

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

На правах рукописи



БОРОВИКОВ ЕВГЕНИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ
КОМБИНИРОВАННОГО ИСКУССТВЕННОГО МАССИВА ПРИ
ОСВОЕНИИ КРУТОПАДАЮЩИХ РУДНЫХ ТЕЛ СРЕДНЕЙ
МОЩНОСТИ**

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
доцент, доктор технических наук
Антон Анатольевич Зубков

Магнитогорск
2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. АНАЛИЗ ОПЫТА ОСВОЕНИЯ РУДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАМЕРНЫХ СИСТЕМ РАЗРАБОТКИ С ЗАКЛАДКОЙ. ЦЕЛЬ, ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	9
1.1. Анализ и обобщение опыта отработки рудных залежей камерными системами разработки с закладкой	9
1.2. Анализ способов и средств ведения закладочных работ при подземной разработке месторождений	20
1.3. Анализ существующих технологий с формированием комбинированного закладочного массива	34
1.4. Цель, задачи и методы исследований	38
Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНЪЕКТИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ СРЕД	39
2.1. Выбор методики исследования	39
2.2. Основные положения моделирования и обоснование критериев подобия .	40
2.3. Исследование основных характеристик закладочного материала и свойств раствора	44
2.4. Условия проведения эксперимента и его результаты	46
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2.....	52
ГЛАВА 3. ИЗЫСКАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТРАБОТКИ КРУТОПАДАЮЩЕЙ ЗАЛЕЖИ С КАМЕРНОЙ ВЫЕМКОЙ И ЗАКЛАДКОЙ	53
3.1. Оценка области применения систем с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями	53

3.2. Оценка существующей технологии отработки и ведения закладочных работ на примере Сафьяновского месторождения.....	60
3.3. Конструирование варианта камерной системы разработки с инъекционным упрочнением сыпучего закладочного массива	66
3.4. Расчет параметров упрочненного закладочного массива.....	71
3.5. Оценка напряженно-деформированного состояния упрочненного слоя.....	74
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3.....	81
Глава 4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЛАГАЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ.	83
4.1. Проведение и результаты опытно-промышленных испытаний технологии закладки	83
4.2. Сравнение технико-экономических показателей возможных вариантов систем разработки для отработки Сафьяновского месторождения.....	90
4.3. Решения по внедрению проекта оптимизации закладочных работ в условиях Сафьяновского подземного рудника.....	95
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4.....	97
Заключение.....	98
Список литературы.....	99

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

Ведение горных работ подземным способом характеризуется относительно сложными условиями, что обуславливает высокие эксплуатационные затраты на очистную выемку. Кроме того, длительный период практики подземной разработки месторождений полезных ископаемых обозначил некоторые особенности, заключающиеся в истощении запасов, находящихся в относительно благоприятных условиях, и сформировал особо сложные горнотехнические характеристики эксплуатации месторождений. Особая сложность связана с постоянным и динамичным ухудшением горно-геологических условий ввиду необходимости увеличения производственной мощности при снижении количественно-качественных характеристик добываемого сырья, а также ввода в эксплуатацию запасов, находящихся в зоне влияния охраняемых объектов или выработанного пространства.

Таким образом, сложные горно-геологические условия и сформированные в процессе эксплуатации горнотехнические условия, обуславливают снижение экономической эффективности разработки месторождения и безопасности ведения горных работ. Отработка таких запасов производится системами разработки, имеющими низкую производительность, что не обеспечивает требуемую производственную мощность при снижении содержания полезного ископаемого. Повышение производственной мощности компенсируется применением систем разработки с обрушением руды и вмещающих пород. Однако, учитывая низкие количественно-качественные характеристики запасов, применение данных систем разработки приведет к большому снижению эффективности производства и отказ от разработки месторождения.

Полноту выемки и безопасность ведения горных работ обеспечивают системы разработки с закладкой выработанного пространства. При этом высокие затраты на формирование твердеющего массива в совокупности с низким

содержанием полезного компонента также приводят к снижению рентабельности производства. Поэтому актуальным остается научное и практическое решение вопроса по снижению затрат на закладочные работы и возможности отработки запасов, находящихся в особо сложных горно-геологических и горнотехнических условиях эксплуатации без ухудшения показателей эффективности освоения недр.

Таким образом, **целью работы** является разработка и обоснование параметров технологии формирования комбинированного искусственного массива обеспечивающего снижение объема твердеющей закладочной смеси для повышение экономической эффективности отработки месторождения и безопасности ведения горных работ.

Идея работы заключается в снижении объема высокзатратной твердеющей смеси за счет техногенного преобразования свойств рудного, породного и искусственного массивов одновременно с ведением очистной выемки путем инъекционного упрочнения сухого закладочного массива.

Объект исследования – технология подземной разработки рудных месторождений. **Предмет исследований** – параметры технологии закладочных работ при освоении запасов рудных залежей камерными системами разработки с закладкой.

Задачи исследований:

- анализ и обобщение опыта закладочных работ при камерных системах разработки рудных залежей;
- конструирование варианта системы разработки с инъекционным упрочнением закладочного массива для условий отработки запасов, находящихся в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях;
- разработка технологии формирования искусственного массива при камерной системе разработки рудных залежей с закладкой;
- исследование процесса инъекционного упрочнения закладочного массива и определение зависимостей его параметров от геометрических размеров

выработанного пространства камер;

- разработка рекомендаций по отработке запасов, находящихся в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях, опытно-промышленные испытания технологии и расчет технико-экономических показателей.

Методы исследований: комплексный метод исследований, включающий: анализ и обобщение практики закладочных работ при отработке рудных залежей камерными системами разработки с закладкой; математическое моделирование напряженно-деформированного состояния элементов конструкции закладочного массива методом конечных элементов; физическое моделирование процесса закладочных работ; аналитические и статистические расчеты; технико-экономический анализ результатов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Эффективность освоения крутопадающих рудных залежей средней мощности, залегающих в сильнотрещиноватых неустойчивых породах, камерными системами разработки обеспечивается за счет технологии инъекционного упрочнения, обеспечивая одновременное укрепление породисячего и лежащего боков и их консолидацию с твердеющим массивом.

2. Угол наклона стенки камеры в сторону выработанного пространства и одновременное уплотнение не потерявшего подвижность твердеющего закладочного массива взрыванием зарядов в зажимающей среде обеспечивает дополнительный коэффициент запаса устойчивости равный 1,3 при расположении первого ряда скважин на расстоянии 1,1 м.

3. Устойчивостьисячего бока камеры обеспечивается при соотношении площади укрепленного массива и сухой породной закладки равным 1/3.

4. Расположение закладочных скважин в рудном массиве последующей отработываемой камеры обеспечивает увеличение линии наименьшего сопротивления в 1,5 раза и сокращение количества взрывных скважин в 1,8 раза.

Достоверность научных положений, результатов исследований, выводов и рекомендаций обеспечивается представительностью и надежностью исходных

данных, подтверждается сходимостью данных аналитических расчетов с лабораторными и промышленными испытаниями, а также показателями работы предприятия.

Научная новизна:

- разработана конструкция варианта камерной системы разработки с инъекционным упрочнением закладочного массива;

- установлены зависимости: толщины укрепленного слоя от длины и высоты камеры, прочности закладочного массива от расстояния удаления инъектора, прочности закладочного массива от водоцементного соотношения.

Личный вклад автора состоит в: формулировании цели и задач исследований; анализ и обобщение опыта закладочных работ при камерных системах разработки рудных залежей; конструировании варианта системы разработки с инъекционным упрочнением закладочного массива; разработки технологии формирования искусственного массива при камерной системе разработки рудных залежей с закладкой; разработке методик лабораторных и промышленных экспериментов и подготовке необходимого оборудования; непосредственном проведении исследований; разработке математической модели НДС массива пород методом конечных элементов; статистической обработке полученных результатов; определении конструктивных параметров технологии; расчете технико-экономических показателей технологии.

Практическая значимость работы заключается в том, что параметры технологии с инъекционным упрочнением сухого закладочного массива, обоснованные в результате исследований, и установленные зависимости позволяют повысить экономическую эффективность очистных работ при применении систем разработки с закладкой выработанного пространства. Материалы диссертации использованы при выполнении научно-исследовательской работы «Разработка технологии формирования искусственных массивов с заданными геотехническими характеристиками в условиях Сафьяновского медноколчеданного месторождения».

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на Международном научном симпозиуме «Неделя горняка» (г. Москва, 2017г.); Комбинированная геотехнология: ресурсосбережение и энергоэффективность (г. Магнитогорск, МГТУ, 2017г.); VI и VI Международной научно-технической конференции «Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений» (г. Екатеринбург, УГГУ, 2017-18 гг.); 75 и 76-ой Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (г. Магнитогорск, МГТУ, 2017-18 гг.); Международной конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики» (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет, 2018 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 работ, в том числе 4 статья в научном журнале, рекомендованном ВАК России, и 2 патента.

Глава 1. АНАЛИЗ ОПЫТА ОСВОЕНИЯ РУДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАМЕРНЫХ СИСТЕМ РАЗРАБОТКИ С ЗАКЛАДКОЙ. ЦЕЛЬ, ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Анализ и обобщение опыта отработки рудных залежей камерными системами разработки с закладкой

Накопленный опыт применения подземной геотехнологии для разработки рудных месторождений как в России, так и за границей свидетельствует о выраженной тенденции к росту объемов добычи с использованием камерных систем разработки с закладкой выработанного пространства [15, 27, 38, 58].

Значительный вклад в развитие теории и практики подземной разработки месторождений с использованием систем с закладкой выработанного пространства внесли труды таких ученых как: М.И. Агошков, А.И. Ананин, О.А. Байконуров, Р.В. Балах, Д.М. Бронников, М.И. Весков, А.П. Вяткин, И.Е. Ерофеев, Н.Ф. Замесов, П.Э. Зурков, А.П. Илюцин, В.Р. Именитов, В.Н. Калмыков, В.В. Квитка, Е.И. Коган, В.П. Кравченко, В.Т. Кравченко, Л.А. Крупник, Е.В. Кузьмин, В.В. Куликов, Л.В. Малетин, А.Н. Монтянова А.И. Мохов, В.Д. Палий, Г.А. Прокушев, К.Ю. Репп, М.В. Рыльникова, И.Н. Савич, К.Н. Светлаков, И.Т. Слацилин, А.Е. Смолдырев, А.А. Смирнов, А.Л. Требуков, М.Н. Цыгалов, Э.О. Штернбек и др.

На рис. 1.1 представлена конструкция системы разработки, которая применяется для выемки запасов рудных тел на залежи «Lappberget» в руднике «Garpennberg» (Швейцария). Параметры камер первой очереди составляют: ширина – 15 метров, высота – 40 метров, длина – определяется мощностью залежи. Закладка выработанного пространства осуществляется пастовой закладочной смесью, содержащей хвосты обогащения в пропорции не более 5% от общего объема смеси. Камеры второй очереди имеют ширину 20 метров. Заполнение выработанного пространства камер второй очереди производится с использованием сухой породной

закладки, для которой используются вмещающие породы, образованные в процессе проведения горно-подготовительных выработок [112].

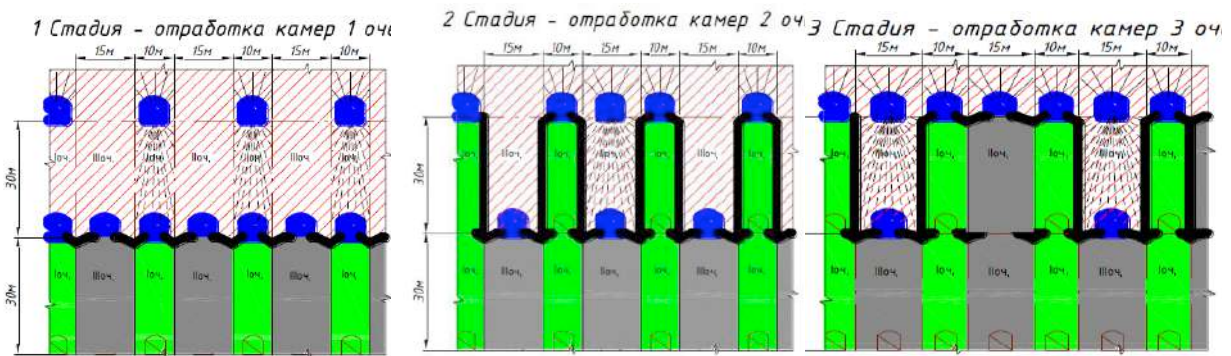


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема отработки камер 1 и 2 очередей с последующей их закладкой.

Недостатком камерно-целикового порядка отработки, который предполагает разделение запасов горизонта на очереди, является высокая степень разубоживания поднятой рудной массы, связанная с твердеющей закладкой. Стенки камер второй очереди обычно имеют два, а иногда и три контакта с заложеным искусственным массивом камер первой очереди (см. рис. 1.1). Восходящий порядок отработки запасов позволяет сократить расход вяжущего компонента. Тем не менее возникает вопрос о формировании несущего слоя в верхней части камер второй очереди, необходимого для перемещения самоходной техники при разработке вышележащих запасов.

В работе [84] Диком Ю.А., Арестовым О.Ю. и другими предложен вариант камерной системы разработки с шахматным расположением камер и последовательной закладкой. Оработка запасов выполняется в нисходящем порядке из-за низкой устойчивости рудного массива. Руда отбойка осуществляется с помощью нисходящих вееров скважин, с последующим вывозом рудной массы на доставочную выработку с использованием самоходной техники (см. рис. 1.2). Заполнение выработанного пространства осуществляется после завершения отработки всех запасов камеры до уровня буровой выработки, что обеспечивает вентиляцию соседних камер в рамках принятой конструкции

системы разработки. Однако основным недостатком данного варианта является накопление пустот из-за неполного заполнения выработанного пространства очистных камер, достигающее примерно 30% от объема обрабатываемых запасов.

