

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

Маркин Илья Владимирович

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРЕПИ СТВОЛОВ НА УЧАСТКАХ
ВЗАИМОВЛИЯЮЩИХ СОПРЯЖЕНИЙ

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор
Панкратенко Александр Никитович

Москва, 2025

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Большинство глубоких рудных месторождений в России отнесено к склонным и опасным по горным ударам. При этом в массиве пород действует неравнокомпонентное поле горизонтальных напряжений, имеющее тектоническую природу. Значения горизонтальных напряжений могут превышать вертикальные гравитационные напряжения в 1,5-2,0 раза и более. В таких условиях осуществляется проходка выработок и эксплуатация большинства рудников Норильского промышленного района, Урала, Забайкальского края, Кольского п-ова и др.

Вскрытие глубоких рудных месторождений осуществляется главными и вспомогательными вертикальными стволами, которые имеют по своей протяженности большое количество сопряжений и приствольных выработок. В период строительства или углубки стволов также могут сооружаться технологические приствольные выработки: водоотливные камеры, камеры размещения подъемных машин и лебедок, ходки и др. Объемно-планировочные решения сопряжений имеют достаточно сложную пространственную форму, характеризующуюся наличием наклонного свода, примыканием вспомогательных камер и выработок.

В силу этих причин в практике отечественного проектирования вертикальных стволов принято разделять протяженные участки и участки ствола в районе сопряжений. Нормативная зона влияния сопряжений составляет 20 м вверх и вниз от места примыкания. При расстоянии между сопряжениями по глубине ствола менее 40 м возможное наложение зон влияния не учитывается, что может привести к недостаточно адекватной оценке геомеханических аспектов взаимодействия системы «крепь – породный массив». Кроме того, современные нормативные документы не позволяют производить обоснованный выбор и расчет параметров крепи для участков стволов между взаимовлияющими сопряжениями в условиях неравнокомпонентного горизонтального поля напряжений. Традиционным подходом является возведение жесткой крепи большой толщины вслед за подвиганием забоя ствола, а также переход на крепление ствола монолитным железобетоном с двойным арматурным каркасом или тубингами в сложных горно-геологических условиях.

Теоретическая база по обоснованию менее затратных и трудоемких технических и технологических решений по креплению рассматриваемых участков сегодня также остается неразработанной, что сдерживает актуализацию нормативных документов и методик. В этой связи выбранная тема исследований, несомненно, является актуальной.

Цель работы: обоснование параметров технологии крепления шахтных стволов на участках взаимовлияющих сопряжений в условиях неравнокомпонентного поля горизонтальных напряжений, обеспечивающих снижение затрат и сокращение сроков проходческих работ.

Идея работы заключается в применении на участках взаимовлияющих сопряжений в условиях неравнокомпонентного поля горизонтальных напряжений комбинированной крепи переменного сопротивления, возведённой по параллельной технологической схеме, при этом параметры крепления уточняются при проходке ствола по мере поступления результатов геомеханического мониторинга.

Задачи исследования:

1. Выполнить теоретическую оценку возможности применения нормативных, традиционных и новых методов расчёта крепи стволов на участках сопряжений в условиях неравнокомпонентного поля горизонтальных напряжений.

2. Провести экспериментальные исследования взаимодействия крепи и околоствольных пород на участках взаимовлияющих сопряжений в условиях неравнокомпонентного поля горизонтальных напряжений.

3. На основе численного моделирования исследовать закономерности формирования напряженно-деформированного состояния крепи и пород приконтурного массива на участках взаимовлияющих сопряжений. Провести оценку запаса несущей способности крепи.

4. Разработать рекомендации по определению параметров комбинированной крепи стволов и технологии ее возведения на участках взаимовлияющих сопряжений в условиях неравнокомпонентного поля горизонтальных напряжений.

Методы исследований: системный анализ состояния вопроса строительства технически сложных ствольных комплексов, экспериментальные исследования процессов деформирования крепи и приконтурного массива на участках сопряжений стволов в период их проходки и эксплуатации, решение геомеханических задач методами математического моделирования в пространственной постановке с применением специализированных программных комплексов, вероятностно-статистические методы обработки данных экспериментальных исследований и математического моделирования, апробация разработанных решений в проектах строительства вертикальных стволов.

Объектом исследований являются участки сопряжений главных и вспомогательных стволов шахт и рудников, сооружаемые в скальных породах различной категории устойчивости в условиях неравнокомпонентного поля горизонтальных напряжений.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что параметры передовой и основной крепи вертикальных стволов на участках взаимовлияющих сопряжений в условиях неравнокомпонентного поля горизонтальных напряжений следует определять с учетом фактических значений коэффициентов неравномерности деформаций приконтурных пород и крепи, изменяющихся в диапазоне 1,25 - 2,5, определяемых экспериментально-аналитическими методами.

2. Математическим моделированием выявлен факт уменьшения в 1,5 – 1,75 раз запаса несущей способности бетонной крепи, возведенной по совмещенной технологической схеме, на участках взаимовлияющих сопряжений в условиях неравнокомпонентного поля горизонтальных напряжений, при этом интенсивность напряжений в бетоне на 7 - 10% выше, чем в крепи ствола в зоне влияния одиночного сопряжения.

3. Применение комбинированной конструкции крепи, возведенной по параллельной технологической схеме, позволяет сократить затраты и более чем в два раза сроки проходки стволов на участках взаимовлияющих сопряжений, при этом при отношении максимальных горизонтальных напряжений к минимальным в породном массиве более 1,5 в состав комбинированной крепи следует включать двух-или трехуровневые анкеры, длина которых зависит от интенсивности напряжений в массиве, диаметра ствола и устойчивости околоствольных пород.

Научная новизна работы:

1. Получены временные зависимости изменения относительных деформаций в передовой и основной крепи на участках ствола между взаимовлияющими сопряжениями в характерных точках сечений выработок в период их проходки и эксплуатации.

2. Установлены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния приконтурных пород и запаса несущей способности крепи на участках взаимовлияющих сопряжений в условиях неравнокомпонентного поля горизонтальных напряжений.

3. Обоснованы теоретические предпосылки и разработан порядок определения параметров комбинированного крепления вертикальных стволов на участках взаимовлияющих сопряжений в зависимости от соотношения между максимальными и минимальными горизонтальными напряжениями в породном массиве.

Теоретическая значимость работы: установленные закономерности изменения напряжений и деформаций в крепи и массиве пород на участках взаимовлияющих сопряжений и рекомендации по определению параметров комбинированной крепи этих участков вносят существенный вклад в развитие

строительной геотехнологии в части совершенствования крепления горных выработок в сложных эксплуатационных условиях.

Практическая значимость работы заключается в обосновании параметров конструкции комбинированной крепи и технологических решений по ее возведению, обеспечивающих снижение затрат и сроков сооружения участков сопряжений вертикальных стволов.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается: применением апробированных методов механики подземных сооружений и математической статистики, удовлетворительной сходимостью экспериментальных измерений относительных деформаций в передовой и основной крепи стволов на участках сопряжений и аналогичных значений, полученных методами математического моделирования в трехмерной постановке задачи, применением разработанных решений в нормативно-технических документах и проектной документации для строительства вертикальных стволов.

