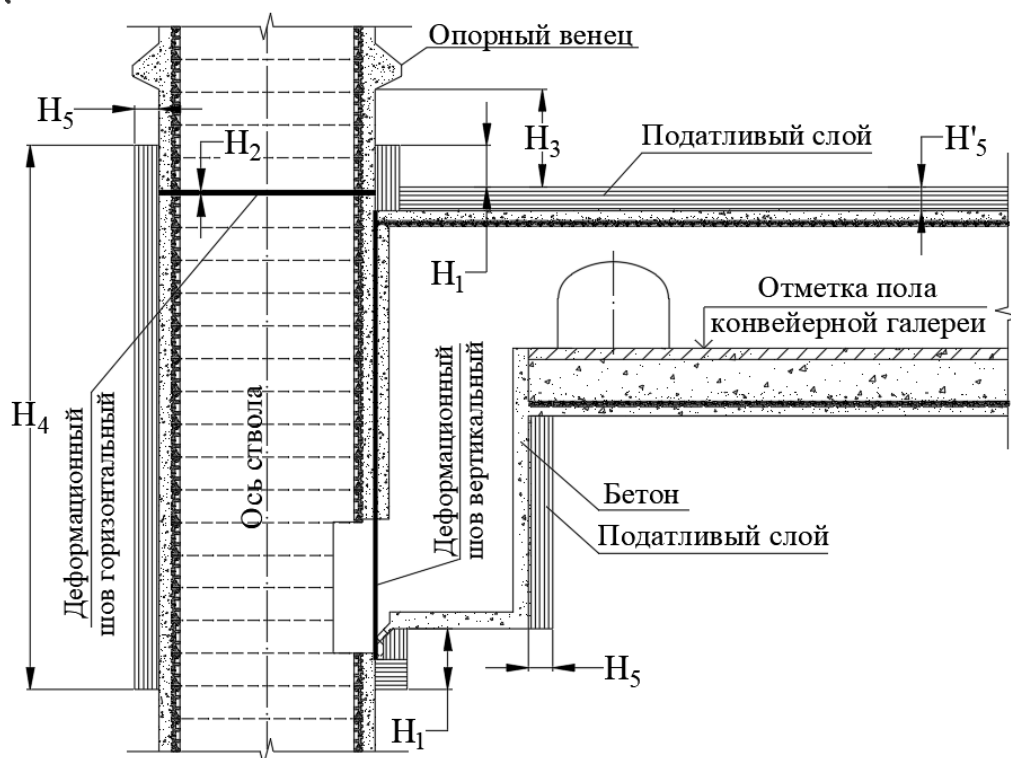


Рисунок 2 – Конструкция крепи сопряжения ствола с горизонтом загрузки скипов

Варьируемые параметры конструкции:

- высота податливого слоя над (под) сопряжением H_1 и общая протяженность податливого слоя ствола H_4 в зоне сопряжения;
- необходимость горизонтального деформационного шва и его рациональное расположение;
- ширина деформационного шва H_2 ;
- расположения опорного венца над (под) сопряжением H_3 .

Толщины податливого слоя H_5 и H'_5 назначаются в зависимости от ожидаемых смещений породного контура выработки за весь срок ее службы. Условия назначения податливого слоя, расположение, толщина и применяемые материалы рассмотрены в работках В.А. Соловьева, С.А. Константиновой, В. Н. Аптукова, И. Б. Ваулиной и др.

Валидация моделей выполнена на основе данных инструментальных замеров вертикальных и горизонтальных смещений контура выработки на период до 50 лет. Также разработана методика проведения расчета прогнозного напряженно-деформированного состояния участков горного массива, вмещающих сопряжения шахтного ствола.

В третьей главе выполнены серии вычислительных экспериментов.

Механизм нагружения крепи в области сопряжения значительно сложнее, чем работа крепи на протяженном участке ствола. Кроме горизонтальной нагрузки возле сопряжения на крепь ствола действуют вертикальные нагрузки, вызванные вертикальными смещениями массива околоствольных пород. По периметру сечения ствола над и под сопряжением вертикальные деформации массива имеют значительную неравномерность.

Выполненные расчеты вертикальных смещений для всех четырех типов сопряжений на расчетный срок работы крепи в соляных породах 50 лет представлены в виде графиков, приведенных на рис. 3 и 4.