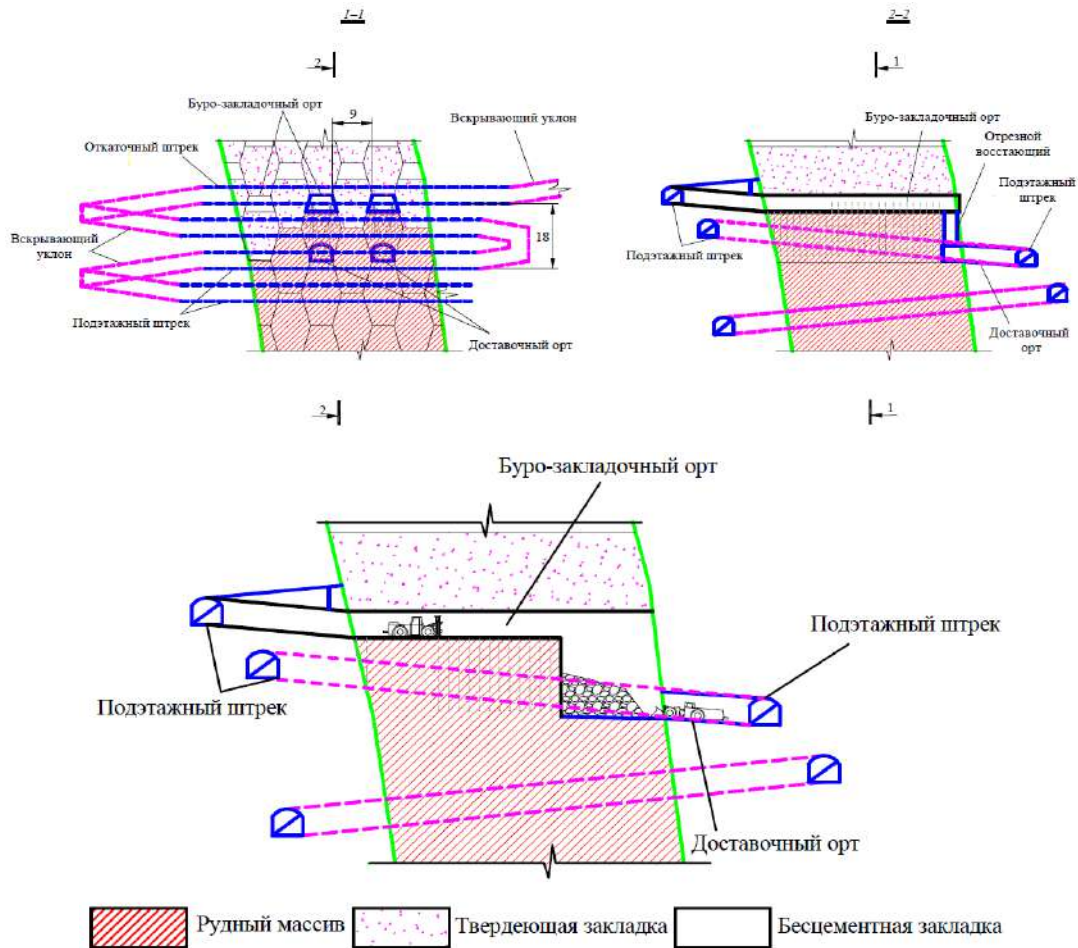


Рисунок 1.2 – Способ разработки крутопадающих рудных тел с неустойчивыми рудами

Шестаков В.А. и Игнатов А.Н. [101] предложили способ отработки рудных тел, основанный на использовании камер полигональной формы (см. рис. 1.3). При этом порядок отработки запасов может быть как восходящим, так и нисходящим, с возможностью совмещения очистных работ на различных подэтажах. Отбойка руды выполняется восходящими веерами скважин, при этом камеры нижележащего подэтажа сдвигаются на половину ширины камеры с учетом их формы. Положительной стороной данной конструкции системы

разработки является высокая производительность, связанная с осуществлением горных работ на разных подэтажах, а также возможность механизации многих производственных процессов. Однако недостатком данного подхода является риск обрушения камер из-за больших вертикальных обнажений и сложная форма очистных камер, что может быть проблематично при работе с неустойчивыми рудами. Стадийный порядок отработки обуславливает наличие нескольких контактов с закладочным массивом соседних камер, что приводит к высокому разубоживанию руды в результате твердеющей закладки.

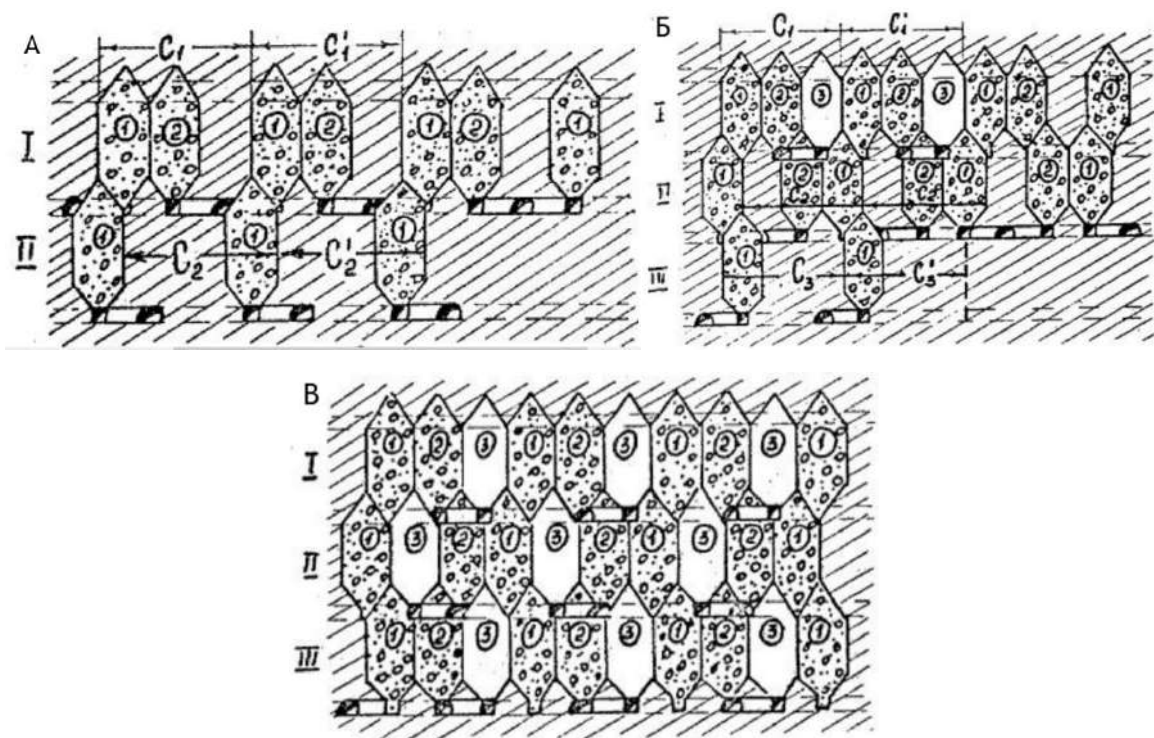


Рисунок 1.3 – Способ разработки рудных месторождений. Проекция на вертикальную плоскость схемы отработки слоев, заходок и камер, продольный разрез: а-б – этапы развития очистных работ

Способ, разработанный Трушко В.Л., Огородниковым Ю.Н. и Протосеней А.Г. [83], предполагает отработку рудного массива с использованием камер ромбовидной или эллипсовидной формы под защитным перекрытием. Камеры смежных этажей сдвигаются на половину их ширины, а выемка руды осуществляется взрывом скважин с дальнейшей закладкой выработанного пространства. Над верхним этажом создается защитное перекрытие с наклоном

5-7° в сторону висячего бока залежи.

Ширина, высота камер и высота камер верхнего этажа, а также угол наклона боковых стен камер определяются с использованием математических выражений, основанных на расчетах устойчивого пролета защитного перекрытия, ширины буропогрузочного орта и угла внутреннего трения рудного массива. После сооружения защитного перекрытия руду в камере разрабатывают заходками взрывом скважин в зажатой среде, причем очередная заходка отрабатывается только после закладки предыдущей.

Для неустойчивых руд, склонных к обрушению, забои очистных камер придают наклон, соответствующий углу естественного откоса рудного массива. В случаях, когда встречаются породы с прослойками, забоям очистных камер придают наклон, соответствующий углу падения рудной залежи. Этот подход позволяет повысить безопасность и эффективность процесса разработки месторождений.

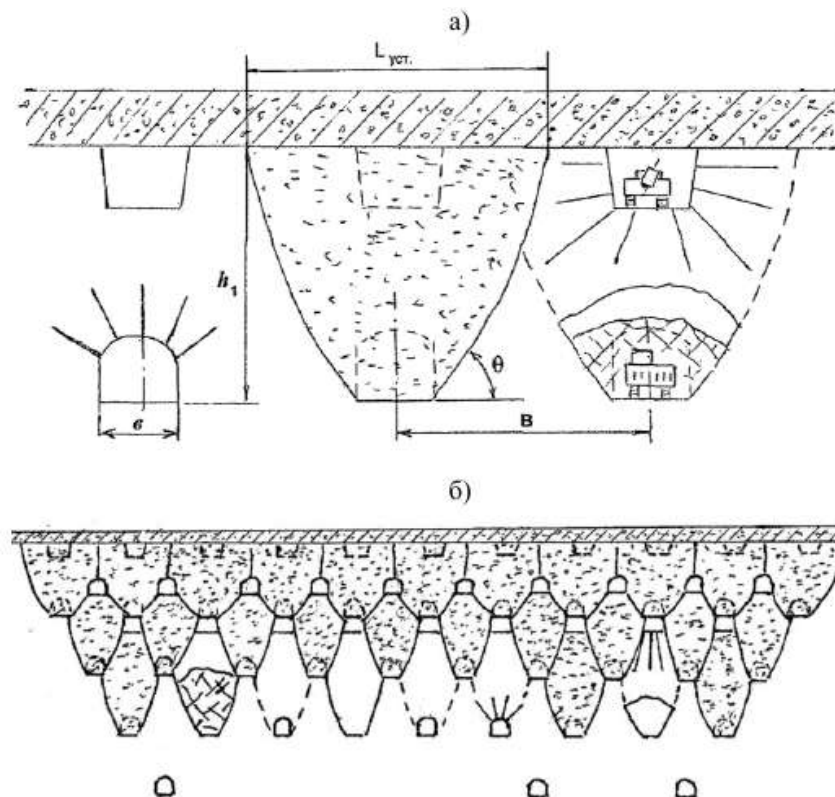


Рисунок 1.4 – Способ разработки мощных крутопадающих залежей слабых руд

С целью снижения потенциальной энергии упругих деформаций в сильнотрециноватом массиве была предложена система разработки с податливыми целиками [17]. Эта технология применяется для отработки запасов рудных тел средней мощности и крутом падении, осуществляя работу в восходящем порядке.

Принципиальная схема варианта системы разработки представлена на рис. 1.5. Данная система способствует более эффективному распределению нагрузки на массив, что позволяет снизить риск обрушений и увеличить стабильность выработок. Использование податливых целиков позволяет лучше адаптироваться к деформациям массива и снижает напряжение, возникающее в ходе разработки.

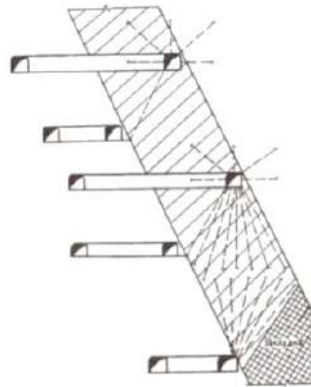


Рисунок 1.5 – Восходящая разработка месторождения средней мощности камерами ромбовидной формы

Бурение вееро скважин выполняется из буровой выработки, расположенной на границе с вмещающими породами висячего бока, где ожидается повышенная концентрация растягивающих напряжений. В условиях низкой устойчивости рудного массива буровая выработка крепится для обеспечения безопасности. Днище камеры при достаточном угле падения рудного тела конструктивно располагается со стороны лежачего бока. Очистная выемка камер осуществляется по простиранию с использованием твердеющей закладки, обладающей низкой нормативной прочностью, или сухой породной без вяжущего компонента. Для отработки мощного рудного тела камеры также

располагают по простиранию рудного тела (см. рис. 1.6). Такой подход способствует улучшению контроля за состоянием выработок и позволяет более эффективно управлять процессом разработки, минимизируя риски, связанные с обрушениями и другими негативными факторами.

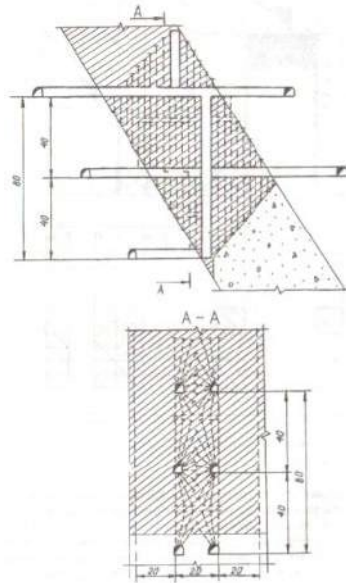


Рисунок 1.6 – Восходящая разработка мощного месторождения камерами ромбовидной формы

Конструкция варианта каменной системы разработки с податливыми рудными целиками представлена на рис. 1.7. Ключевой особенностью данного варианта является использование сухой породной закладки с оставлением постоянных рудных целиков. Податливость целиков способствует перераспределению концентрации упругой энергии деформирования, что позволяет снизить напряжение в массиве [20]. Однако основным недостатком этой системы являются повышенные потери руды в междукammerных целиках. Это обстоятельство ограничивает область применения данной технологии, так как эффективность разработки может снижаться из-за значительного количества невыбранной полезной ископаемой. Поэтому, несмотря на ряд преимуществ, таких как улучшение устойчивости выработок и снижение рискованных ситуаций, необходимо тщательно подходить к выбору условий и участков, где может быть использована данная система разработки.