Личный вклад автора заключается в проведенном анализе объемно-планировочных решений сопряжений стволов и параметров неравнокомпонентного поля горизонтальных напряжений; получении временных зависимостей изменения относительных деформаций в передовой и основной крепи на участках стволов между взаимовлияющими сопряжениями; установлении закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния приконтурных пород и крепи стволов на участках сопряжений в различных условиях; разработке рекомендаций по определению параметров комбинированной крепи стволов на участках взаимовлияющих сопряжений, а также технологии крепления.

Реализация результатов работы.

Результаты работы использованы при разработке нормативных документов и проектных решений для рудников Норильского промышленного района и Урала.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы были доложены на международных научно-технических симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, НИТУ «МИСИС» 2022-2024 гг.); 21 и 22-й Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики (ТулГУ, 2022-2023 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 5 работ, из которых 4 – в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России.

Объем и структура работы. Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка публикаций по теме диссертации, списка литературы из 109 источников и 2 приложений. Работа изложена на 127 страницах, содержит 55 рисунков и 15 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность, цель и задачи исследований.

Главные и вспомогательные вертикальные стволы современных рудников сооружаются вместе с комплексом примыкающих к ним камер, горизонтальных и наклонных выработок.

На участках стволов между близко расположенными сопряжениями (расстояние между отметками сопряжений по глубине ствола менее 40 м) формируются единые технически сложные стволовые комплексы, необходимые для решения различных производственных задач в течении всего срока службы горного предприятия.

По пространственной ориентации можно выделить четыре характерных типа участков взаимовлияющих сопряжений:

1. Расположение одностороннего (двухстороннего) сопряжения над аналогичным в одной плоскости.
2. Расположение одностороннего (двухстороннего) сопряжения над аналогичным перпендикулярно друг другу.
3. Одностороннее примыкание камер в одной плоскости с незначительным разнесением по глубине.
4. Одностороннее примыкание камер к стволу в перпендикулярных плоскостях с незначительным разнесением по глубине.

Анализ 26 проектов главных и вспомогательных стволов современных рудников позволил установить следующее:

1. Из общего числа сопряжений 32,3% составляют взаимовлияющие сопряжения с расстоянием между ними по глубине ствола менее 40 м.
2. 76,5% выделенных технических сложных вертикальных комплексов с взаимовлияющими сопряжениями включают приствольные выработки, расположенные в одной плоскости, 23,5% – во взаимно перпендикулярных плоскостях.
3. Крепление стволов на рассматриваемых участках осуществляется:
 - монолитной бетонной крепью толщиной 300 - 500 мм – 12,3%.
 - монолитной железобетонной крепью толщиной 500 мм и более – 67,1%;
 - тубингами, многослойными конструкциями крепи – 20,6%.

Высокая доля применения материалоемких крепей на рассматриваемых участках подтверждает тезис об их технической сложности, при этом при расстоянии между сопряжениями менее 40 м возможное наложение зон влияния в современных нормативных документах не учитывается, что может привести к недостаточно адекватной оценке геомеханических аспектов взаимодействия

системы «крепь – породный массив». Особую сложность такая оценка представляет в условиях действия в породном массиве неравнокомпонентного поля горизонтальных напряжений.

В настоящее время можно выделить четыре основных метода оценки устойчивости и расчета крепи шахтных стволов на участках сопряжений:

- нормативный метод оценки устойчивости пород и расчета толщины крепи в соответствии с требованиями СП 91.13330.2012;
- аналитические методы расчета по схеме «контактного взаимодействия крепи и массива»;
- приближенные математические методы расчета (конечных элементов, граничных элементов, дискретных элементов), реализуемых с помощью специализированных программных комплексов;
- экспериментально-аналитические методы, предусматривающие использование данных шахтных исследований при оценке устойчивости и определении параметров крепи, в том числе путем решения соответствующих обратных задач.

Научно-методические основы применения этих методов, в том числе в условиях действия в массиве пород тектонических напряжений созданы И.В. Баклашовым, В.Е. Боликовым, Н.С. Булычевым, В.В. Виноградовым, М.В. Гзовским, В.Т. Глушко, Ж.С. Ержановым, А.В. Зубковым, Б.А. Картозия, Э.В. Каспарьяном, А.М. Козелом, Ю.М. Либерманом, Г.Г. Литвинским, Г.А., Марковым, А.Г. Протосеней, К.В. Руппенейтом, А.С. Саммалем, С.В. Сергеевым, Л.И. Сосновским, Н.Н. Фотиевой, Т.Ф. Харисовым, А.Н. Шашенко и многими другими отечественными и зарубежными учеными [33-49].

Выполненный анализ работ этих ученых позволил выделить ряд проблемных аспектов использования методов применительно к оценке устойчивости и определению параметров крепления стволов на участках взаимовлияющих сопряжений, а также сформулировать цель и задачи диссертационного исследования.

На первом этапе исследований проведены шахтные эксперименты на участках скипо-клетевого ствола рудника «Скалистый» на участках взаимовлияющих сопряжений на глубинах 1900 - 2045 м. Величины параметров исходного гравитационно-тектонического поля напряжений, которые приняты в расчетах геомеханических моделей при проектировании крепи ствола, приведены на рис. 1. По данным выполненного геодинамического районирования в массиве пород действуют повышенные и неравномерные горизонтальные напряжения.

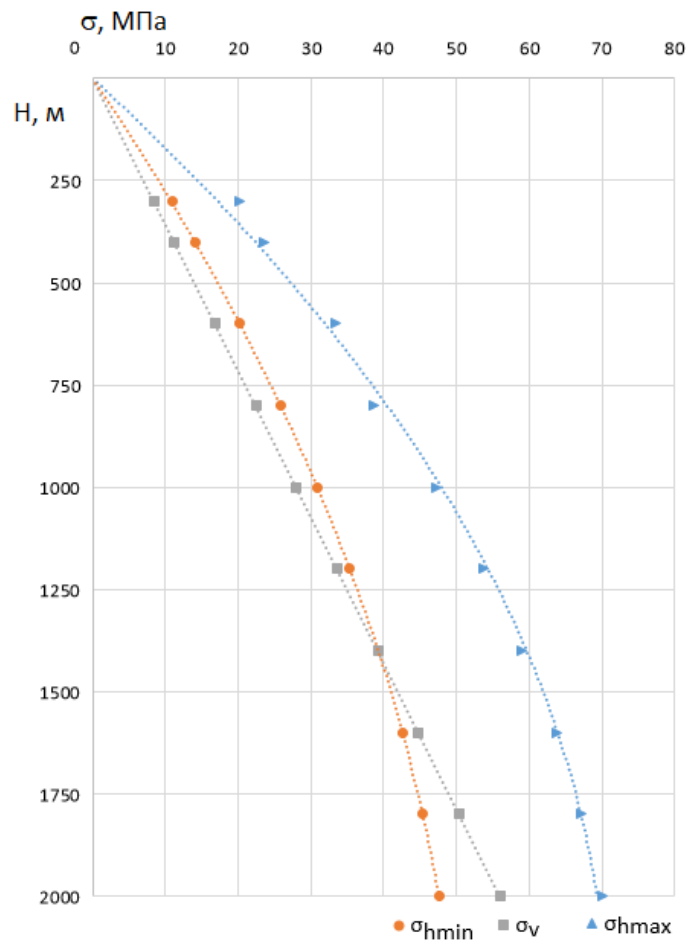


Рисунок 1 – Параметры начального поля напряжений в породном массиве

Ствол строился по параллельной технологической схеме с применением передовой комбинированной крепи, включающей анкера, сетку и набрызгбетон. В качестве основной крепи применялся монолитный бетон толщиной 400 мм.