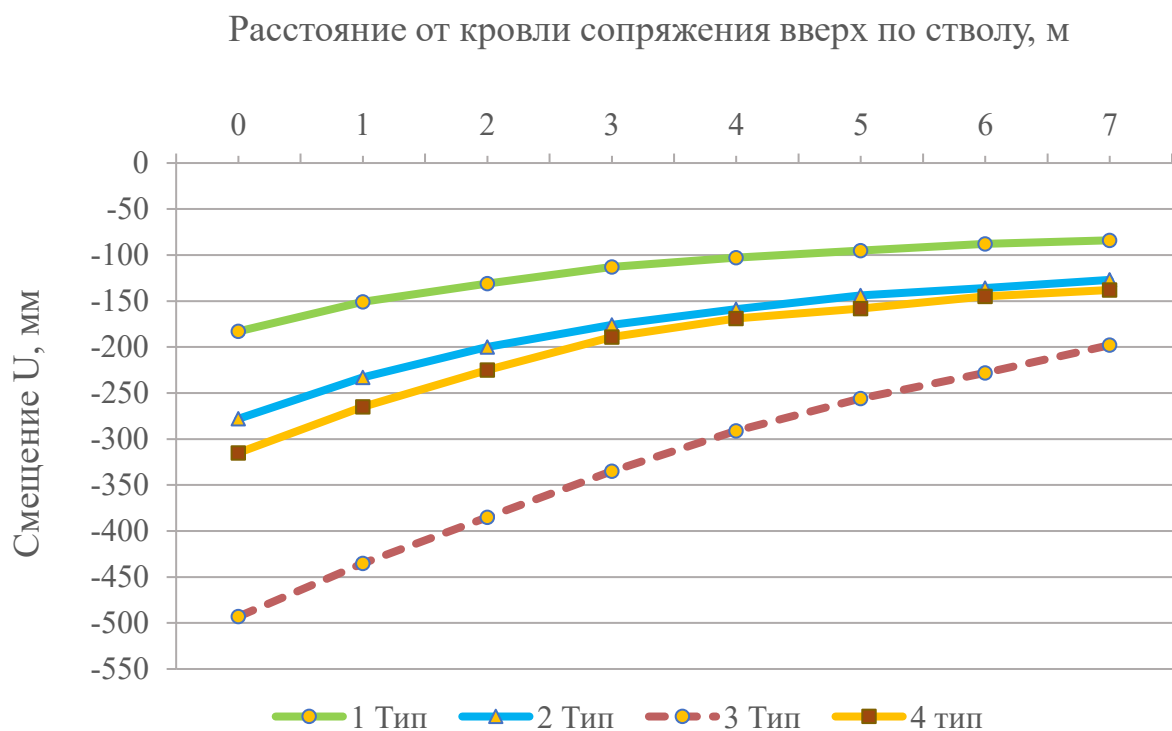


Рисунок 3 – Вертикальные смещения породной стенки ствола на разном удалении вверх от свода сопряжения U в плоскости раскрытия сопряжений

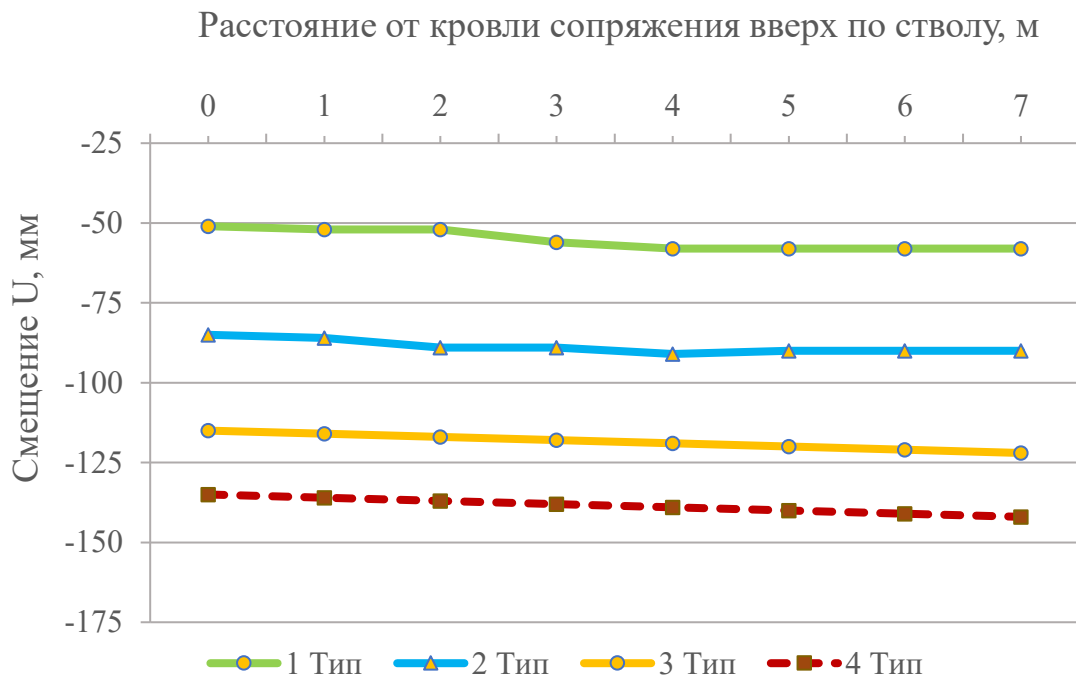


Рисунок 4 – Вертикальные смещения породной стенки ствола на разном удалении вверх от свода сопряжения U в плоскости поперек раскрытия сопряжений

Аналогичным образом проведен анализ горизонтальных смещений.