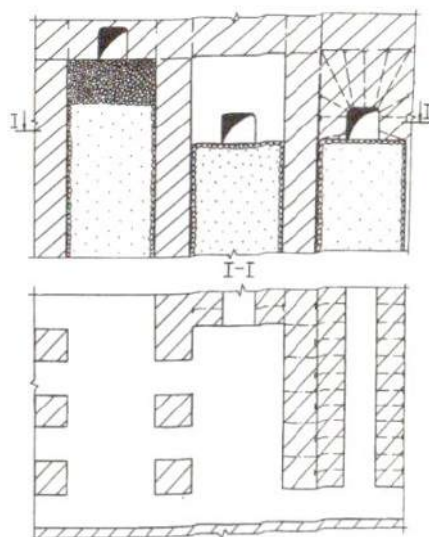


Рисунок 1.7 – Камерная выемка с податливыми целиками и породной закладкой

С учетом постоянного снижения содержания полезного компонента в процессе эксплуатации месторождений, а также общей тенденции снижения качества добываемого сырья, назрела необходимость в изыскании способов снижения себестоимости подземной добычи. Общеизвестно, что увеличение высоты этажа и конструктивных параметров блоков, наряду со снижением капитальных затрат, повышает интенсивность вскрытия и подготовки запасов. В процессе формирования днища блока целесообразно применять более простые схемы подготовки и нарезки, такие как торцевой выпуск [92]. Авторами предложен вариант системы разработки подэтажных штреков с восходящей выемкой и твердеющей закладкой выработанного пространства [92]. Сущность этой системы заключается в отработке руды с формированием камер полигональной (шестигранной) формы, без оставления междуканнерных целиков (см. рис. 1.8). Данная технология обеспечивает высокие качественно-количественные показатели отработки запасов при низком удельном коэффициенте подготовительно-нарезных работ. Однако использование этой технологии подразумевает полную закладку выработанного пространства твердеющими смесями, что приводит к увеличению стоимости очистной

выемки. Это обстоятельство требует тщательного анализа экономической эффективности и возможных альтернатив при выборе данной системы в условиях конкретного месторождения.

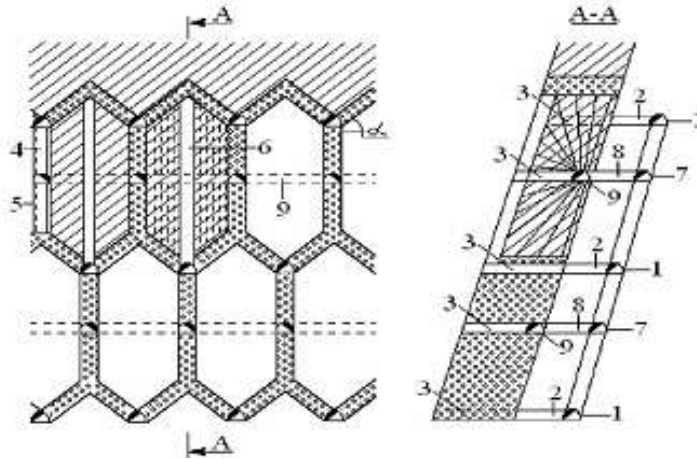


Рисунок 1.8 – Камерная система разработки подэтажными штреками и твердеющей закладкой: 1 – этажные штреки; 2 – этажные квершлагги; 3 – орты; 4 – отрезные восстающие; 5 – скважины; 6 – отрезная щель; 7 – подэтажные штреки; 8 – подэтажные квершлагги; 9 – рудные подэтажные штреки

На Желтореченском месторождении для эффективной и безопасной подземной разработки запасов железистых кварцитов, с целью сохранения земной поверхности и существующих объектов, проектом предусмотрена технология отработки рудного тела в восходящем порядке. В данной технологии применяется этажно-камерная система разработки с последующим заполнением выработанного пространства твердеющей закладкой, основанной на использовании собственных вяжущих компонентов и отходов обоганительного производства [9]. Для отработки запасов рудного тела № 6 Юбилейного месторождения и участков рудных тел мощностью до 15 м при угле падения 65° – 70° проектом [106] была принята подэтажно-камерная система разработки. В рамках этого подхода камеры располагаются по простиранию с закладкой твердеющими смесями (см. рис. 1.9). Данная система позволяет оптимизировать процесс разработки, улучшить безопасность ведения работ и обеспечить более стабильную работу всех выработок за счет эффективного заполнения выработанного пространства.

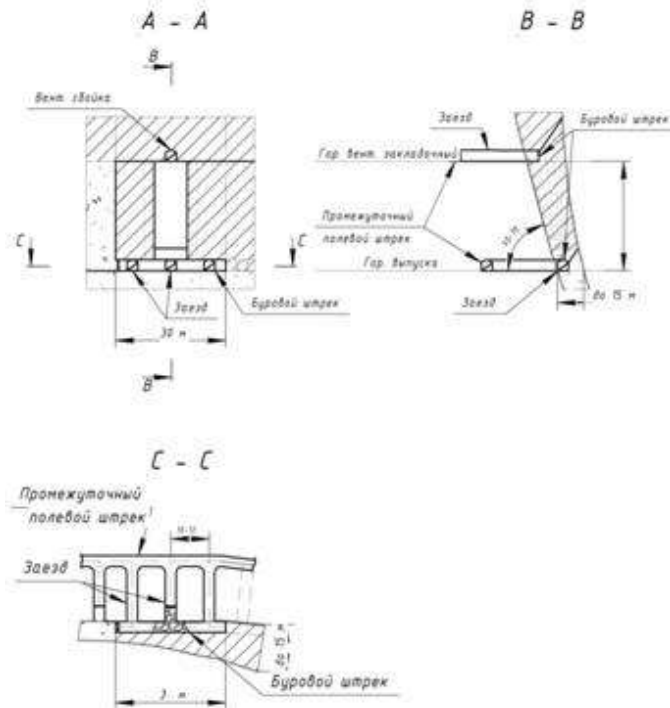
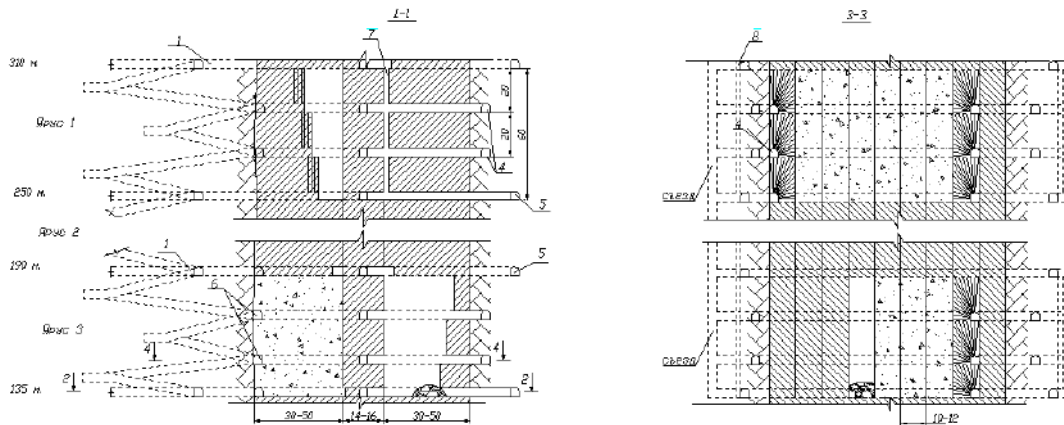


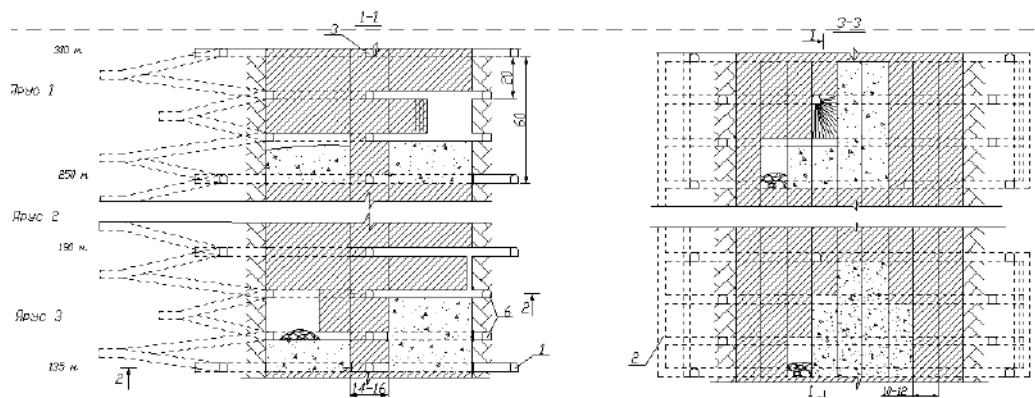
Рисунок 1.9 – Вариант подэтажно-камерной системы разработки с промежуточным буровым горизонтом и полной закладкой выработанного пространства твердеющими смесями

Камерные системы разработки с твердеющей закладкой обеспечивают снижение показателей потерь и разубоживания, а также сохраняют целостность земной поверхности. Например, для отработки запасов Озерного месторождения была принята система этажно-камерной разработки (см. рис. 1.10) и подэтажно-камерной системы разработки (см. рис. 1.11) с закладкой и сплошным порядком отработки [73].

Эти подходы способствуют более полной выемке руды и повышению общей эффективности разработки месторождения, особенно в условиях сложной геологической обстановки. Применение твердеющей закладки позволяет не только улучшить устойчивость выработок, но и минимизировать воздействие на окружающую среду и снизить риски, связанные с обрушением горных выработок.



**Рисунок 1.10 – Сплошная система с закладкой и плоским дном.
Вариант с отбойкой на высоту этажа**



**Рисунок 1.11 – Сплошная система с закладкой и плоским дном.
Вариант с отбойки подэтажами в восходящем порядке**

Недостатком сплошного порядка отработки является снижение производительности очистной выемки из-за необходимости выполнения закладочных работ. Однако практика разработки Озерного месторождения продемонстрировала, что одновременное ведение горных работ на нескольких этажах (подэтажах) позволяет значительно повысить интенсивность отработки запасов [73]. Такой подход не только способствует увеличению общего объема добычи, но и позволяет оптимизировать производственные процессы, снизить затраты на закладку и минимизировать время ожидания между этапами разработки. Это, в свою очередь, улучшает общую экономическую эффективность эксплуатации месторождения и позволяет более рационально использовать ресурсы.

1.2. Анализ способов и средств ведения закладочных работ при подземной разработке месторождений

В практике подземной разработки всесторонне рассмотрены вопросы применения камерных систем разработки с закладкой [16, 19, 30, 111, 117]. На основе накопленного опыта ведения закладочных работ было разработано множество видов закладочного материала (см. рис. 1.13), включая дробленые горные породы, хвосты обогатительных фабрик, шлаки металлургических заводов, золу тепловых электростанций, а также твердеющие и бетонные смеси, песок, глину и другие материалы. Наиболее широко используются закладочные смеси на основе отходов горно-обогатительного производства, которые обеспечивают снижение себестоимости закладочных работ и высокую безопасность ведения горных операций. Использование таких материалов не только способствует уменьшению затрат, но и позволяет эффективно утилизировать производственные отходы, что делает процесс разработки более экологически устойчивым.



Рисунок 1.12 – Диаграмма использования инертных (а) и вяжущих материалов (б) в закладочных работах (%)

Специалистами ЗАО «Маггеоэксперт» на основе выполненных лабораторных исследований [34] были рекомендованы составы бесцементной закладки для заполнения отработанных камер. В качестве вяжущего в этих составах используются шлак и негашеная известь, что позволяет добиться

нужных свойств закладочного материала. Для замедления процесса гашения добавляют лигносульфонат технический. В качестве заполнителя рекомендуется использовать дробленый диабаз и текущие хвосты обогащения. Такие составы обеспечивают надежное заполнение выработанного пространства и способствуют более эффективной стабилизации горных выработок, что в свою очередь, увеличивает безопасность ведения работ и минимизирует экологические риски. Использование недорогих и доступных компонентов также положительно сказывается на экономической эффективности процесса закладки.

Искусственный бесцементный массив достигает прочности до 6,3 МПа в возрасте трех месяцев, что позволяет повысить устойчивость обнажений искусственного массива, сократить объем отслоений закладки и снизить разубоживание рудной массы. Экономический эффект достигается путем снижения себестоимости приготовления закладочной смеси за счет замены цемента низкомарочным вяжущим.

Примером эффективного использования отходов является рудник Хорн в Канаде, где для закладки выработанного пространства используются гранулированный шлак (72%), отвальный шлак (25%) и пирротиновые хвосты (3%) [115]. На Малеевском месторождении [97] наряду с традиционными твердеющими смесями применяются также бутобетонная закладка, твердеющая смесь совместно с сухой породой от проходческих работ, закладка сухой породой и гидрозакладка.

Бутобетонная закладка, которая включает использование дробленой породы в качестве заполнителя, получила широкое распространение благодаря высокому экономическому эффекту. Однако данный метод имеет свои недостатки: формирование бутобетонной закладки требует дополнительных затрат на дробление породы, а также может характеризоваться недостаточной прочностью искусственного массива [39, 47, 57]. Например, на руднике «Керетти» компании «Оутокумпу Ой» в Финляндии камеры второй очереди

засыпаются пустой породой (см. рис. 1.14).