Шахтные исследования осуществлялись методом деформационного мониторинга пород и крепи ствола. В качестве основных средств измерений использовались датчики линейных деформаций струнного типа производства АО «НИИЭС», замоноличиваемые в бетон передовой и основной крепи. Ориентируя главную ось датчика при его установке в радиальном, тангенциальном или вертикальном направлении, его можно использовать для определения соответствующих деформаций системы «крепь – массив».

В процессе проходки дополнительно осуществлялись измерения конвергенции породных стенок ствола в призабойной зоне. Для этих целей применялся ленточный экстензометр Геокон модели 1610.

По описанной методике осуществлялся мониторинг в процессе строительства ствола СКС-1, а также в течение двух лет его последующей эксплуатации.

Типовая схема расположения датчиков в сечении приведена на рис. 2.

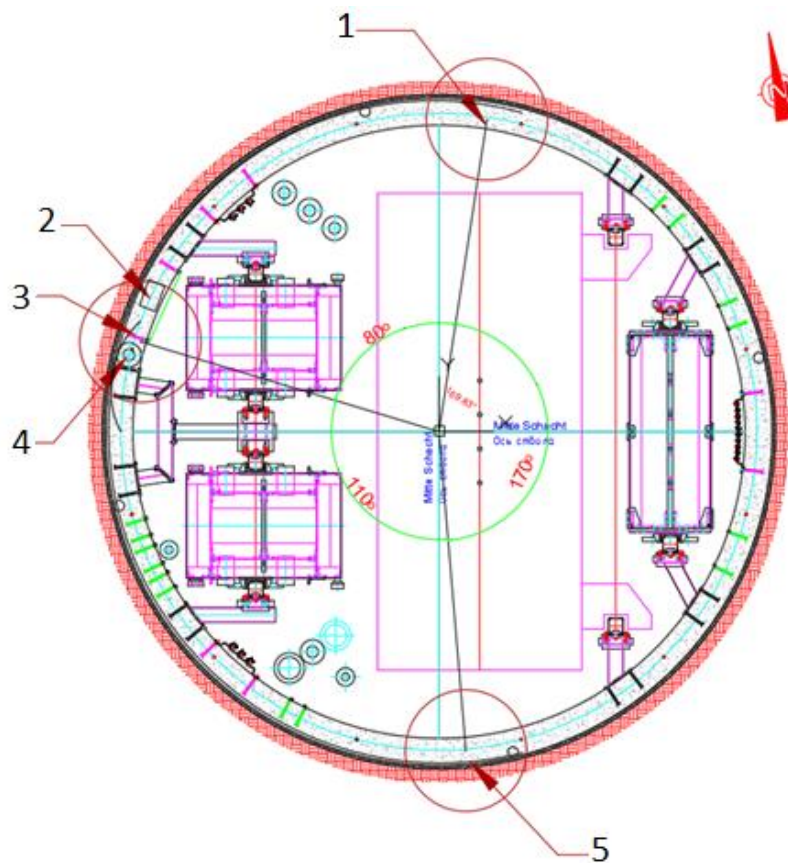


Рисунок 2 – Схема замерной станции в сечении ствола:
1,3,5 – точки установки датчиков; 2,4 – места установки коммуникационного оборудования

Пример полученных в результате исследований графиков изменения относительных деформаций в слое передовой набрызгбетонной крепи в районе взаимодействующих сопряжений представлен на рис. 3.

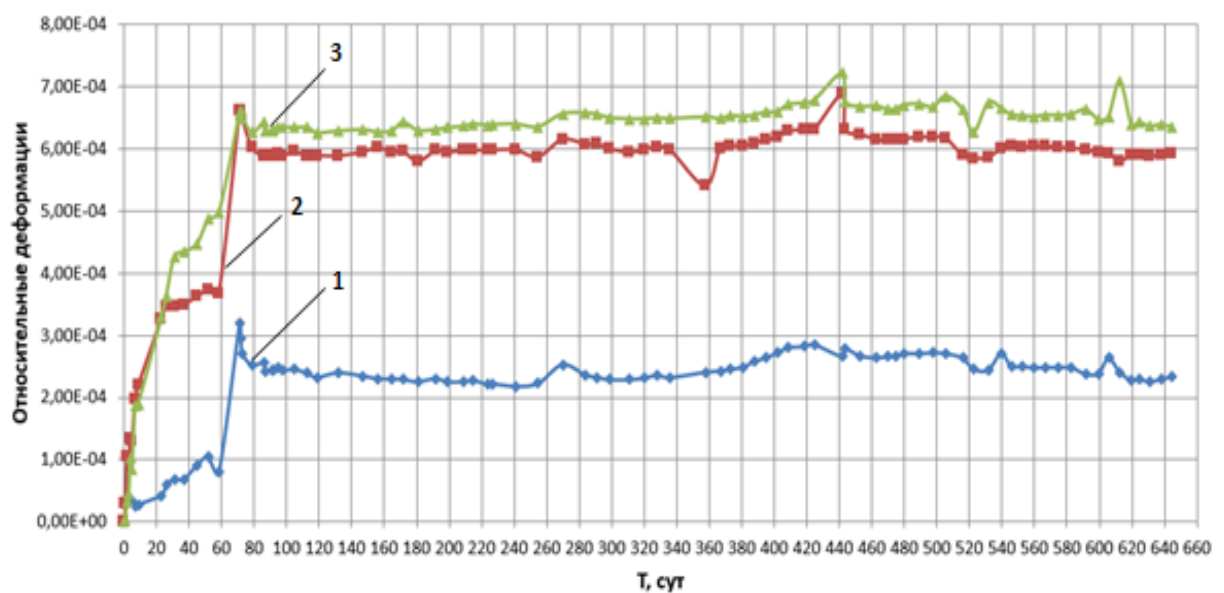


Рисунок 3 – Относительные деформации в торкрет-бетонной крепи на втором участке мониторинга на глубине 1977 м (1,2,3 – замерные группы)

Аналогичные графики, построенные в ходе измерений деформаций основной бетонной крепи ствола, приведены на рис. 4.