В результате деформационного процесса сечение ствола в створе сопряжения приобретает эллиптическую форму, характеризующуюся соответствующим эксцентриситетом. Эксцентриситет – числовая характеристика эллиптического сечения, показывающая степень его отклонения от окружности. Он может быть выражен через отношение малой (r_2) и большой (r_1) полуосей:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2} \quad (3)$$

В результате расчетов установлена зависимость эксцентриситета породного контура ствола заданного диаметра от различной ширины сопрягающейся горизонтальной выработки на срок эксплуатации 50 лет. На графике рис. 5 видно, что чем больше пролет сопряжения, тем более неравномерная нагрузка и деформация происходит в стволе, и тем самым, значение эксцентриситета поперечного сечения породного контура ствола над сопряжением растет. На рисунке 6 показана зависимость эксцентриситета ствола от значений максимальных смещений приконтурного массива ствола U (мм) на пе-

риод эксплуатации 50 лет для типа сопряжения №2. Чем ярче выражена реология вмещающего массива, тем большая неравномерность деформаций наблюдается в узле сопряжения.

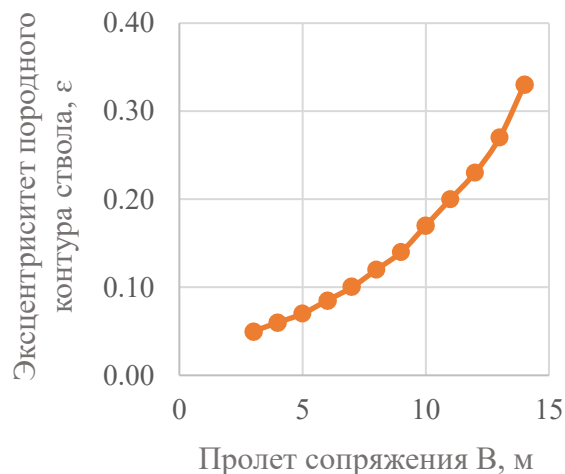


Рисунок 5 - Зависимость эксцентриситета ствола от размеров сопрягаемых выработок

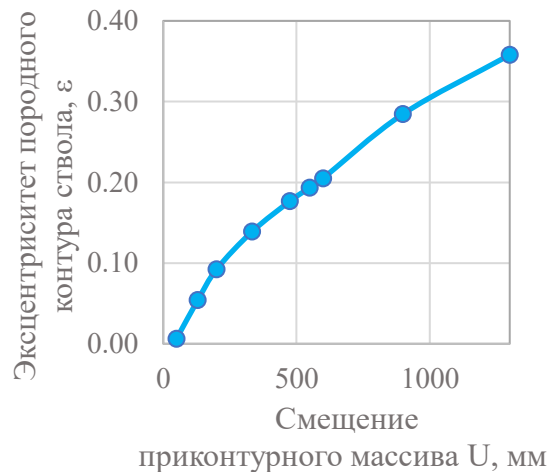


Рисунок 6 - Зависимость изменения эксцентриситета от ожидаемых смещений U. Для типа сопряжения №2

С учетом установленных зависимости далее выполнено поэтапное моделирование работы различных регулятивных элементов для узлов сопряжений в соляных породах, направленных на повышение их устойчивости и долговечности.

Регулятивный элемент № 1 – податливый слой. Податливый слой ствола на участке сопряжения служит для компенсации избыточных и неравномерных деформаций пород. Наибольшие горизонтальные смещения стенок ствола наблюдаются в направлении, перпендикулярном подходным выработкам. В окрестности сопряжения ствол принимает эллипсоидальную форму с эксцентриситетом от $\epsilon = 0,03$ (на расстоянии от сопряжения 25 м) до $\epsilon = 0,26$ (на уровне сопряжения) рис. 7.

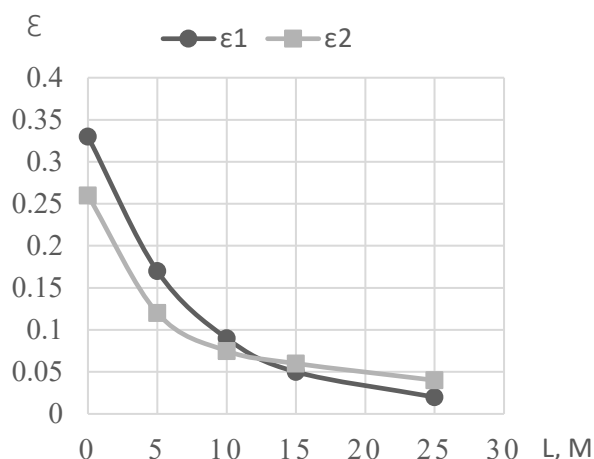


Рисунок 7 – Графики зависимости эксцентриситета ствола от расстояния до сопряжения:

ϵ_1 – эксцентриситет поперечного сечения породного контура ствола к концу срока его эксплуатации без крепи;
 ϵ_2 – эксцентриситет поперечного сечения породного контура закрепленного ствола к концу срока его эксплуатации.

Для определения требуемой протяженности участка крепи с податливым слоем H_1 над или под сопряжением (см. рис. 2.) построен график зависимости величины H_1 от расчетных смещений пород (рис. 8).