Эти примеры показывают, что эколого-экономические аспекты, бережное отношение к ресурсам и использование отходов предлагают эффективные решения для улучшения технологических процессов в подземной разработке.

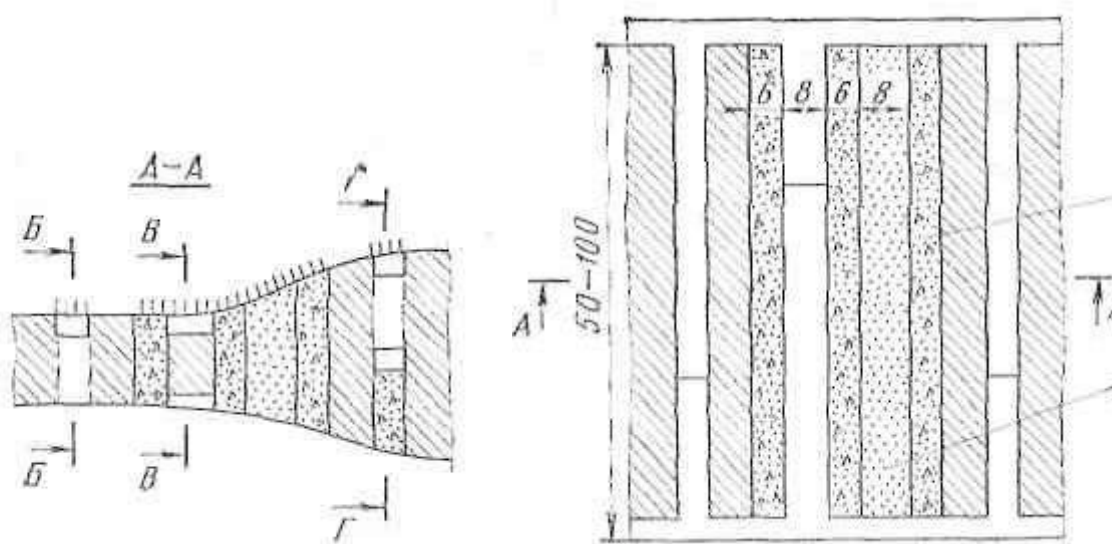


Рисунок 1.13 – Камерно-столбовая система разработки с последующей закладкой выработанного пространства на руднике Керетти (Финляндия)

Перспективным направлением для камерных систем с закладкой является применение отдельного способа формирования закладочного массива из бутобетонной закладки. Этот метод предполагает подачу породы в твердеющий раствор (см. рис. 1.15), что позволяет существенно сократить стоимость работ и повысить прочность искусственного массива без необходимости дополнительного дробления породы [59].

Данный подход является эффективным решением, поскольку обеспечивает однородное распределение заполнителя в закладочном массиве, что, в свою очередь, приводит к улучшению его механических свойств и устойчивости. Кроме того, использование этого способа способствует более рациональному использованию материалов и снижению влияния на окружающую среду, так как минимизирует процесс дробления и перемещения породы. Такой метод может

оказаться особенно актуальным в условиях ограниченности ресурсов и необходимости повышения экономической эффективности подземных работ.

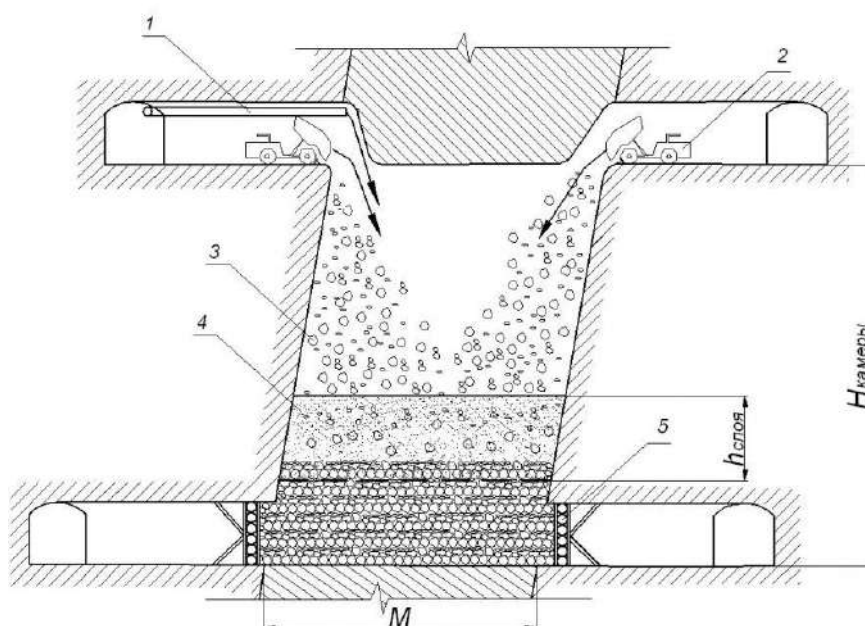


Рисунок 1.14 – Принципиальная схема отдельного способа формирования породо-бетонной закладки: 1 – закладочный трубопровод; 2 – транспортная машина; 3 – куски породы; 4 – слой раствора твердеющей закладки; 5 – закладочная перегородка

Несомненным достоинством данной технологии является исключение необходимости выдерживания фракционного состава закладываемой породы. Однако, учитывая необходимость подачи сыпучего материала с двух противоположных сторон камеры, возникает необходимость проходки выработок по висячему и лежачему бокам камеры, что в свою очередь увеличивает объем подготовительных и нарезных работ (ПНР). Также увеличивается количество точек подачи породы по длине камеры, что, с точки зрения безопасности закладочных работ, создает риск близкого подъезда автосамосвала к краю камеры.

Согласно патенту [102], для закладки камер второй очереди при восходящем порядке ведения горных работ сыпучую породную закладку подают автосамосвалами непосредственно из заездов в камеру с откаточного штрека вышерасположенного этажа. Порода распределяется по площади камеры и

уплотняется с помощью бульдозеров, создавая плоское днище (см. рис. 1.16). Это изобретение способствует снижению себестоимости добываемой руды, сокращению объема нарезных работ в блоке и снижению потерь руды благодаря более эффективной погрузке и зачистке днища блока с использованием дистанционного управления.

Таким образом, предлагаемый подход сочетает в себе технологическую эффективность и повышенные меры безопасности, что делает его привлекательным для применения в современных горных работах.

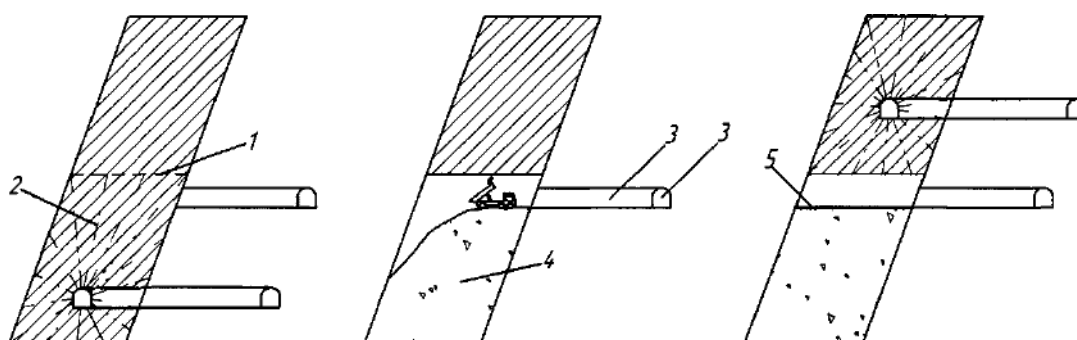


Рисунок 1.15 – Схема создания плоского днища блока при восходящем порядке ведения работ (а-в – стадии создания плоского днища: а – отбойка руды; б – закладка блока; в – формирования днища с помощью бульдозеров)

Авторами работы [113] разработаны технологии возведения искусственного массива на основе твердеющей смеси и пустой породы. Первый вариант данной технологии предусматривает подачу сыпучего материала с ранее сформированной искусственной потолочины камеры (см. рис. 1.17). Этот подход позволяет оптимизировать процесс закладки, так как использует уже существующую конструкцию для распределения материала, что может снизить затраты на трудозатраты и время выполнения работ.

Применение такой технологии также улучшает качество закладочного массива, обеспечивая более равномерное распределение породы и лучшее уплотнение материала. Это особенно важно для предотвращения отслоений и увеличения прочности закладочного массива, что, в свою очередь, способствует повышению устойчивости обнажений и снижению рисков, связанных с

применением традиционных методов закладки.

Таким образом, разработанные технологии могут значительно повысить экономическую эффективность подземных работ и минимизировать негативное воздействие на окружающую среду за счет более рационального использования ресурсов.

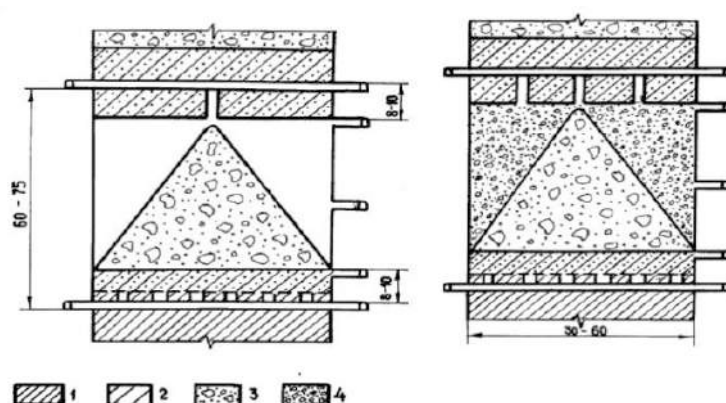


Рисунок 1.16 – Вариант системы разработки с закладкой выработанного пространства разнопрочными смесями: 1 – руда; 2 – твердеющая закладка; 3 – породная закладка; 4 – упрочненная цементно-породная закладка

При этом, гранулометрический состав породы подбирается с наибольшей пустотностью, для более эффективного проникновения раствора. Объем породы размещаемого в камере, при данной технологии зависит от естественного угла откоса самих пород. На практике средний угол естественного откоса пород составляет 40-45 град., тогда при высоте камеры 60-75 м и длине – 60 м, высота навала не должна превышать 30 м, что в свою очередь свидетельствует о том, что объем утилизируемой породы составит не более 30-45 %. Второй предложенный вариант – система разработки подэтажными ортами наклонными слоями с закладкой (рис. 1.18) характеризуется высокими показателями потерь полезных компонентов при отбойке на породный закладочный массив.

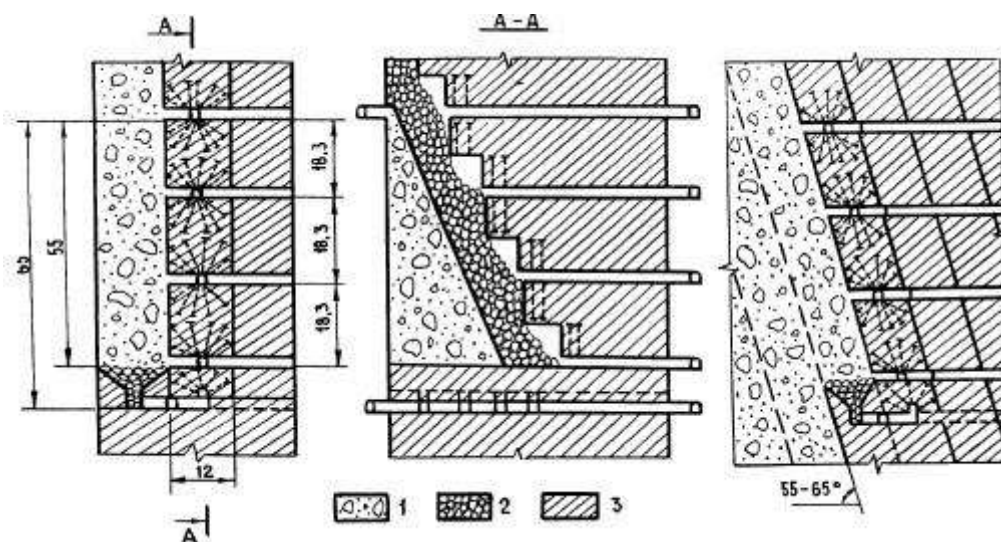


Рисунок 1.17 – Система разработки подэтажными ортами наклонными слоями с закладкой: 1 – породная закладка; 2 – отбитая руда; 3 – рудный массив

При этом granulометрический состав породы подбирается с максимально возможной пустотностью, что способствует более эффективному проникновению раствора в заполнение пустот. Объем породы, размещаемой в камере при данной технологии, зависит от естественного угла откоса самих пород. На практике средний угол естественного откоса составляет 40-45 градусов. При высоте камеры в 60-75 м и длине 60 м высота навала не должна превышать 30 м, что указывает на то, что объем утилизируемой породы составит не более 30-45 %. Второй предложенный вариант включает систему разработки подэтажными ортами наклонными слоями с закладкой (см. рис. 1.18). Этот метод характеризуется высокими показателями потерь полезных компонентов при отбойке пород, что может снизить общую эффективность процесса недропользования. Использование обеих технологий подчеркивает важность оптимизации процесса закладки, выбора подходящего granulометрического состава породы и учета углов откоса для достижения максимальной эффективности и устойчивости закладочных массивов. Это имеет решающее значение для обеспечения безопасности и экономической целесообразности горных работ.