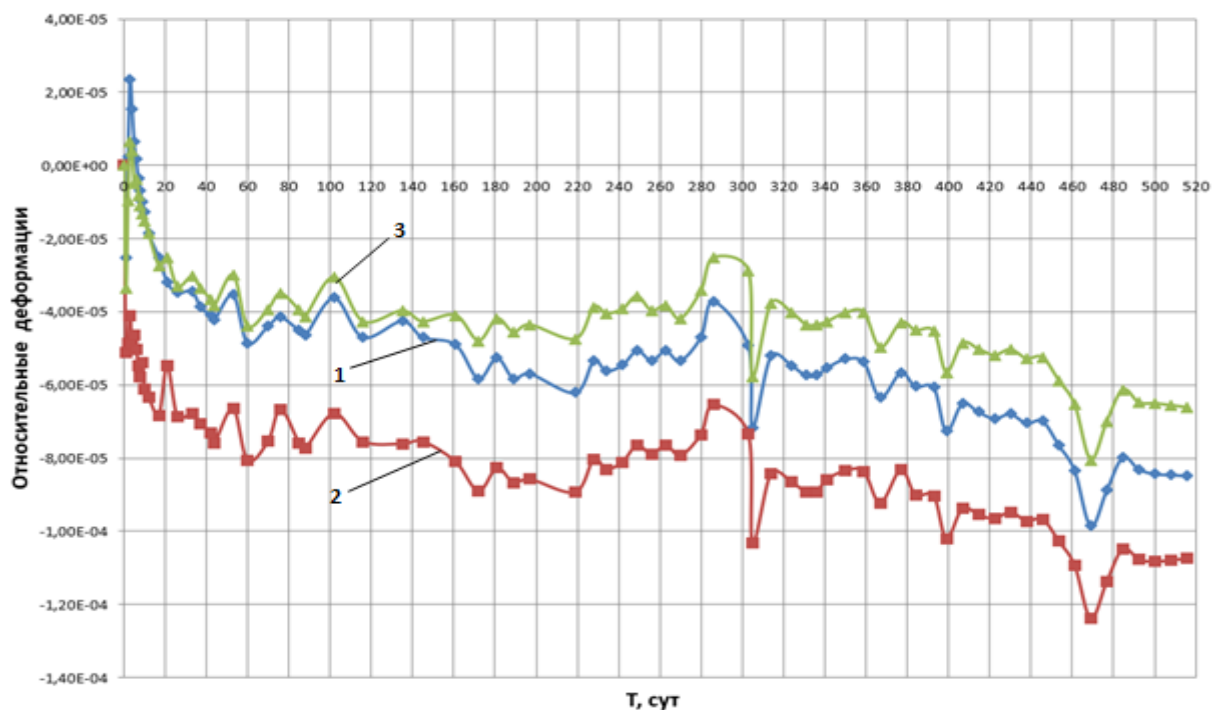


Рисунок 4 – Относительные радиальные деформации в основной крепи крепи на втором участке мониторинга на глубине 1999,8 м (1,2,3 – замерные группы)

Анализ графиков изменения деформаций по всем участкам мониторинга показал, что в основной крепи ствола, возведённой с отставанием от забоя 30 м, интенсивность и асимметрия изменения деформаций меньше, чем в передовой крепи. Вместе с тем в характерных зонах влияния сопряжений неравномерность изменения деформаций крепи достаточно ярко выражена, при этом она обусловлена как действием неравнокомпонентного поля горизонтальных напряжений, так и сложной пространственной геометрией исследованных участков между взаимовлияющими сопряжениями.

По результатам обработки данных получены значения средних коэффициентов неравномерности тангенциальных деформаций для передовой и основной крепи стволов на трех исследованных участках (табл. 1).

Таблица 1 – Значения коэффициентов неравномерности тангенциальных деформаций крепи стволов

Вид крепи	Значения коэффициента неравномерности тангенциальных деформаций в крепи K_H		
	1 участок	2 участок	3 участок
Передовая крепь	1,26	2,57	1,49
Основная крепь	1,81	1,25	2,41

По значениям относительных деформаций расчетными методами определены средние максимальные и минимальные напряжения в крепи, далее выполнено сравнение полученных значений с проектными характеристиками бетона. Пример результатов расчета для передовой набрызгбетонной крепи представлен в табл. 2 (сжимающие напряжения приняты отрицательными).

Таблица 2 – Результаты определения напряжений в набрызгбетонной крепи

Участок	Глубина H , м	Расчетная прочность бетона, МПа		Расчётные напряжения в крепи, МПа		Напряжения, определенные по результатам замеров, МПа
		Сжатие осевое	Растяжение осевое	σ_3	σ_1	σ_3
1	1977,0	14,5	1,05	-7,56	-0,76	-10,86
2	2007,8	14,5	1,05	-6,44	-0,38	-17,89
3	2024,0	14,5	1,05	-6,51	-0,36	-8,95

Установлено, что наиболее сложная геомеханическая ситуация наблюдается на втором участке мониторинга, где полученные по результатам замеров и расчетов значения напряжений в передовой крепи превысили расчетное сопротивление бетона на одноосное сжатие.

Это можно объяснить следующими причинами:

- сечение ствола в проходке больше чем вчерне из-за переборов породы;
- отсутствие учета при обосновании проектных решений эффекта взаимного влияния сопряжений;
- увеличение фактического срока взаимодействия передовой крепи с породным массивом до возведения основной крепи из-за технологических пауз;
- более жесткая конструкция передовой крепи по сравнению с проектной, так как фактическая толщина слоя набрызгбетона составила почти 300 мм вместо 200 мм, прочность – более 50 МПа при проектном классе В25. Это обеспечило устойчивое состояние участка до возведения основной крепи несмотря на высокий уровень загрузки комбинированной передовой крепи.

Основную часть неравномерных нагрузок воспринимает на себя передовая крепь, для повышения работоспособности которой на участках взаимовлияющих сопряжений в неравнокомпонентном поле горизонтальных напряжений целесообразно переходить на проектирование и применение крепи переменного сопротивления.

При применении передовой крепи и возведении основной крепи с отставанием до 30 м от забоя ствола, уровень напряжений в основной крепи значительно ниже, чем в передовой, что создает предпосылки для применения ресурсосберегающих конструкций.

На основании полученных результатов сформулировано **первое научное положение**.

В главе 3 диссертационной работы выполнены исследования по оценке несущей способности крепи ствола и устойчивости околоствольного массива пород в неравномерном тектоническом поле напряжений на участках взаимовлияющих сопряжений. Применен метод конечных элементов и специализированный программный комплекс Midas FEA NX. Поставленная задача решалась применительно к глубоким стволам рудников, в реальных геомеханических условиях месторождений Российской Федерации. Стволы сооружаются преимущественно в высокомодульных скальных породах, склонных к хрупкому разрушению, по совмещенной технологической схеме.

В результате расчетов пространственных численных моделей определены параметры напряженно-деформированного состояния крепи на участках сопряжений и произведена общая оценка устойчивости участков. Ниже представлены примеры полученных результатов для участков сопряжений различных типов в виде изополей главных напряжений σ_3 (напряжения A) и σ_1 (напряжения C) (рис. 5 и 6).