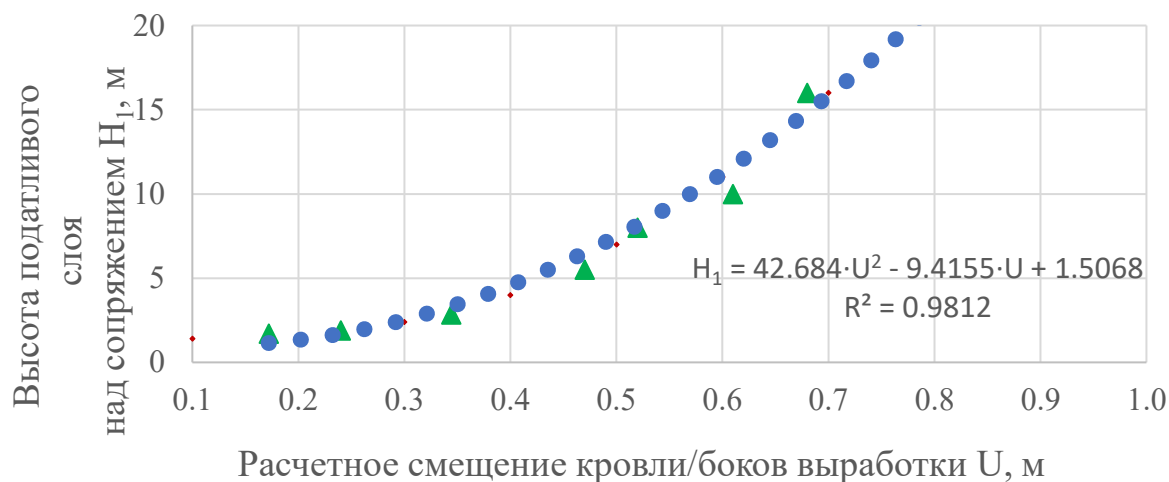


Рисунок 8 – График зависимости высоты податливого слоя от ожидаемых расчетных смещений контура выработки.

С учетом требований СП 91.13330.2012 величину H_1 можно увязать с категорией устойчивости пород (табл. 1).

Таблица 1 – Требуемая протяженность участка крепи с податливым слоем H_1 над или под сопряжением

Категория устойчивости	Ожидаемые смещения, U мм	H_1 , м
I	до 200	< 1,8
II	от 200 до 300	1,8 ÷ 2,2
III	от 300 до 500	2,2 ÷ 7,0
IV	свыше 500	> 7,0

По результатам исследований сформулировано первое научное положение.

Для определения несущей способности тубинговой крепи на участке сопряжений в соляных породах также получены соответствующие зависимости от эксцентриситета контура ствола (рис. 9).

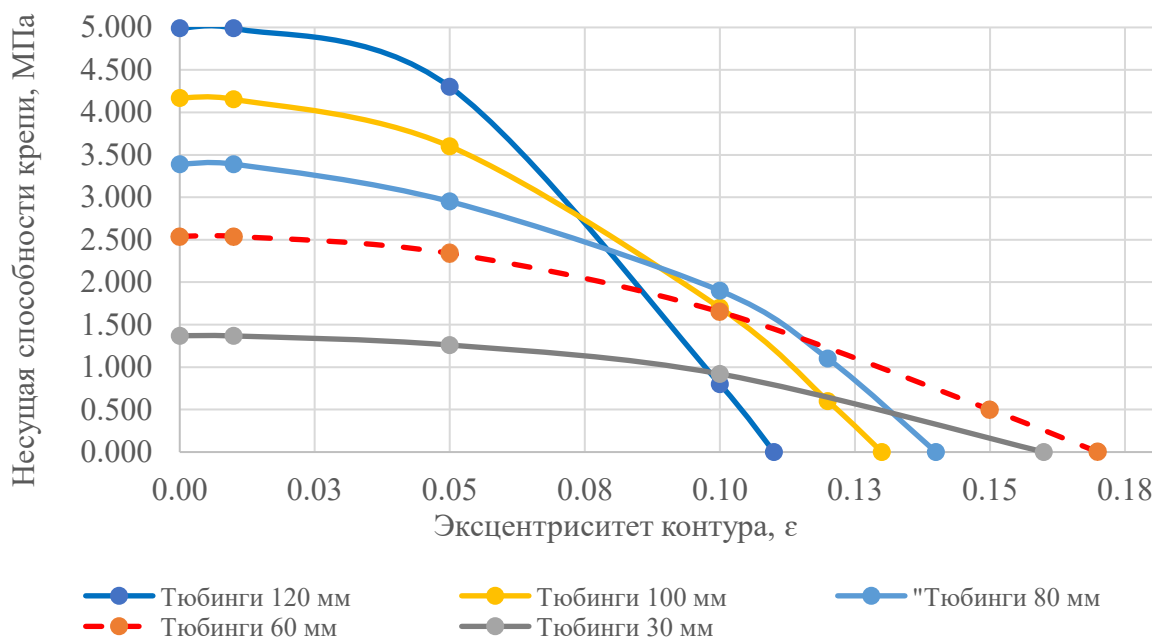


Рисунок 9 – Графики изменения несущей способности тубинговой крепи в зависимости от эксцентриситета контура ствола

Из графиков видно, что для тубинговой крепи с толщиной спинки 120 мм несущая способность будет исчерпана уже при эксцентриситете $\epsilon=0,11$. Тогда как для тубингов с толщиной спинки 30 мм несущая способность будет исчерпана при $\epsilon=0,17$.

С учетом результатов моделирования в крепь узла сопряжения следует закладывать не только вертикальный, но и горизонтальный деформационный шов (ДШ), который определен в настоящем исследовании, как **регулятивный элемент № 2** (см. рис. 2).