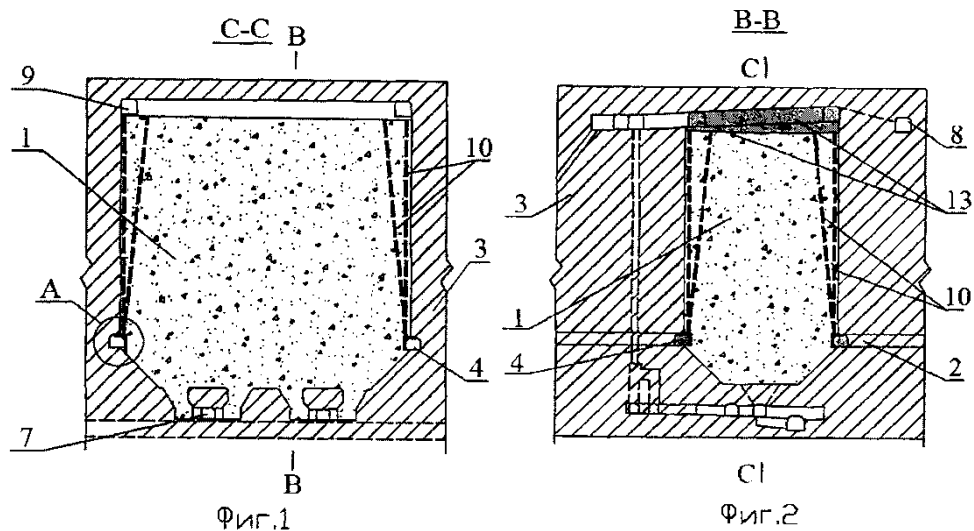


Рисунок 1.18 – Формирование закладочного массива с армирующими элементами

Перспективным направлением является способ инъекционной закладки, при котором предварительно происходит заполнение выработанного пространства сухой закладкой, а затем по трубам с поверхности осуществляется подача вяжущего раствора. Этот раствор проникает в пустоты дробленой породы и превращает её в монолит. Однако, как правило, монолит, образованный таким способом, обладает недостаточно высокой прочностью. Основными недостатками данной технологии являются сложность управления распространением раствора в сыпучей среде и неравномерная прочность участков закладочного массива [78].

Инъекционный способ применялся на руднике «Каулоа-Котсельвара» (комбинат «Печенганикель») [66]. Исследования различных цементно-песчаных растворов показали, что наиболее эффективным является раствор состава Ц:П=1:1 и В:Ц=0,75 с осадкой конуса 14 см и водоотделением 2,5 %. При испытаниях инъекторов наилучшие результаты были получены с использованием двухметровых инъекторов с равномерным увеличением диаметра отверстий перфорации от 15 до 20 мм. Хорошие результаты наблюдались также при нагнетании в закладку цементного молока с водоцементным соотношением 0,48, что позволяло раствору проникать во все

межзерновые пространства, включая мельчайшие фракции. Однако инъекция беспесчаного раствора экономически нецелесообразна из-за значительного расхода цемента, достигающего 300 кг.

Внедрение инъекционного метода может способствовать снижению себестоимости закладочных работ за счет значительного снижения капитальных затрат и эксплуатационных расходов. Кроме того, организация работ при инъекционном методе значительно проще и не требует специальных подготовок материала, используемого в качестве крупного заполнителя. Возможность направлять в закладку камер породы от проходки выработок облегчает работу рудничного транспорта и подъема, а также позволяет более эффективно использовать производственную мощность рудника.

Автором работы [64] была разработана технология заполнения выработанного пространства комбинированной закладкой на основе твердеющей смеси и пустой породы. Суть технологии заключается в одновременной подаче рыхлой сыпучей закладки автосамосвалами с одной стороны блока, а с другой – монолитной твердеющей закладки (см. рис. 1.20). В результате формируется искусственный монолитный целик, который препятствует высыпанию закладки в выработанное пространство следующей камеры. Регулируя скорость подачи сыпучей и твердеющей закладок, можно управлять размерами искусственного целика и, соответственно, улучшать характеристики закладочного массива.

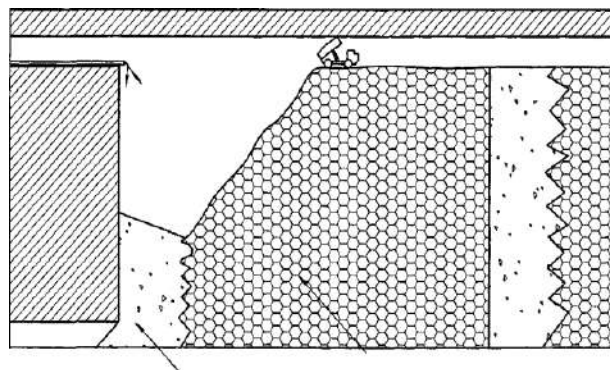


Рисунок 1.19 – Вариант камерной системы разработки с одновременной подачей твердеющей и сыпучей закладки

Отбойка руды с вышерасположенного этажа, осуществляемая на верхнем слое закладки, имеет ряд существенных недостатков, которые могут негативно сказаться на производительности и эффективности горных работ. К основным недостаткам данной технологии можно отнести следующие:

1. Необходимость заезда автосамосвала непосредственно в очистное пространство камеры. Это требует дополнительного пространства и может ограничить доступ к руде.

2. Подъезд автосамосвала к краю несформированного закладочного массива для осуществления разгрузки. Это создает риск потенциального обрушения и увеличивает требования к безопасности.

3. Затруднительное передвижение автосамосвала по закладочному массиву из породы. Неровная поверхность и нестабильность закладочного массива могут замедлить процессы транспортировки и разгрузки.

4. Сложность контроля ведения закладочных работ. Неправильное распределение породы в закладочном массиве может привести к ухудшению его прочности и устойчивости.

5. Повышенные показатели потерь и разубоживания руды при отбойке запасов вышележащего горизонта на закладочный массив. Это приводит к снижению эффективности работы и утрате полезных компонентов.

6. Усадка закладочного массива. С течением времени и под действием нагрузки порода может сжиматься, что ослабляет структуру закладки и может снижать ее эффективность.

7. Подсечение вышележащего массива на значительных площадях. Это может создать дополнительные риски для безопасности, так как увеличивает вероятность обрушений.

Учитывая перечисленные недостатки, существует необходимость в разработке и внедрении более эффективных технологий закладки и отбойки руды, которые минимизируют риски и повысят общую эффективность горных работ.

В работе [2] предложена технология формирования комбинированного закладочного массива, которая заключается в одновременном заполнении выработанного пространства сухой и твердеющей закладкой. Твердеющий массив формируется на границе рудного массива сопряженной камеры и составляет порядка 30 % от общего объема закладочного массива (см. рис. 1.21).

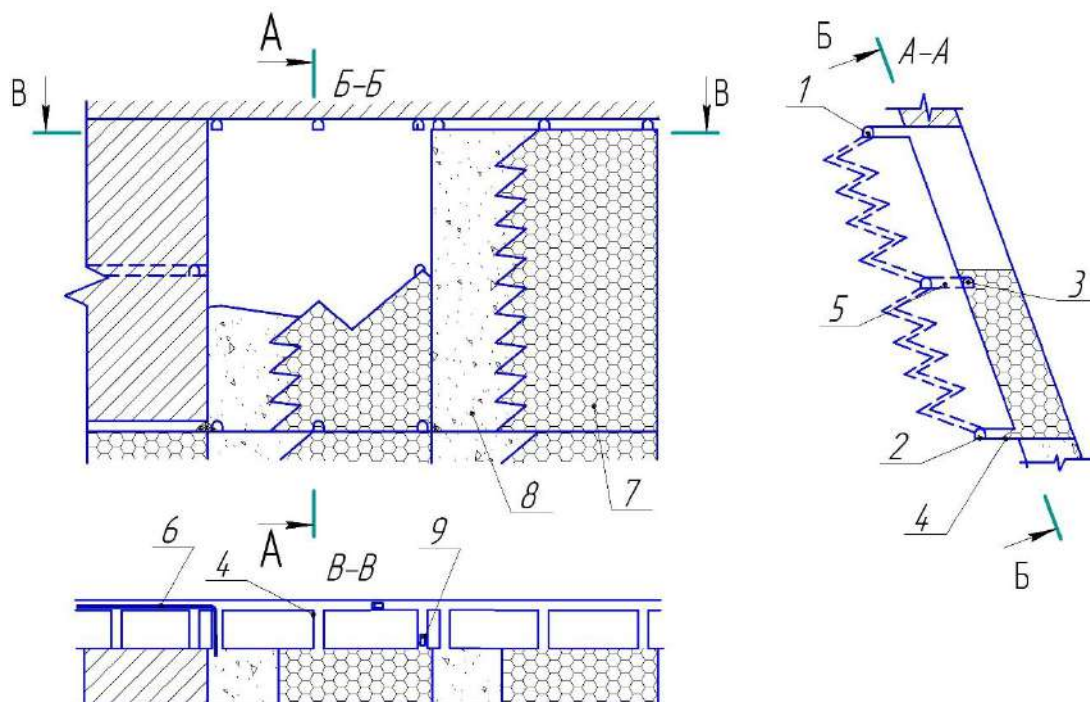


Рисунок 1.20 – Стадия закладочных работ: 1 –полевой вентиляционный штрек; 2 –полевой доставочный штрек; 3 –подэтажный буровой штрек; 4 –транспортный заезд; 5 –подэтажный буровой орт; 6 –закладочный трубопровод; 7 –породная закладка; 8 –твердеющая закладка; 9 –автосамосвал

Разработанный способ создания и поддержания устойчивости закладочного массива имеет значительные преимущества. Он позволяет существенно снизить стоимость закладочных работ благодаря более эффективному использованию ресурсов и материалов. Кроме того, данная технология способствует реализации экологически безопасной технологии восходящей выемки, так как включает в себя утилизацию пустых пород из отвалов и проходческих работ.

Использование пустых пород как заполнителя в закладочных работах помогает сократить объем отходов и уменьшить негативное воздействие на

окружающую среду. В результате такая комбинированная закладка не только экономически выгодна, но и соответствует современным требованиям по охране экологии, что делает ее привлекательным вариантом для внедрения в практику горных работ.

В работе [63] предложена идея формирования композитного закладочного массива (см. рис. 1.22), которая заключается в сочетании двух видов закладки – сухой породной и литой твердеющей. Этот подход позволяет создать закладочный массив, который характеризуется комбинированным способом возведения, композитным составом, а также разнопрочными и разномодульными механическими характеристиками. Комбинированный метод формирования массива обеспечивает оптимальное распределение нагрузки и повышает устойчивость закладочного пространства, так как различные составляющие работают в симбиозе, компенсируя недостатки друг друга. Сухая породная закладка способствует поддержанию структуры и уменьшает объемные потери, тогда как литая твердеющая закладка обеспечивает дополнительную прочность и защите от обрушений. Разнопрочные и разномодульные характеристики композитного массива делают его более адаптивным к условиям эксплуатации, позволяя эффективно справляться с различными механическими нагрузками и воздействиями среды. Это открывает новые возможности для улучшения эффективного использования ресурсов и повышения безопасности горных работ. Кроме того, использование такого массива может снизить затраты на закладку и улучшить контроль за процессами, связанными с формированием и поддержанием устойчивости закладочного пространства.

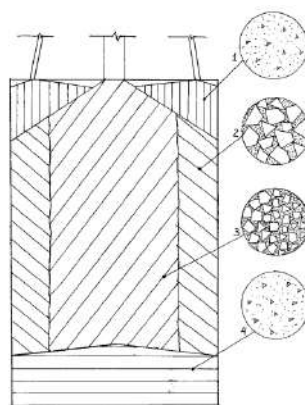


Рисунок 1.21 – Структура композитного закладочного массива: 1 – литая твердеющая закладка, 2 – порода крупной фракции, цементированная твердеющей закладкой, 3 – сухая порода двухмодального состава, 4 – литая твердеющая закладка повышенной прочности

Для условий восходящей отработки Естюнинского месторождения [99] был разработан вариант выемки трапециевидными камерами с наклонными торцовыми стенками, где используется сухая закладка, укрепленная цементным раствором (см. рис. 1.23). В данной технологии реализуется двухстадийный камерно-целиковый порядок отработки камер в этаже по схеме 1-2-1-2-1.

С целью создания устойчивого закладочного массива в обеих торцовых частях камеры 1-й очереди формируется откос благодаря наклонным стенкам (угол наклона составляет $55-70^\circ$). Это обеспечивает дополнительную поддержку структурной целостности закладки и сокращает риск обрушений. Закладочный массив формируется путем тщательной отсыпки слоев сухой закладки, которые затем укрепляются цементным раствором.

В камерах 2-й очереди закладочный массив создаётся с использованием сухой закладки, доставляемой из выработок буро-вентиляционного горизонта. Такой подход позволяет обеспечить более равномерное распределение нагрузки и снизить потенциальные риски, связанные с усадкой и нестабильностью закладочного массива. Внедрение данной технологии может значительно повысить эффективность отработки месторождения, улучшая условия работы и безопасность в горных выработках.