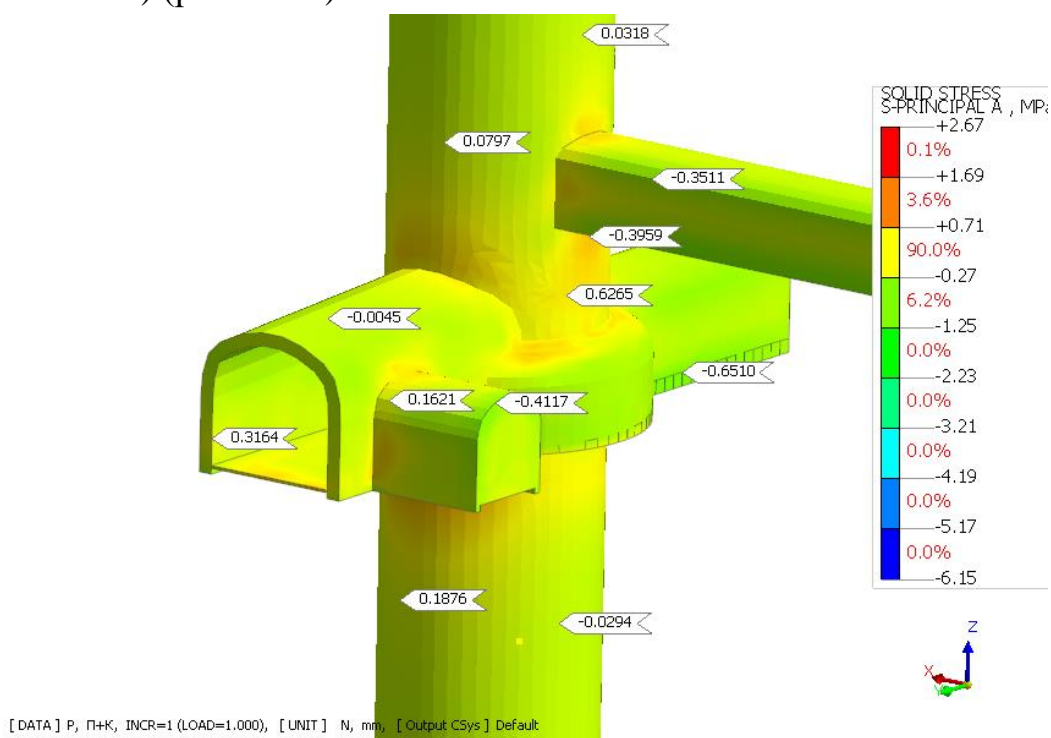


Рисунок 5 – Изополя напряжений σ_3 , МПа, в крепи ствола участка сопряжений второго типа (расположение одностороннего (двухстороннего) сопряжения над аналогичным перпендикулярно друг другу)

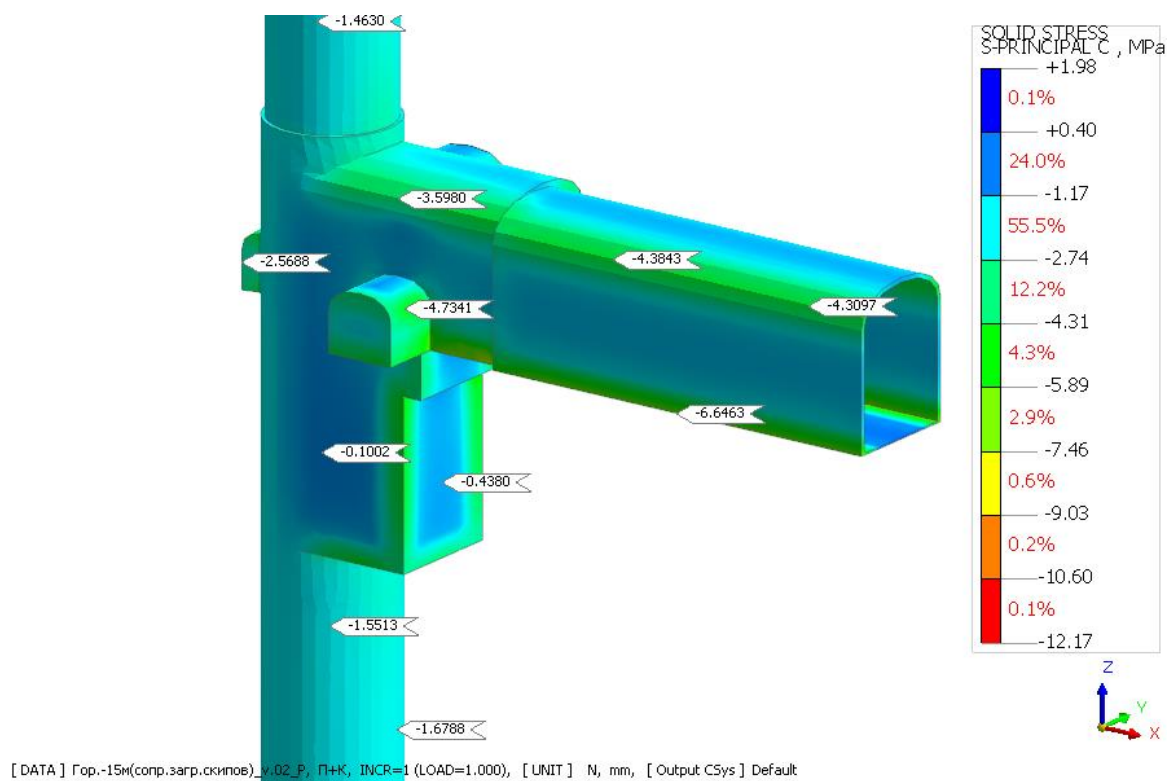


Рисунок 6 – Изополя напряжений σ_3 и σ_1 , МПа, в крепи ствола участка сопряжений третьего типа (одностороннее примыкание выработок и камер в одной плоскости с незначительным разнесением по глубине)

В программе Midas напряжения сжатия имеют отрицательный знак, а растягивающие напряжения имеют положительные значения.

При проведении моделирования и расчетов варьировался коэффициент неравномерности величин горизонтальных напряжений K_H в диапазоне $1,0 \div 2,5$, также сравнивались результаты расчета на участках влияния двух близко расположенных сопряжений и на участках размещения одиночных сопряжений в аналогичных условиях.

Анализ изополей напряжений в крепи ствола на участках взаимовлияющих сопряжений показал, что в ней возникают не только сжимающие, но и растягивающие напряжения. Представляя интенсивность напряжений в виде разности максимальных и минимальных главных напряжений $\sigma_1 - \sigma_3$ можно выполнить более корректную оценку фактического уровня загрузки крепи.

На рис. 7 представлены графики изменения разности напряжений $\sigma_1 - \sigma_3$ при различных величинах коэффициента неравномерности K_H для четырех типов участков взаимовлияющих сопряжений.