Ширину деформационного шва следует назначать на основе расчета ожидаемых относительных деформаций пород околоствольного массива. Пример результатов расчета приведен на рис. 10. Анализ изополей вертикальных перемещений показывает, что при эффективной работе шва обеспечивается полная независимость работы выше и ниже расположенных участков крепи вдоль оси ствола.

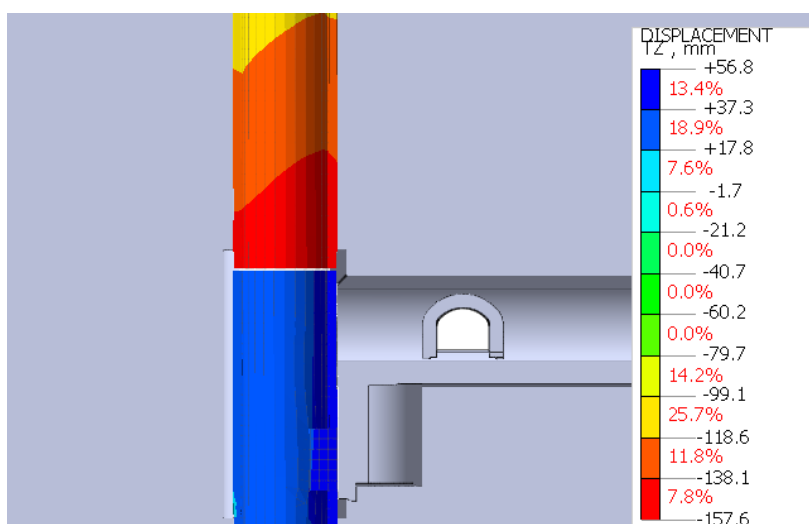


Рисунок 10 – Вертикальные смещения крепи ствола в зоне сопряжения

Существенное значение при этом имеет взаимное расположение деформационного шва и податливого слоя. Рассмотрено два варианта: в первом случае разрыв колонны устраивался непосредственно над сопряжением на одном уровне с податливым слоем (см. рис. 11.а); второй вариант предполагал разрыв колонны ниже на 1,5 м под защитой податливого слоя (см. рис. 11.б). Результаты расчетов приведены в таблице 3. Крезь ствола над сопряжением в варианте II испытывает меньший краевой эффект.

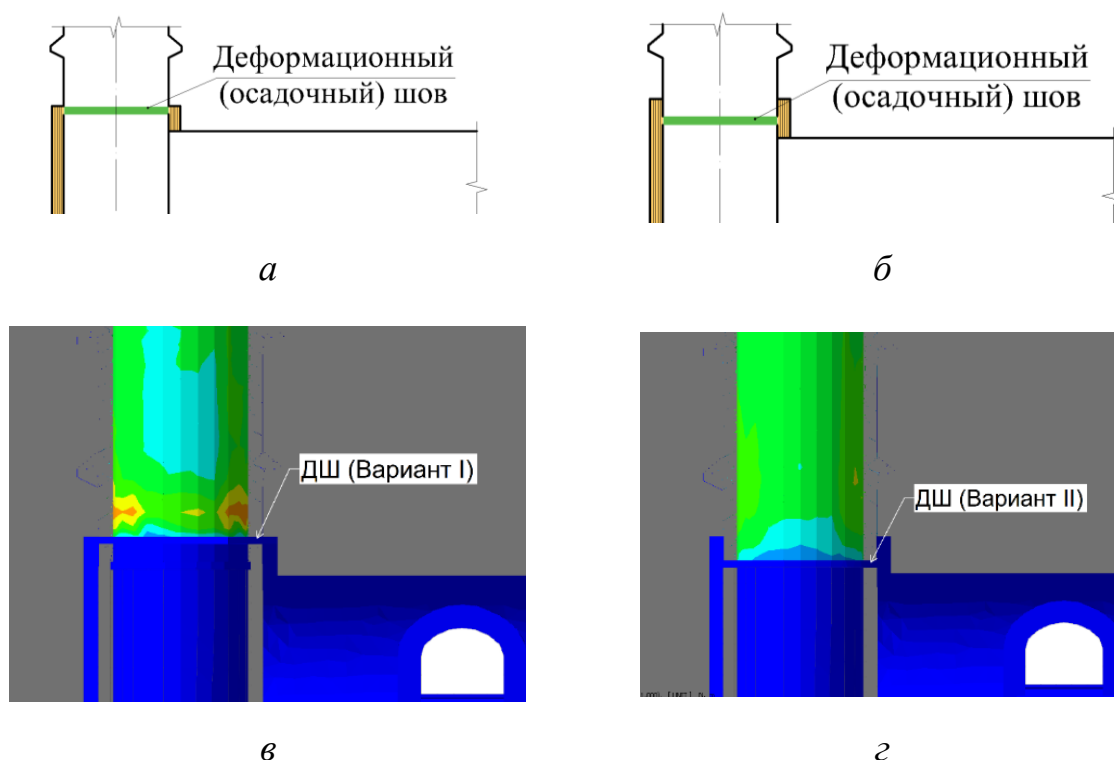


Рисунок 11 – Схема расположения деформационного шва:

а – ДШ (вариант I); б – ДШ (вариант II).