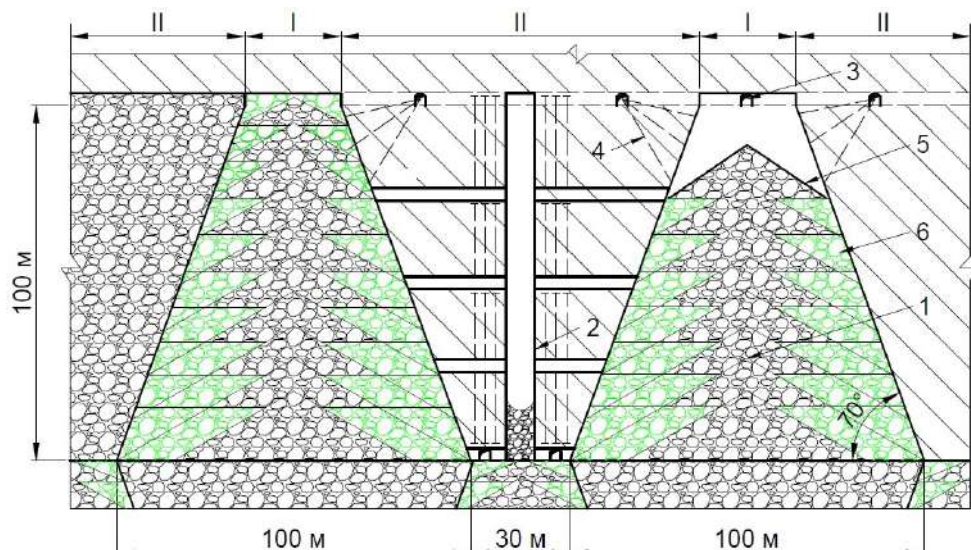


Рисунок 1.22 – Вариант выемки трапециевидными камерами с комбинированной закладкой: I, II –порядок отработки, 1 –отсыпка слоев сухой закладки и их укрепление в камере 1-й очереди, 2 – закладочные выработки, 3 –отработка камер 2-й очереди, 4 – закладочные скважины для подачи укрепляющего раствора, 5 – формируемый слой сухой закладки, 6 – укрепленный откос

Таким образом, на основе проведенного анализа закладочных работ на отечественных и зарубежных рудниках выявлена возможность применения дробленой породы в качестве закладочного материала. На практике отработки месторождений Урала использование дробленой породы все чаще находит применение, что обеспечивает снижение себестоимости закладочных работ. Кроме того, это способствует уменьшению негативного влияния отходов горного производства на окружающую среду. Применение дробленой породы как закладочного материала не только экономически оправдано, но и экологически целесообразно, поскольку позволяет повторно использовать материалы, которые в противном случае могли бы стать отходами. Это, в свою очередь, способствует улучшению устойчивости закладочных массивов и повышению общей безопасности горных работ. Таким образом, переход на использование дробленой породы может стать важным шагом к более рациональному и экологически чистому подходу в горнодобывающей отрасли.

1.3. Анализ существующих технологий с формированием комбинированного закладочного массива

Наиболее перспективным направлением снижения вязущего в производстве закладочной смеси является применение комбинированных способов систем разработки и различных видов управления состоянием массива [45]. Учитывая имеющийся отечественный и зарубежный опыт инъецирования скрепляющими составами и отбойку массива горных пород в зажимающей среде, предлагается объединить их в создании новой технологии формирования искусственного массива, обеспечивая повышение его несущей способности. Причем свойства сухой закладочной смеси благоприятно сказываются на использовании технологии инъецирования и обеспечивают укрепление массива вмещающих пород и связь с искусственным массивом за счет проникновения по трещинам. Этим достигается дополнительный эффект, за счет действия статических и динамических нагрузок вызывающий появление более равномерного поля напряжений благодаря заполнению трещин и пустот в различных направлениях и системах. Наблюдается перевод искусственного массива из состояния одноосного сжатия в состояние равнокомпонентного объемного сжатия [28], что существенно повышает прочность пород и делает массив подобным монолитной строительной конструкции, способной выдерживать большие статические и динамические нагрузки.

Существующие положения по проектированию и возведению комбинированного искусственного массива с инъекционным упрочнением не имеет достаточного научного обоснования, несмотря на то, что в качестве основного средства поддержания выработок в устойчивом состоянии в трещиноватых, нарушенных породах все шире используется упрочнение вмещающего породного массива [12]. Очевидно, для управления состоянием нарушенного приконтурного массива необходимо его уплотнение и упрочнение [53], как при возведении безрубцовых перемычек и инъекционной цементацией

нарушенной приконтурной зоны горных выработок. Данная технология заключается в следующем. Серии шпуров, пробуренные во вмещающих породах по периметру места возведения перемычки, используются не только для анкерования, но и для инъекционного нагнетания специализированного состава. Ключевым моментом в этом процессе является его начало – с центрального анкера, расположенного в самой нижней точке создаваемой цементационной завесы (на рис. 1.23 обозначено цифрой 1). После этого, с использованием спаренных нагнетательных шлангов, производится инъектирование состава в скважины, пронумерованные 2, 3 и так далее, вплоть до завершения процесса. Такой подход обеспечивает равномерное распределение инъекционного материала и позволяет эффективно создать цементационную завесу, способствующую повышению устойчивости конструкций и предотвращению появления вероятных разрывов или трещин в вмещающих породах. Кроме того, данный метод инъекционного нагнетания способствует улучшению механических характеристик окружающих пород, что увеличивает долговечность и надежность возводимых конструкций. Тщательное планирование и исполнение процесса инъектирования также играют важную роль в достижении желаемых результатов и повышении общей безопасности при проведении горных работ.

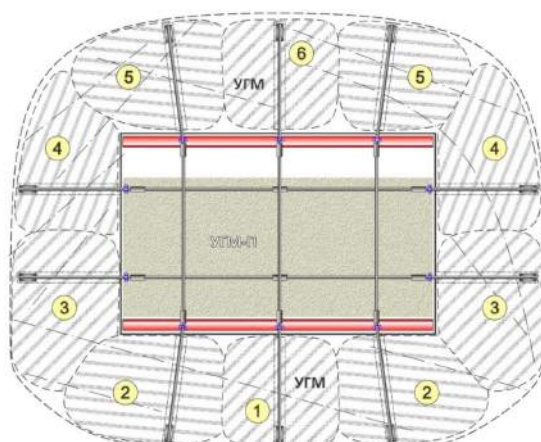


Рисунок 1.23 – Конструкция армированной перемычки с инъекционным упрочнением и уплотнением приконтурной зоны

Технология укрепления сухой породной закладки, путем инъецирования, позволяет сформировать защитную оболочку и обеспечивается консолидация искусственного массива с нарушенными вмещающими породами, характеризующаяся как совокупность взаимовлияющих элементов.

Все чаще в качестве основного средства поддержания выработок в устойчивом состоянии в трещиноватых, нарушенных породах используется упрочнение вмещающего породного массива. Применение, так называемой, породобетонной крепи позволяет повысить устойчивость обнажений при использовании традиционных типов крепи [13] и, как следствие, сократить затраты на крепление.

В аспекте постоянно усложняющихся условий эксплуатации месторождения, связанных с отработкой рудных тел в сильнотрещиноватых массивах вмещающих пород, инъекционное упрочнение наиболее предпочтительно, так как необходимым условием применения инъекционного упрочнения пород является наличие вокруг выработки трещиноватой зоны [52]. В представленной работе рассматривается использование инъекционного упрочнения как основного средства обеспечения устойчивости вновь проводимых выработок в условиях, когда вокруг них развивается зона неупругих деформаций. Глубина упрочнения определяется границами области интенсивности трещиноватости, которая сформировалась вокруг выработки к моменту проведения инъекционных работ.

Схема, иллюстрирующая процесс определения глубины упрочнения пород по контуру выработки, представлена на рис. 1.24. Эта схема позволяет визуализировать динамику распространения трещиноватости и помогает в оценке необходимых параметров инъекционного воздействия.

Инъекционное упрочнение, в свою очередь, направлено на создание прочной цементационной завесы, которая будет способствовать повышению устойчивости и долговечности горных выработок. Правильное определение глубины упрочнения играет важную роль в обеспечении надежности

конструкций и снижении вероятности обрушений, что, в конечном счете, положительно сказывается на безопасности проведения горных работ и снижении экономических потерь.

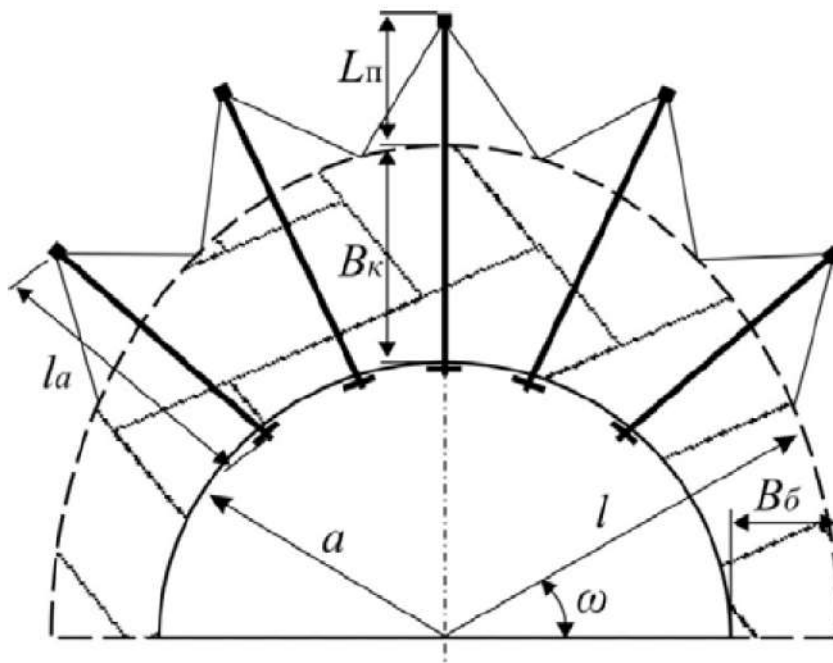


Рисунок 1.24 – Схема к определению глубины упрочнения пород по контуру выработки

Уравнение, связывающее основные параметры взаимодействия системы «упрочненная приконтурная зона» – «массив» при условии $0,3 \leq \gamma H/R \leq 0,8$:

$$\frac{R_y}{E_y} = \varphi' \frac{Z R}{Z_y E} \frac{(2\gamma \frac{H}{R} + 1) \cdot (0,5 + 0,66 \frac{E}{M}) \cdot r_p^2}{(1 + \lambda) \cdot (1 + \mu_y) \cdot [r_p^2 (1 - 2\mu_y) + 1]},$$

где R и R_y – прочность породного массива и упрочненных пород; E и E_y – модуль упругости породного массива и упрочненных пород; Z и Z_y – реологические параметры породного массива и упрочненных пород; H – глубина, на которой находится рассматриваемая точка массива; γ – средневзвешенный удельный вес пород; M – модуль спада; $r_p = l/a$ – безразмерный радиус зоны разрушения; l – радиус контура устойчивой части массива; a – радиус горной выработки; μ_y – коэффициент Пуассона упрочненных пород; $\lambda = \sin \rho / (1 - \sin \rho)$; ρ – угол внутреннего трения пород.

1.4. Цель, задачи и методы исследований

Анализ опыта систем подземной разработки и технологий закладочных работ показал, что широкое распространение при отработке рудных залежей получили камерные системы разработки с различной технологией закладки выработанного пространства, как твердеющими смесями, так и отходами добычи и производства. Одним из важных направлений при камерной системе разработки является изыскание новых технологий формирования закладочных массивов на основе пустых пород отвалов и проходки, обеспечивающей снижение стоимости закладочных работ. Таким образом, проведенный выше анализ позволяет сформулировать цель и основные задачи работы.

Целью работы является разработка и обоснование параметров технологии формирования комбинированного искусственного массива обеспечивающего снижение объема твердеющей закладочной смеси для повышение экономической эффективности отработки месторождения и безопасности ведения горных работ.

Идея работы заключается в снижении объема высокочатратной твердеющей смеси за счет техногенного преобразования свойств рудного, породного и искусственного массивов одновременно с ведением очистной выемки путем инъекционного упрочнения сухого закладочного массива.

Методы исследований: комплексный метод исследований, включающий: анализ и обобщение практики закладочных работ при отработке рудных залежей камерными системами разработки с закладкой; математическое моделирование напряженно-деформированного состояния элементов конструкции закладочного массива методом конечных элементов; физическое моделирование процесса закладочных работ; аналитические и статистические расчеты; технико-экономический анализ результатов.

Глава 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНЪЕКТИРОВАНИЯ СЫПУЧИХ СРЕД

2.1. Выбор методики исследования

Нагнетание раствора в сыпучие среды представляет собой довольно сложное явление и зависит от ряда факторов, включающих свойства среды и раствора, кинематических и динамических характеристик потока, технологии производства работ, исходя из этого при решении поставленных задач с учетом выявления интересующих факторов, влияющих на параметры инъекционного укрепления и создания монолитных массивов, необходимо принять метод, который позволил бы вывить и изучить характер движения растворов и радиус влияния инъекторов. Изучение их в производственных условиях, особенно в изолированных камерах большого объема, очень трудоемко.

Поэтому в качестве основного принят метод лабораторных экспериментов с применением натуральных материалов, позволяющих создавать условия наблюдения отдельных сторон процесса в достаточно надежном виде. С целью уточнения и корректирования полученных лабораторных результатов и, в отдельных случаях, для получения зависимостей, которые трудно установить в лаборатории, проведен производственный эксперимент в условиях подземного рудника. В обработке полученных экспериментальных данных использован вероятностный (статистический) метод, позволивший провести анализ явлений с учетом присущих им элементов случайности. Известно, что статистическая обработка результатов экспериментов с использованием корреляционного анализа обеспечивает необходимую надежность выявленных закономерностей.

Таким образом, для решения поставленных задач приняты следующие методы исследований: лабораторное моделирование, производственный эксперимент, статистическая обработка результатов и аналитические расчеты.

2.2. Основные положения моделирования и обоснование критериев подобия

Гидромеханические процессы, как правило, развиваются под влиянием большого числа факторов, которые проявляются не каждый индивидуально, а в сложных сочетаниях один с другим. Следовательно, при решении задачи целесообразно рассматривать не множество независимых переменных и постоянных параметров, а их безразмерные комплексы, называемые критериями подобия, в структуре которых отражено взаимодействие различных влияний.