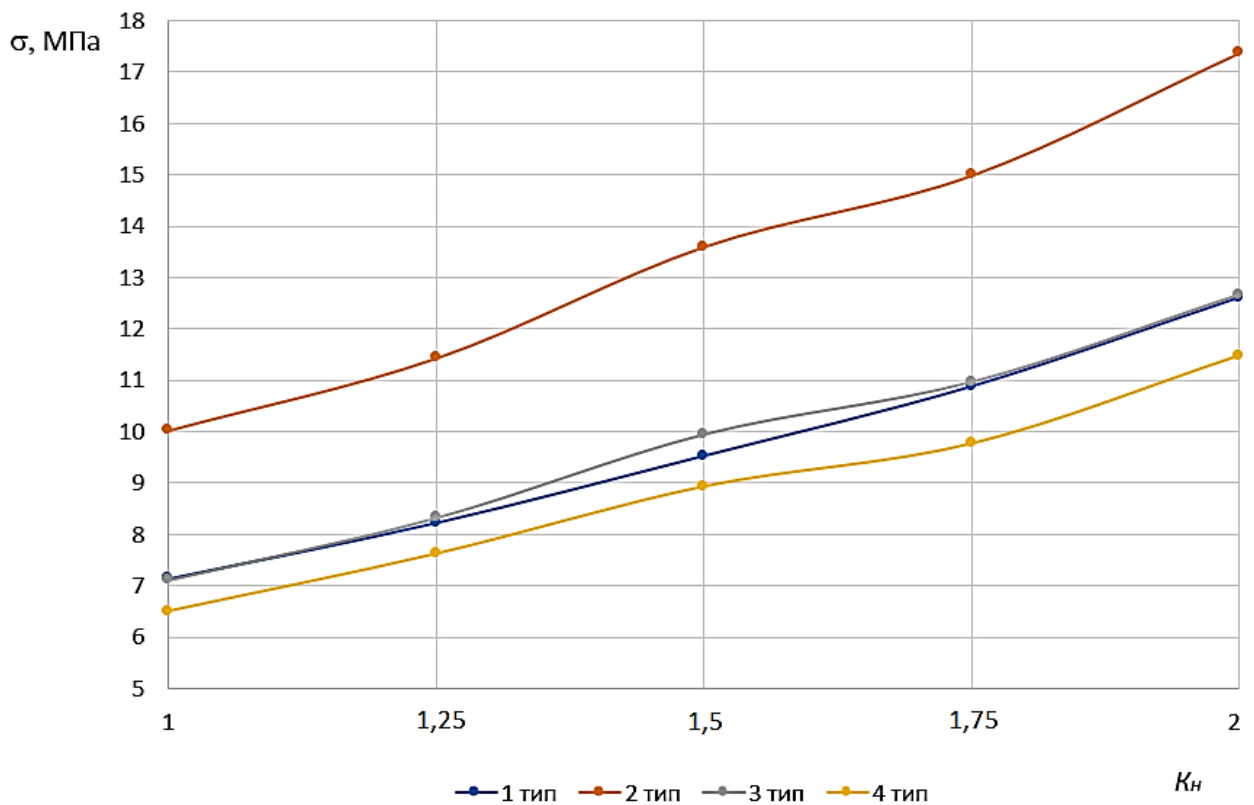


Рисунок 7 – Графики изменения разности напряжений $\sigma_1 - \sigma_3$ при различных величинах коэффициента неравномерности K_n для четырех типов участков взаимовлияющих сопряжений

Установлено, что при увеличении значений коэффициента неравномерности поля горизонтальных напряжений запас несущей способности крепи снижается в 1,5 - 1,75 раз и более, при этом величины напряжений на участках взаимовлияющих сопряжений на 7 - 10% выше, чем на участках одиночных сопряжений. В целом в широком диапазоне условий несущая способность бетонной крепи, возведенной по совмещённой схеме проходки, является недостаточной. Требуется переход на крепление рассматриваемых участков железобетонной крепью с двойным арматурным каркасом или тубингами.

Для оценки запаса несущей способности конструкции крепи на участках взаимовлияющих сопряжений предлагается использовать простые и удобные для проектирования условия:

$$\begin{aligned}
 R_{\text{пр.с}} &\geq \sigma_1 - \beta \sigma_3; \\
 R_{\text{пр.с}} &\geq \sigma_1; \\
 R_{\text{пр.р}} &\geq \sigma_3,
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

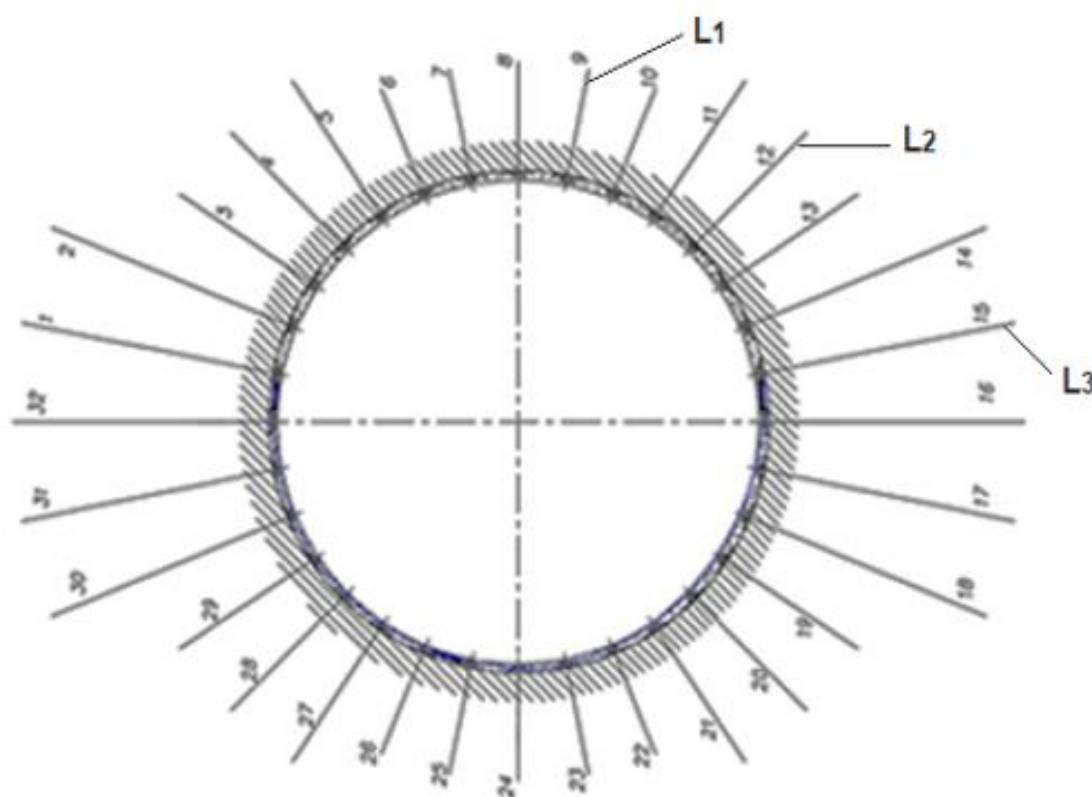
где $R_{\text{пр.с}}$ и $R_{\text{пр.р}}$ – соответственно расчетная прочность бетона на сжатие и растяжение при изгибе с учетом понижающих коэффициентов, МПа; β – параметр объемной прочности, определяется по результатам лабораторных испытаний материала крепи, в среднем для тяжелого бетона составляет $\beta = 4,1$.