в – Напряжения в крепи ствола в зоне сопряжения для ДШ (вариант I);

г – то же для ДШ (вариант II)

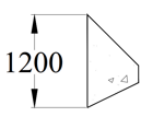
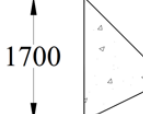
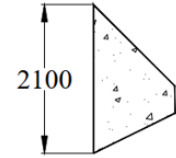
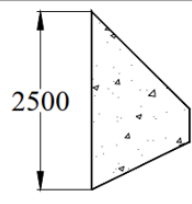
Напряжения в конструкции тубинговой крепи, предусматривающей расположение деформационного шва под защитой податливого слоя на величину 1,5 м (вариант II) в 3,7 раза меньше, чем при устройстве ДШ по варианту I. Эти выводы подтверждаются результатами вычислительных экспериментов и для других типов сопряжений.

По результатам исследований сформулировано второе научное положение.

Для обеспечения сцепления тубинговой колонны с окружающими породами возникает необходимость устройства в соляных породах опорных венцов (ОВ), которые приняты в качестве регулятивного элемента № 3.

Для анализа степени влияния ОВ на крепь ствола в области сопряжения были рассмотрены характерные типоразмеры ОВ, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Исследуемые размеры опорных венцов в конструкции крепи сопряжения

№	1	2	3	4
Размеры				
Площадь сечения, м ²	0,5	1,0	1,5	2,0

Далее выполнены расчеты с различными сочетаниями ОВ, которые показали, что при увеличении размера опорного венца и уменьшения расстояния от него до свода сопряжения степень негативного влияния на крепь усиливается.

В связи с тем, что интенсивность влияния опорного венца на узел сопряжения зависит не только от геометрических размеров опорного венца, но и от других параметров, таких как размеры выработок, реологические характеристики соляных пород, глубина заложения, то все эти параметры необходимо учитывать совместно. Комплексным показателем при этом может служить расчетное ожидаемое смещение U , м, значение которого можно получить тремя путями: определить по формуле Е.4 СП91.1333.2012; аналитическими выражениями, решая задачу упругого кольца; численными методами в плоской или пространственной постановке.

С учетом этого для различных сечений опорных венцов построены графики для определения требуемого расстояния от кровли сопряжения до отметки заложения опорного венца выше по стволу (рис. 12).

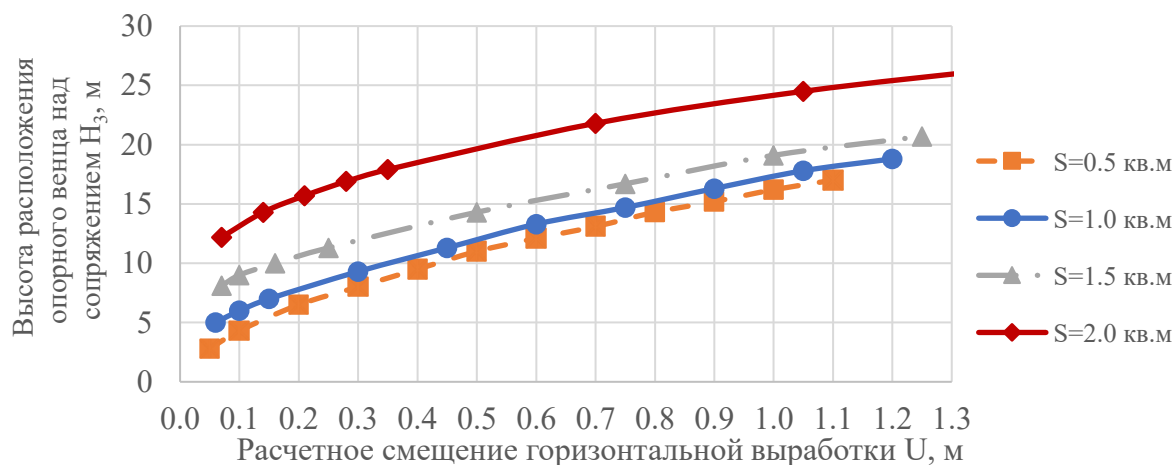


Рисунок 12 – Определение расстояния от кровли сопряжения до подошвы опорного венца в зависимости от его размеров (площади поперечного сечения) и значений смещений U , м

Например, если площадь опорного венца $S=1,5 \text{ м}^2$, а расчетные смещения выработки составляют 0,388 м, то согласно графику, минимальное расстояние заложения венца над сопряжением составит: $H_3=13 \text{ м}$.

Тогда, для обеспечения сцепления крепи с породой следует выполнять ОВ на расстоянии $H_3 \geq 13 \text{ м}$ (см. рис. 2) или вместо одного опорного венца большого сечения установить 2-3 венца меньших размеров (пояса сцепления).

Рассмотрим вариант одностороннего сопряжения. С помощью математического моделирования выполнены расчеты для четырех случаев: без устройства ОВ; устройство ОВ над сопряжением на расстоянии $H_3=5 \text{ м}$, 13 м и 23 м (рис. 13). Размеры ОВ: высота 2,1 м, глубина постели вруба 1,2 м ($S=1,5 \text{ м}^2$).