Задача о подобии сводится к установлению условий однозначности, выделяющих единственное явление, описанное в относительных координатах. Обычно при любой виде моделирования не удается сохранить полного подобия между натурными и модельными системами, однако для каждого конкретного изучаемого явления должно соблюдаться подобие тех величин, характеризующих процесс, которые имеют существенное значение для пород изучаемого явления.

Поэтому доказано [123], что «...достаточным условием подобия двух систем является равенство любых двух соответствующих критериев этих систем, составленных из основных параметров и начальных граничных условий». Физическое моделирование позволяет сформулировать указанные условия модельных испытаний и устанавливает приемы переноса результатов лабораторных исследований на натурные объекты при условии соблюдения законов подобия.

Математическим методам решения задач с применением теории подобия посвящена довольно обширная литература. Однако в технической литературе последнего времени физические модели применительно к укрепительной инъекции сыпучих сред отсутствуют.

Критерии подобия могут быть получены двумя способами: методом анализа размерностей и путем приведения к безразмерному виду уравнений,

описывающих процесс. Достоинством первого метода является универсальность и возможность использования всех существенных факторов, независимых и зависимых переменных при выводе условий подобия. Поэтому воспользуемся указанным способом, в основе которого лежит «П-теорема» [11, 95].

Рассмотрим модель для изучения движения раствора в инъецируемой среде. Опытные данные и общие соображения дают основания считать, что в явлении участвуют следующие физические величины:

1. Характерные геометрические размеры: средний диаметр пор d_0 , средний диаметр частиц раствора d_f , радиус распространения раствора R , проницаемость K .

2. Кинематические и динамические характеристики потока: расход Q или средняя скорость V , перепад давления ΔP , время движения T .

3. Свойства раствора: объемная масса γ , плотность ρ , динамический коэффициент вязкости μ .

Известно, что размерность данной физической величины определяется соотношением между ней и теми физическими величинами, которые приняты за основные. В качестве первичных примем размерности L , T , M , тогда размерность вторичной величины f может быть записана:

$$[f] = L^\lambda \cdot T^\tau \cdot M^\mu \quad (2.1)$$

где λ , τ , μ –некоторые константы, которые могут быть равны любому действительному числу.

Согласно «П-Накопленный теореме» запишем:

$$f(d_0, d_r, R, V, \Delta P, T, \gamma, \rho, \mu, K) = 0 \quad (2.2)$$

$$\varphi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7) = 0$$

Для образования параметров π за основание единицы приняты d_0 , V , ρ , тогда безразмерные комплексы запишутся [4]:

$$\pi_1 = d_0^{x_1} \cdot V^{y_1} \cdot \rho^{z_1} \cdot d_r^{-1} \quad (2.3)$$

$$\pi_2 = d_0^{x_2} \cdot V^{y_2} \cdot \rho^{z_2} \cdot R^{-1} \quad (2.4)$$

$$\pi_3 = d_0^{x_3} \cdot V^{y_3} \cdot \rho^{z_3} \cdot P^{-1} \quad (2.5)$$

$$\pi_4 = d_0^{x_4} \cdot V^{y_4} \cdot \rho^{z_4} \cdot T^{-1} \quad (2.6)$$

$$\pi_5 = d_0^{x_5} \cdot V^{y_5} \cdot \rho^{z_5} \cdot \gamma^{-1} \quad (2.7)$$

$$\pi_6 = d_0^{x_6} \cdot V^{y_6} \cdot \rho^{z_6} \cdot \mu^{-1} \quad (2.8)$$

$$\pi_7 = d_0^{x_7} \cdot V^{y_7} \cdot \rho^{z_7} \cdot K^{-1} \quad (2.9)$$

Согласно (2.1) неизвестные показатели x_i , y_i , z_i при подстановке размерностей величин, входящих в комплексы π должны удовлетворять условию

$$d_0^{x_1} \cdot V^{y_1} \cdot \rho^{z_1} \cdot d_r^{-1} = L^0 \cdot T^0 \cdot M^0 \quad (2.10)$$

или

$$L^{x_1}(L \cdot T^{-1})^{y_1} \cdot (M \cdot L^{-3})^{z_1} \cdot d_r^{-1} = L^0 \cdot T^0 \cdot M^0 \quad (2.11)$$

Приравнивая показатели степени при одинаковых размерностях, получим:

$$x_1 - y_1 - 3z_1 - 1 = 0; \quad y_1 = 0; \quad z_1 = 0 \text{ откуда } x_1 = 0$$

Таким образом, $\pi_1 = d_0/d_r$.

Решая аналогичным образом остальные системы линейных уравнений, получим остальные критерии, позволяющие соблюдать полное динамическое подобие натуральных и модельных потоков:

$$\pi_2 = \frac{d_0}{R} \quad (2.12)$$

$$\pi_3 = \frac{\rho V^2}{\Delta P} = E_n \quad (2.13)$$

$$\pi_4 = \frac{d_0}{vt} = \frac{1}{S_t} \quad (2.14)$$

$$\pi_5 = \frac{V^2 \rho}{d_0 \gamma} = F_r \quad (2.15)$$

$$\pi_6 = \frac{\rho V d_0}{\mu} = R_e \quad (2.16)$$

$$\pi_7 = \frac{d_0}{K} \quad (2.17)$$

Комплексы π_3 , π_4 , π_5 , π_6 соответственно называются числом Эйлера, Струхала, Фруда, Рейнольдса. Критерии π_1 , π_2 , π_7 характеризуют условие геометрического подобия, а остальные – условие кинематического и динамического подобия.

На основании теоремы подобия (2.2) и условий подобия (2.4) общий вид системы уравнений в безразмерном виде может быть записан:

$$\varphi\left(\frac{d_0}{R}, \frac{d_0}{d_r}, E_n, S_t, F_r, R_e, \frac{d_0}{K}\right) \quad (2.18)$$

Для осуществления полного динамического подобия необходимо равенство всех критериев (4.3) модельных и натуральных потоков. Это условие выполнимо, если масштаб подобия близок к единице.

В области устойчивого ламинарного движения, что имеет место при течение растворов в сыпучей среде, характерно доминирующее влияние сил внутреннего трения. Поэтому здесь распределение скорости по сечению пор V остаётся неизменным во всем интервале чисел не превосходящих R_e критических. В то же время для ламинарных течений E_n принимает чрезмерно большое значение и теряет смысл обобщённого параметра. Поэтому соединяя оба критерия π_3 и π_6 , будем иметь критерий, который в гидродинамике называют числом Лагранжа.

$$\frac{\pi_6}{\pi_3} = \pi_{63} = \frac{V\rho d_0}{\mu} \div \frac{\rho V^2}{\Delta P} = \frac{\Delta P d_0}{V\mu} = L_a \quad (2.19)$$

В виду равенства $q_H = q_M$ и из условия применения натуральных материалов вытекает, что $V_H = V_M$. Поэтому моделирование по числу Фруда не представляется возможным. Отсюда можно сделать вывод, что общим требованием для динамического подобия течения инъекционных растворов в неустановившемся режиме является равенство чисел Лагранжа и Струхала.

Тогда можно записать

$$L_a = \frac{\Delta P_M d_{0M}}{V_M \mu_M} = \frac{\Delta P_H d_{0H}}{V_H \mu_H} \quad (2.20)$$

$$S_t = \frac{d_{0M}}{V_M T_M} = \frac{d_{0H}}{V_H T_H} \quad (2.21)$$

Отсюда отношение скоростей V_K движения растворов промышленных с учетом (4.3) равно

$$V_K = \Delta P_K \text{ и } V_K = 1/T_K$$

Так как отношение скоростей в двух случаях должны быть равными, то

$$\Delta P_K = 1/T_K$$

Известно, что $T_K = R_K/V_K$ и $V_K = q_K/S_K$

где R_K – отношение радиусов распространения растворов; q_K – отношение

расходов; S_K – отношение сечений.

Поэтому можно записать

$$\frac{\Delta P_M}{\Delta P_H} = \frac{q_M S_M R_M}{q_H S_H R_H} \quad (2.22)$$

Сделав преобразования, не трудно определить радиус проникновения раствора в натуральных условиях:

$$R_H = R_M = \frac{q_H S_M \Delta P_M}{q_M S_H \Delta P_H} \quad (2.23)$$

Таким образом, при соблюдении условий подобия сил давления и сил инерции появляется возможность моделирования инъекции сыпучей закладки укрепляющими растворами.

2.3. Исследование основных характеристик закладочного материала и свойств раствора

Предварительная оценка свойств закладочного материала осуществляется по методикам, отдельные элементы которой заимствованы из работ [30, 31, 60, 105].

1. Коэффициент неоднородности материала:

$$K_H = \frac{D_{60}}{D_{10}}, \quad (2.24)$$

2. Коэффициент И. С. Мицца, характеризующий сопротивляемость материала размыву текучей средой:

$$K_M = \frac{D_{85}}{D_{10}}, \quad (2.25)$$

где D_{10} , D_{60} , D_{85} – диаметры частиц, меньше которых соответственно содержится 10, 60, 85 % материала.

3. Теоретическая пустотность материала (по М. Павличу):

$$\Pi = \frac{0,63}{\sqrt[6]{K_H + 0,63}}, \quad (2.26)$$

4. Коэффициент уплотнения материала закладки под давлением:

$$K_{\text{упл}} = \frac{\Pi_{\text{нач}} - \Pi_{\text{кон}}}{P}, \quad (2.27)$$

где $\Pi_{\text{кон}}$ –пустотность материала при давлении P .

5. Коэффициент усадки материала:

$$\lambda = a \cdot \lg \sigma - b \quad (2.28)$$

где a, b –опытные коэффициенты; σ –приложенное давление, кг/ см²

6. Средний диаметр частиц закладки:

$$D = \frac{\sum D_i \cdot q_i}{V_{\text{мелк}}} = \frac{\sum D_i \cdot q_i}{\frac{100 - \Pi_{\text{max}}(1 - \Pi)}{1 - \Pi_{\text{max}}}}, \quad (2.29)$$

где Π_{max} – пустотность наиболее крупного материала; D_i –диаметр частиц от самых мелких до граничного значения, определяемого процентным числом $V_{\text{мелк}}$, находится по кривой гранулометрического состава; q_i –процент к отдельных наибольшей фракций.

7. Коэффициент проницаемости закладочного материала:

$$K = \frac{1}{184 \cdot \alpha^2} \cdot \frac{\Pi^3}{(1 - \Pi^2)} \cdot D^2, \quad (2.30)$$

где α –коэффициент формы зерен.

8. Средний диаметр пустот закладочного материала:

- для материалов крупностью 0...40 мм

$$d_{\Pi} = 0,75 \Pi D + 0,68 \quad (2.31)$$

- для материалов крупностью 0...5 А мм

$$d_{\Pi} = 0,82 \Pi D + 0,17 \quad (2.32)$$

При выборе материалов для приготовления инъекционных растворов следует руководствоваться следующими принципами: частицы раствора должны быть значительно меньше, чем размеры пор закладки; раствор должен обладать пренебрежительно малой седиментацией, хорошей текучестью и проникать на большое расстояние. Омоноличенный массив должен обладать нормативной прочностью, допустимыми деформационными свойствами.

2.4. Условия проведения эксперимента и его результаты

Исследования по определению основных параметров нагнетания укрепляющих растворов в закладку производилось на модели. Модель представляет собой короб размерами $A=0,5$ м, $B=4$ м., $C=0,5$ м. По одной из стенок прокладывается перфорированный иньектор, к которому проводится вертикальный трубопровод диаметром 50 мм, соединенный с самим иньектором через шаровый кран. У основания иньектора был установлен манометр. По достижению плотности раствора равной 1,1 – 1,15 и белее подача раствора прекращалась. С учетом того, что схватывание цемента происходит в течение 24 часов, избытки воды удалялись через дренажное отверстие.

В качестве крупного заполнителя были использованы породы с проходческих работ Сафьяновского месторождения фракцией +3-40.

Иньекционный раствор представлял собой водоцементную смесь В: Ц=4:1, В: Ц=3:1, В: Ц=2:1, В: Ц=1:1 подаваемую к иньектору через трубопровод длиной 10 м. Полученные образцы испытаны в 7, 28 и 90 суток. Результаты модельных исследований пересчитаны на натурные с учетом критериев подобия, приведенные ранее. Обобщенные графики показаны на рис. 2.1 – 2.6.