По результатам исследований сформулировано **второе научное положение**.

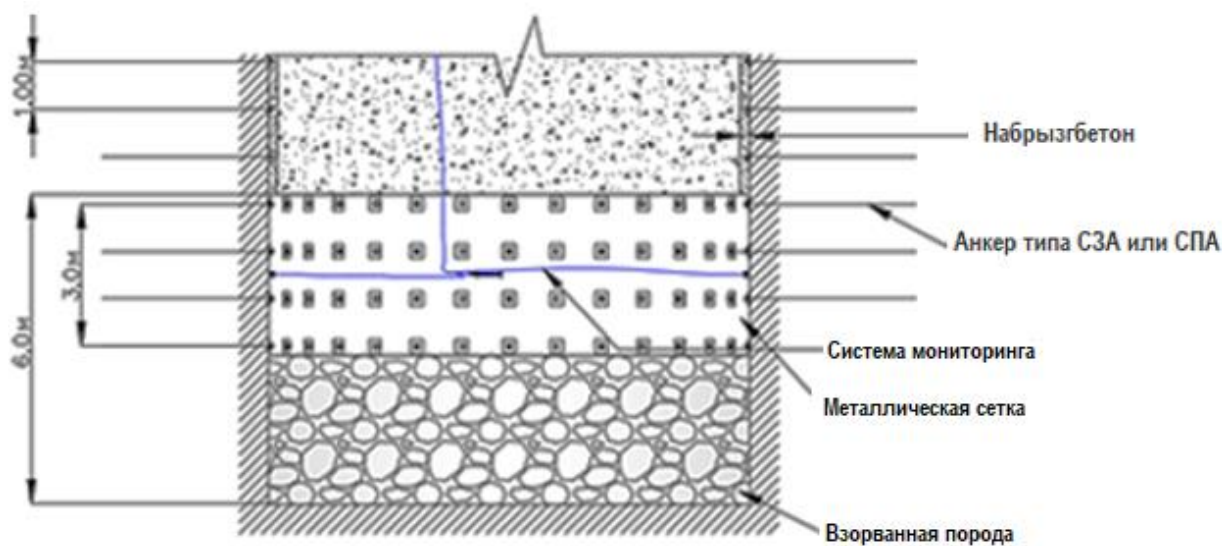
На следующем этапе исследований рассмотрены технологические аспекты крепления стволов на участках взаимовлияющих сопряжений. Предложен альтернативный подход к проходке таких участков в условиях неравнокомпонентного поля горизонтальных напряжений, который заключается в применении параллельной технологической схемы работ с возведением в призабойной зоне ствола передовой крепи с переменным по сечению ствола сопротивлением и организацией геомеханического мониторинга.

Передовая комбинированная крепь состоит из двух- или трехуровневых анкеров длиной L_1 , L_2 и L_3 , сетки или армокаркасов усиления и слоя набрызгбетона (рис. 8). Она устанавливается из забоя ствола по мере уборки породы. Постоянная монолитная бетонная крепь возводится с отставанием от забоя ствола до 35 м от забоя ствола.

Применение описанной технологии работ позволяет обеспечить нормативные скорости проходки стволов до 80 м/мес., что в 2,1 - 2,4 раза больше, чем при применении совмещенной технологической схемы проходки с монолитной железобетонной крепью.



а)



б)

Рисунок 8 – Пример схемы возведения передовой крепи ствола в условиях неравнокомпонентного тектонического воздействия

а) сечение; б) разрез

Обоснование параметров передовой крепи должно осуществляться на основании расчетов методами математического моделирования, позволяющих поэтапно рассмотреть все процессы, протекающие в системе «породный массив – передовая крепь – основная крепь». Верификацию моделей следует производить на основе получаемых по мере проходке экспериментальных данных о параметрах НДС массива пород и крепи.

В случае необходимости изменения проектных параметров по результатам мониторинга и дополнительных расчетов, указанные изменения в установленном порядке согласовываются со специализированной организацией, осуществляющей научное сопровождение проектирования и строительства объекта.

При производстве геомеханического мониторинга в призабойной зоне ствола осуществляется измерение конвергенции породных стенок и установка замерных станций, оснащенных датчиками деформаций. В неравнокомпонентном тектоническом поле горизонтальных напряжений следует комплектовать каждую замерную станцию не менее чем тремя группами датчиков, разнесенными под углом 120 градусов в сечении выработки.

Предлагаемая схема работ также позволяет выполнить более качественную оценку состояния пород массива в призабойной зоне ствола и оценить его устойчивость с использованием современных рейтинговых критериев, наиболее многофункциональным из которых является рейтинг MRMR – Mining Rock Mass Rating, предложенный Д. Лобширом.

На основании этого в диссертации разработан порядок определения параметров крепления стволов на участках взаимовлияющих сопряжений с учетом рейтинга MRMR пород и соотношения величин максимальных и минимальных горизонтальных тектонических напряжений в околоствольных породах (табл. 3).

Таблица 3 – Определение параметров комбинированной крепи стволов на участках взаимовлияющих сопряжений

Параметр	Интервалы значений						
	100-81	80-61		60-41		40-21	
Категория устойчивости массива	I	II		III		IV	
Отношение $\sigma_{hmax}/\sigma_{hmin}$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$> 1,5$	$\leq 1,5$	$> 1,5$	$\leq 1,5$	$> 1,5$
Длина анкеров, м	-	$L=1,5 \cdot k_l$	$L_1 = 1,5 \cdot k_l$ $L_2 = 1,75 \cdot k_l$	$L_1 = 1,75 \cdot k_l$ $L_2 = 2,0 \cdot k_l$	$L_1 = 1,75 \cdot k_l$ $L_2 = 2,0 \cdot k_l$ $L_3 = 2,25 \cdot k_l$	$L_1 = 2,25 \cdot k_l$ $L_2 = 2,5 \cdot k_l$	$L_1 = 2,25 \cdot k_l$ $L_2 = 2,5 \cdot k_l$ $L_3 = 2,75 \cdot k_l$
Диаметр стрежней сетки/армокаркаса	-	-	4 - 5	4 - 6	5 - 6,5	6,5 - 8	5 - 8 / 10 - 12
Размер ячейки*, мм			100 - 150	100 - 150	100	100	70 - 100 (сетка) 150 - 200 (армокаркас)
Толщина передовой набрызгбетонной крепи	50	80	80-100	100-120	120-150	150-180	180-200
Класс бетона передовой крепи	B20	B20 - B22,5	B22,5 - B25	B20 - B22,5	B22,5 - B25	B25 - B30	B30 - B35
Толщина основной крепи	250-300	250-300	300-350	300-400	350-400	400-500	450-500
Класс бетона основной крепи	B15 - B20	B20 - B25	B20 - B25	B25 - B30	B25 - B30	B30 - B35	B30 - B35

*Приведенные размеры могут изменяться в зависимости от горнотехнических условий.