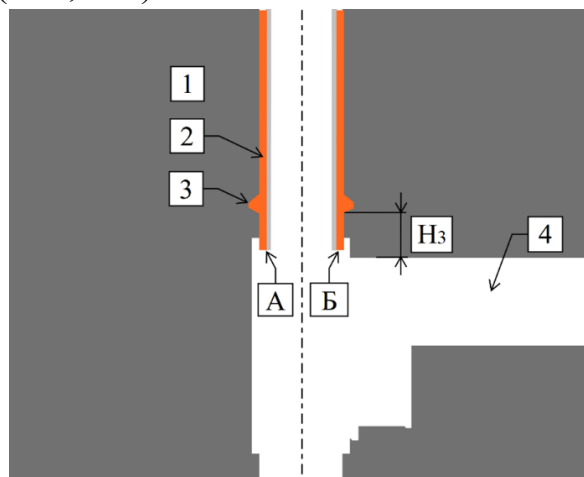


Рисунок 13 – Разрез ствола в узле сопряжения:

Область А – дальняя от сопряжения сторона крепи; Область Б – ближняя от сопряжения сторона крепи; H_3 – высота расположения ОВ над сопряжением; 1 – вмещающий массив; 2 – крепь ствола; 3 – опорный венец; 4 – горизонтальная выработка.

Результаты расчетов показывают, что крепь ствола со стороны сопряжения (область Б, рис. 13) испытывает большие вертикальные деформации для всех типов сопряжений. Наихудший вариант расположения ОВ на расстоянии $H_3 \leq 13$ м, в этом случае вертикальные смещения в крепи достигают 164 мм и, как следствие, возрастают растягивающие напряжения в тубингах и бетоне. На графиках рис. 14 показаны зависимости смещений крепи ствола для сторон А и Б разреза ствола.

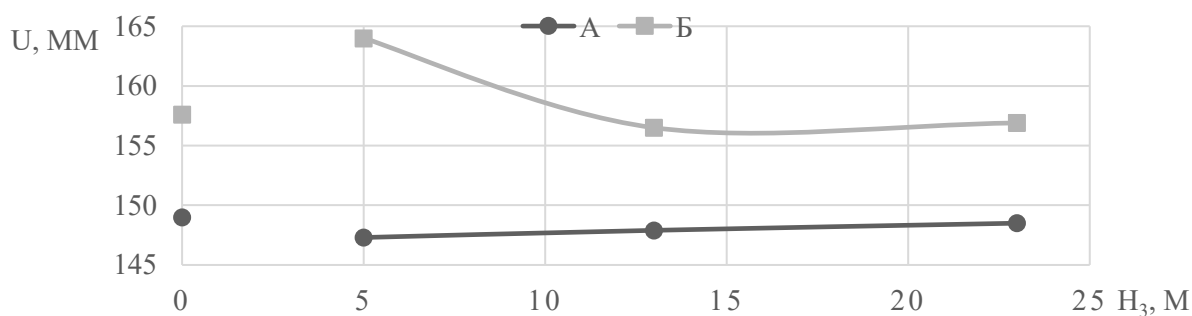


Рисунок 14 – Графики изменения смещений крепи ствола от расстояния от отметки заложения ОВ до свода сопряжения (H_3).

Наличие опорного венца в зоне сопряжения оказывает существенное влияние на крепь ствола. Расположение ОВ должно быть обосновано расчетом при условии минимизации негативного воздействия на жесткую крепь ствола. Для определения рационального расстояния от кровли сопряжения до отметки заложения опорного венца в зависимости от его размеров и величин расчетных смещений U , необходимо воспользоваться графиками на рис. 12.

Применение комплекса конструктивных мер защиты крепи стволов в породах, склонных к длительной ползучести, включающего горизонтальные осадочные швы, податливый слой крепи и опорные венцы с обоснованными параметрами, позволяет уменьшить интенсивность напряжений в крепи в зоне влияния сопряжений на 20% и более. Пример традиционного и предлагаемого решения по креплению сопряжений в соляных породах с использованием всех рассмотренных регулятивных элементов приведен на рис. 15.

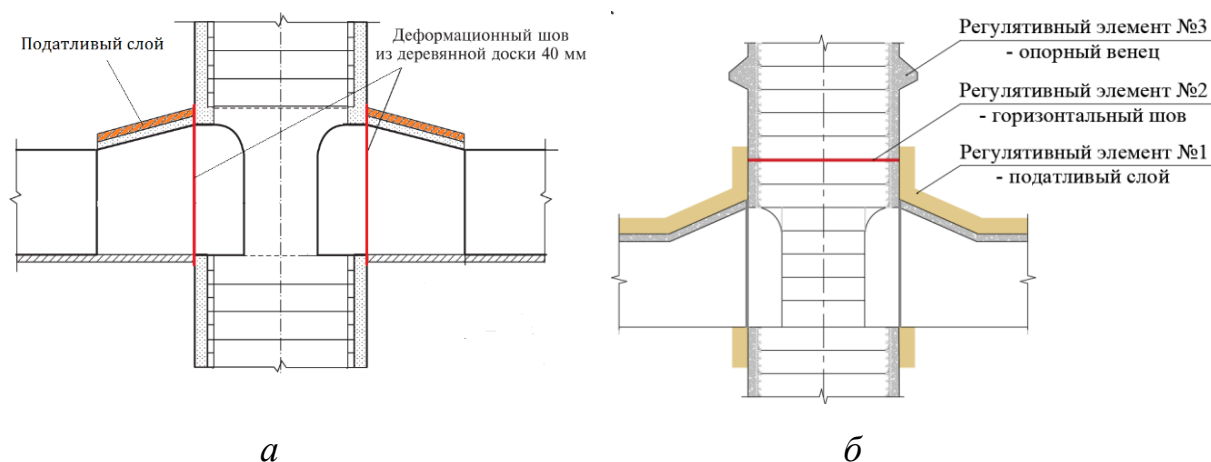


Рисунок 15 – Конструктивные решения сопряжения:

a – традиционный подход; *б* – предложенное решение

Таким образом, регулятивные элементы, установленные по схеме *б* (рис. 15) компенсируют негативное влияние геомеханических процессов, развивающихся при длительной ползучести соляных пород, тем самым существенно повышается долговечность крепи в рассматриваемых условиях.

По результатам исследований сформулировано третье научное положение.

В четвертой главе показан опыт внедрения полученных результатов на практике. Результаты диссертации использованы в проекте крепи ствола № 3 Усольского калийного комбината (АО «МХК «ЕвроХим»») для четырех сопряжений, включая сопряжение с трубным горизонтом, сопряжение с транспортным горизонтом, сопряжение с комплексом загрузки скипов и сопряжение с горизонтом сбора просыпи. Так же запроектирован и построен в каменной соли общешахтный бункер и его сопряжение с камерой питателей с учетом основных положений и выводов диссертации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основе выполненного прогноза геомеханических процессов изложены научно обоснованные технические и технологические решения по обеспечению долговечности крепи сопряжений стволов в соляных породах, что имеет существенное значение для горной отрасли страны.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ опыта эксплуатации и характера разрушений сопряжений стволов в соляных породах, позволивший установить, что для повышения долговечности крепи сопряжений необходимо обосновать параметры совместной работы регулятивных элементов на основе прогноза протекающих в системе «крепь - соляной породный массив» длительных геомеханических процессов.

2. Проведена систематизация объемно-планировочных решений сопряжений, на основе которой выделены четыре типовые формы сопряжений для разработки пространственных конечно-элементных моделей. Разработана и валидирована математическая модель соляных пород на расчетный срок эксплуатации стволов 50 лет.

3. Выявлены закономерности геомеханических процессов и изменения НДС крепи и пород соляного массива на участках сопряжений различного типа на период эксплуатации 50 лет, позволившие определить причины формирования критических концентраций напряжений в тюбинговой крепи.

4. Обоснованы параметры крепи с податливым слоем на участках сопряжений стволов в соляных породах различной категории устойчивости по СП 91.13330.2012. Установлено, в породах IV категории устойчивости над и под сопряжением следует возводить участки крепи с податливым слоем протяженностью не менее 7,0 м, при этом параметры податливого слоя определяются в зависимости от величин ожидаемых максимальных вертикальных смещений свода сопряжения и неравномерности горизонтальных деформаций контура сечения ствола.

5. Установлены закономерности влияния горизонтального осадочного шва в крепи ствола в районах сопряжений на напряженно-деформированное состояние системы «крепь – массив». Доказано, что разделение горизонтальным осадочным швом сопряжения и протяженной части ствола в соляных породах позволяет уменьшить концентрации напряжений в тюбингах в 3 раза при условии дополнительной защиты участка податливым слоем, компенсирующим негативное влияние неравномерности деформаций на высоту не менее одного тюбингового кольца.

6. Методами математического моделирования исследованы различные варианты расположения опорных венцов на участках сопряжений стволов в соляных породах. Установлено, что для повышения долговечности крепи опорные венцы целесообразно располагать вне зоны влияния сопряжений размером $0,5 \div 3$ диаметра ствола в свету.

7. Установлено, что применение комплекса конструктивных мер защиты крепи стволов, включающего горизонтальные осадочные швы, подат-

ливый слой крепи и опорные венцы с обоснованными параметрами, позволяет уменьшить величины напряжений в крепи на 20%, а также существенно повышает долговечность безремонтной эксплуатации крепи в соляных породах.

8. Произведено внедрение разработанных решений в практику шахтного строительства. Предложенные технические решения позволяют существенно снизить ожидаемые нагрузки на крепь сопряжений на расчетный срок их эксплуатации и тем самым повысить долговечность рассматриваемых участков в соляных породах различной категории устойчивости.

Основные результаты работы опубликованы в следующих работах:

1. Кириенко Ю.А. Расчет крепи сопряжений стволов в породах, склонных к ползучести // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 8. – С. 142–153. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_8_0_142.

2. Кириенко Ю.А. Обоснование конструкции крепи сопряжения шахтного ствола, пройденного в солях. Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 6. – С. 20–34. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_6_0_20.

3. Кириенко Ю.А. Влияние технологической схемы проходки на напряженное состояние крепи в породах, склонных к ползучести. Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 7. DOI:10.25018/0236_1493_2024_7_0_38.

4. Кириенко Ю.А. Особенности разработки конструктивных решений общешахтного бункера рудника, пройденного в солях. – Метро и тоннели. – 2024. - №1. – С. 46.