Корректирующий коэффициент к длине анкеров k_l может быть принят по графикам на рис. 9 в зависимости от диаметра ствола D и величины максимальных горизонтальных напряжений в массиве σ_{hmax} . При этом во всех случаях не рекомендуется принимать минимальную длину анкеров менее 1,4 м.

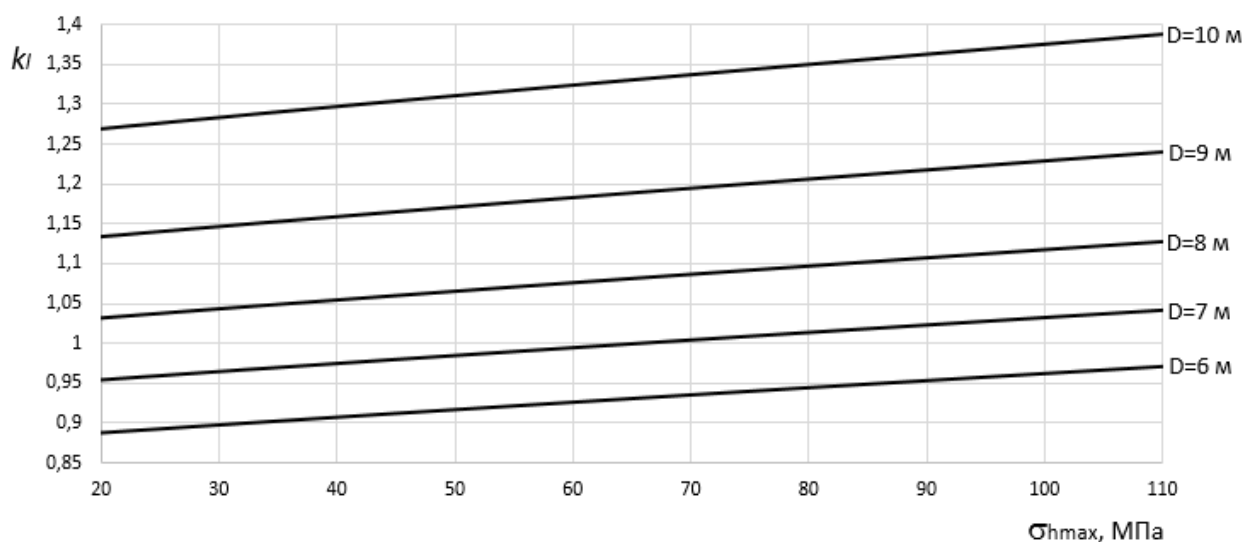


Рисунок 9 – Графики для определения коэффициента k_l

С помощью табл. 3 определяются предварительные параметры крепи с их окончательным уточнением по данным моделирования, расчетов, а также результатов мониторинга в призабойной зоне ствола в период проходки.

По результатам исследований сформулировано **третье научное положение**.

Результаты работы использованы при разработке нормативных документов и проектных решений для рудников Норильского промышленного района и Урала, строящихся и эксплуатирующихся в условиях неравнокомпонентного поля горизонтальных напряжений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, на основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработаны новые технические и технологические решения по креплению стволов на участках взаимовлияющих сопряжений, что имеет существенное значение для развития строительной геотехнологии, а также повышения экономической эффективности проходки шахтных стволов.

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ объемно-планировочных и конструктивных решений вертикальных стволов на участках взаимовлияющих сопряжений, а также произведена оценка возможности применения различных методов расчёта крепи стволов, сооружаемых в условиях неравнокомпонентного поля горизонтальных напряжений.

2. Проведены экспериментальные исследования взаимодействия крепи и околоствольных пород на участках взаимовлияющих сопряжений в условиях неравнокомпонентного поля горизонтальных напряжений. Определены значения коэффициентов неравномерности деформаций в передовой и основной крепи ствола в период проходки и эксплуатации ствола, дана оценка запаса несущей способности крепи с учетом влияющих факторов.

3. Рассмотрены основные расчетные предпосылки и разработаны пространственные конечно-элементные модели участков стволов на участках взаимовлияющих сопряжений четырех типов: расположение одностороннего (двухстороннего) сопряжения над аналогичным в одной плоскости; расположение одностороннего (двухстороннего) сопряжения над аналогичным перпендикулярно друг другу; одностороннее примыкание камер в одной плоскости с незначительным разнесением по глубине; одностороннее примыкание камер к стволу в перпендикулярных плоскостях с незначительным разнесением по глубине. В результате расчетов пространственных численных моделей определены параметры напряженно-деформированного состояния крепи на участках сопряжений и произведена общая оценка запаса ее несущей способности в различных горно-геологических условиях.

4. Установлено, что при увеличении значений коэффициента неравномерности горизонтальных напряжений запас несущей способности крепи снижается в 1,5 - 1,75 раз и более, при этом величины напряжений на участках взаимовлияющих напряжений на 7 - 10% выше, чем на участках одиночных напряжений. В широком диапазоне условий несущая способность бетонной крепи, возведенной по совмещённой схеме проходки, является недостаточной.

5. Предложен альтернативный подход к проходке и креплению стволов на участках взаимовлияющих сопряжений в условиях действия неравнокомпонентного поля горизонтальных напряжений, который заключается в применении параллельной технологической схемы с возведением в призабойной зоне ствола передовой крепи с переменным по сечению ствола сопротивлением. Передовая крепь включает в себя двух- или трехуровневые анкера, сетку, армокаркасы усиления и слой набрызгбетона. Постоянная монолитная бетонная крепь возводится с отставанием до 35 м от забоя ствола.

6. Разработан порядок определения параметров крепи для участков стволов между взаимовлияющими сопряжениями, предусматривающий применение крепи переменного сопротивления по сечению ствола. Он позволяет принять предварительные параметры крепи с их окончательным уточнением по данным моделирования, расчетов, а также геотехнического мониторинга в призабойной зоне ствола в период проходки.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО:

в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки

1. Маркин И. В. Напряженно-деформированное состояние крепи вертикальных стволов в неравномерном тектоническом поле напряжений: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2023. № 11 (специальный выпуск 11). 20 с.

2. Маркин И. В. Оценка несущей способности крепи и устойчивости ствола в неравномерном тектоническом поле напряжений // Инновации при строительстве глубоких вертикальных стволов: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2024. № 1 (специальный выпуск 3). С. 25-36.

3. Панкратенко А.Н., Маркин И.В. Технология комбинированного крепления шахтных стволов в условиях неравномерного тектонического воздействия // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2024. № 2. С. 415-424.

4. Панкратенко А.Н., Маркин И.В. Повышение эффективности крепления стволов в тектонически напряженном массиве пород // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2024. № 3. С. 407-419.

В прочих изданиях:

5. Маркин И.В. Особенности проектирования и расчета анкерной крепи при ремонте и восстановлении горных выработок // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики. Материалы 18-ой Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики. Под общей редакцией Р.А. Ковалева. Тула, 2022. С. 127-132.