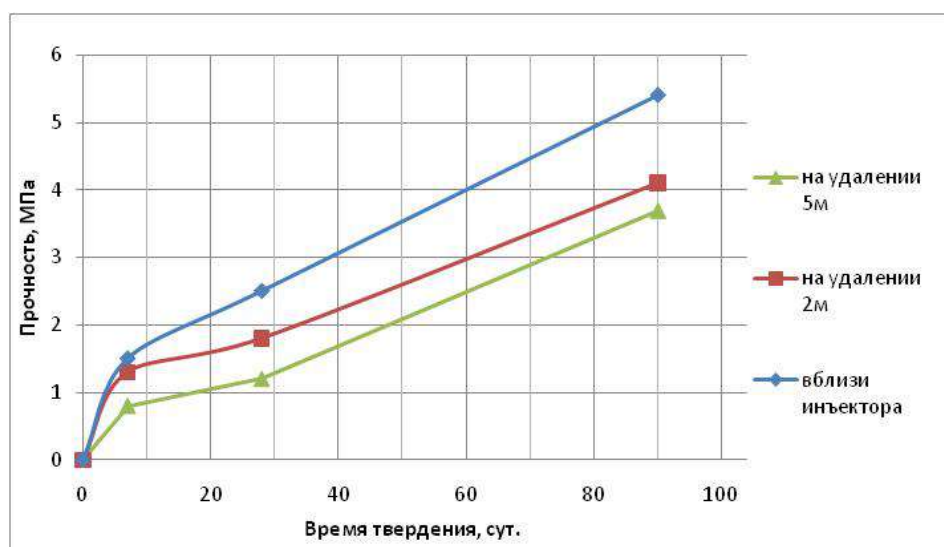


Рисунок 2.1 – Кинетика твердения проиньектированного массива при Камеры В: Ц=4:1

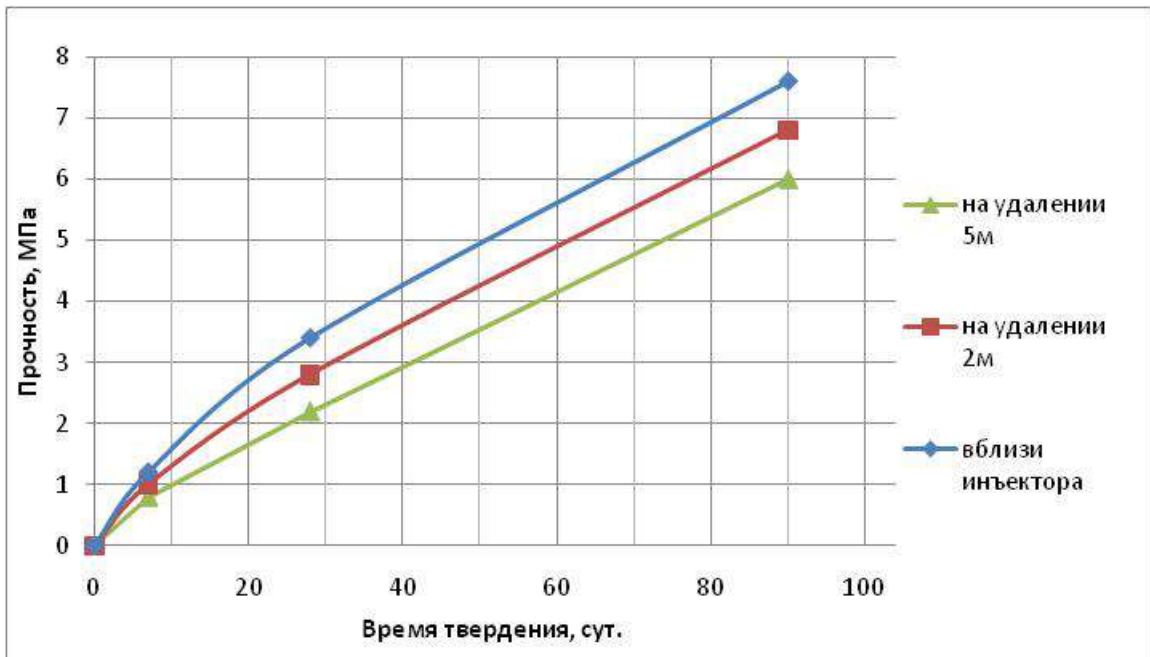


Рисунок 2.2 – Кинетика твердения проиньектированного массива при В: Ц=3:1

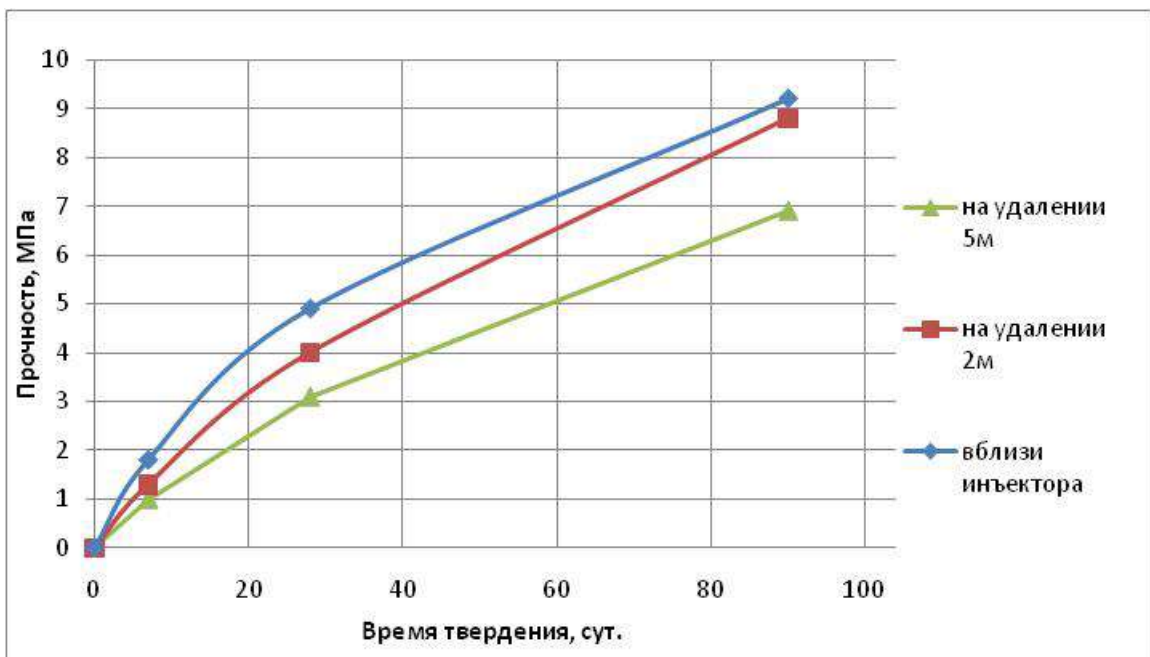


Рисунок 2.3 – Кинетика твердения проиньектированного массива при В: Ц=2:1

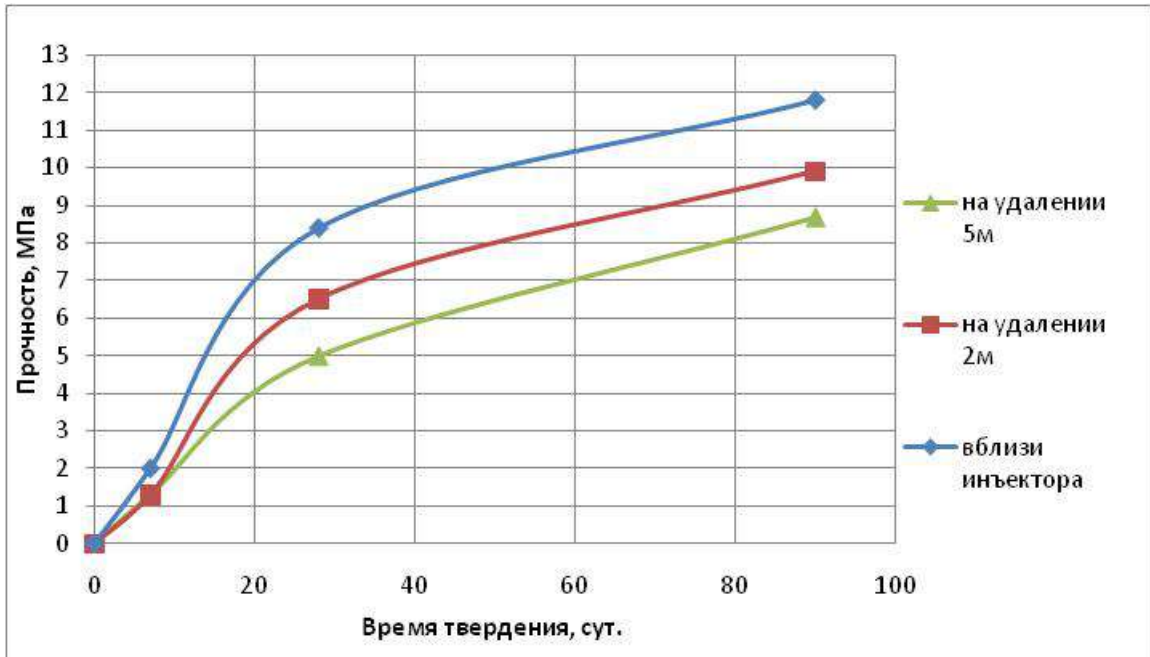


Рисунок 2.4 –Кинетика твердения проинъектированного массива при В: Ц=1:1

На рис. 2.1–2.4 приведена кинетика твердения образцов проинъектированного массива на основе цемента, воды и щебня при водоцементном отношении подаваемого раствора от 4:1 до 1:1. Из графиков видно, что процесс твердения образцов интенсивно развивался в течение всего периода времени.

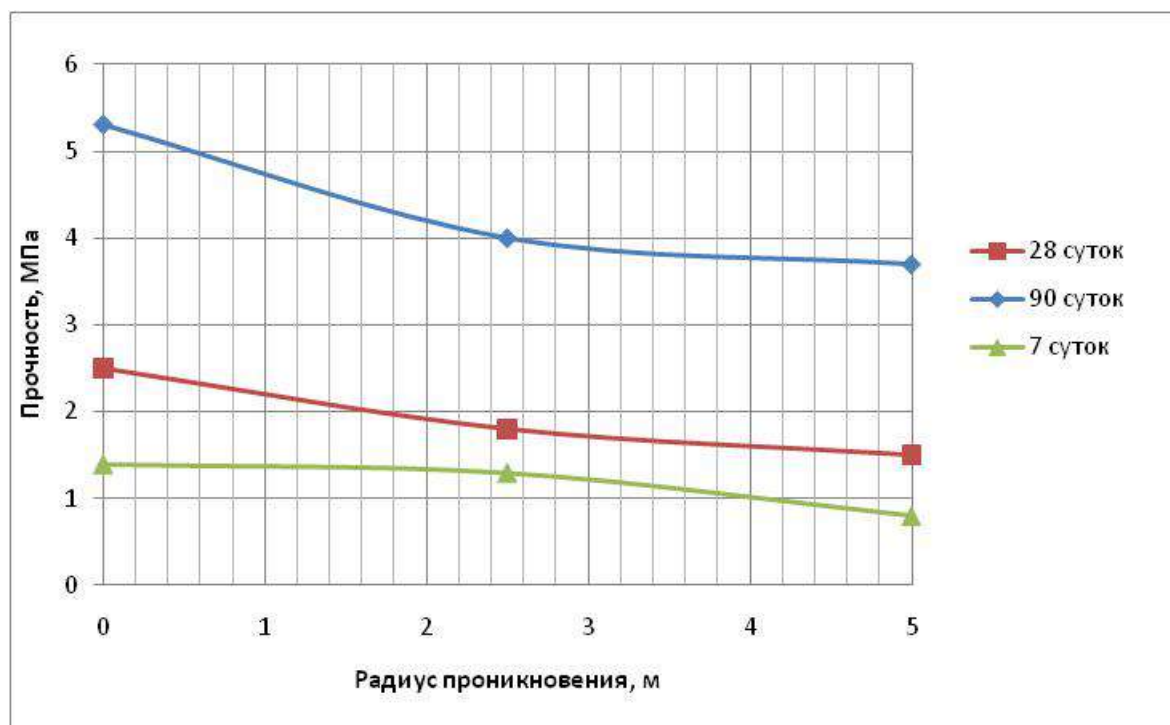


Рисунок 2.5 – Зависимость прочностных характеристик от радиуса проникновения инъекционного раствора при В: Ц=4:1

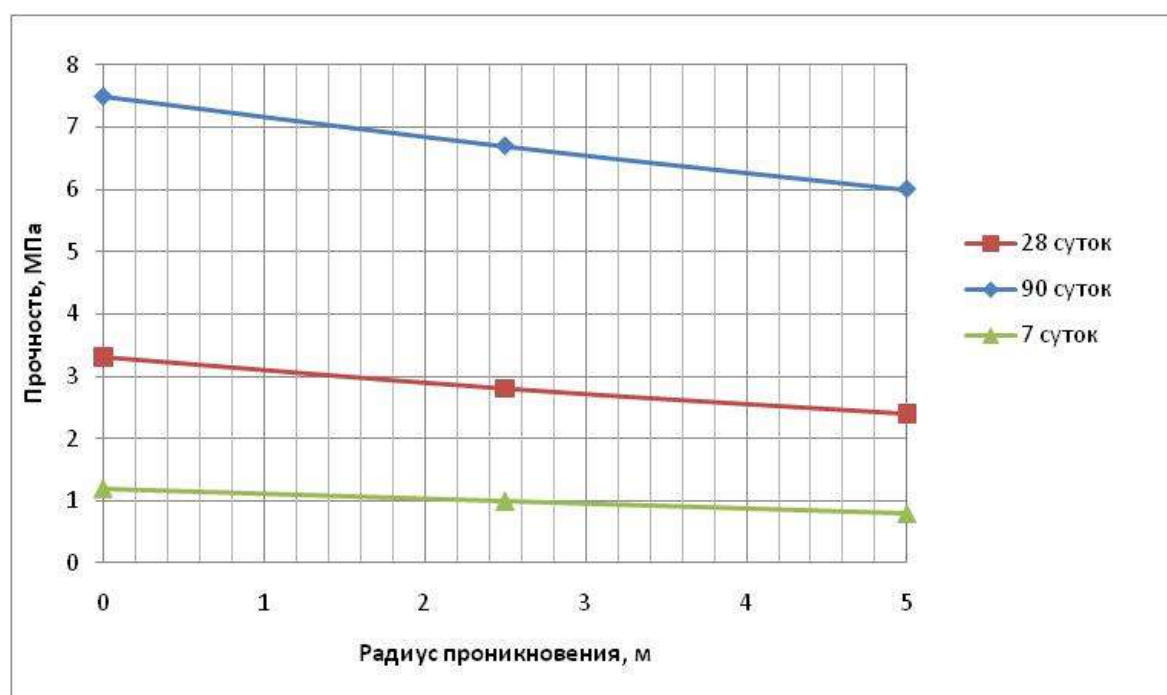


Рисунок 2.6 – Зависимость прочностных характеристик от радиуса проникновения инъекционного раствора при В: Ц=3:1

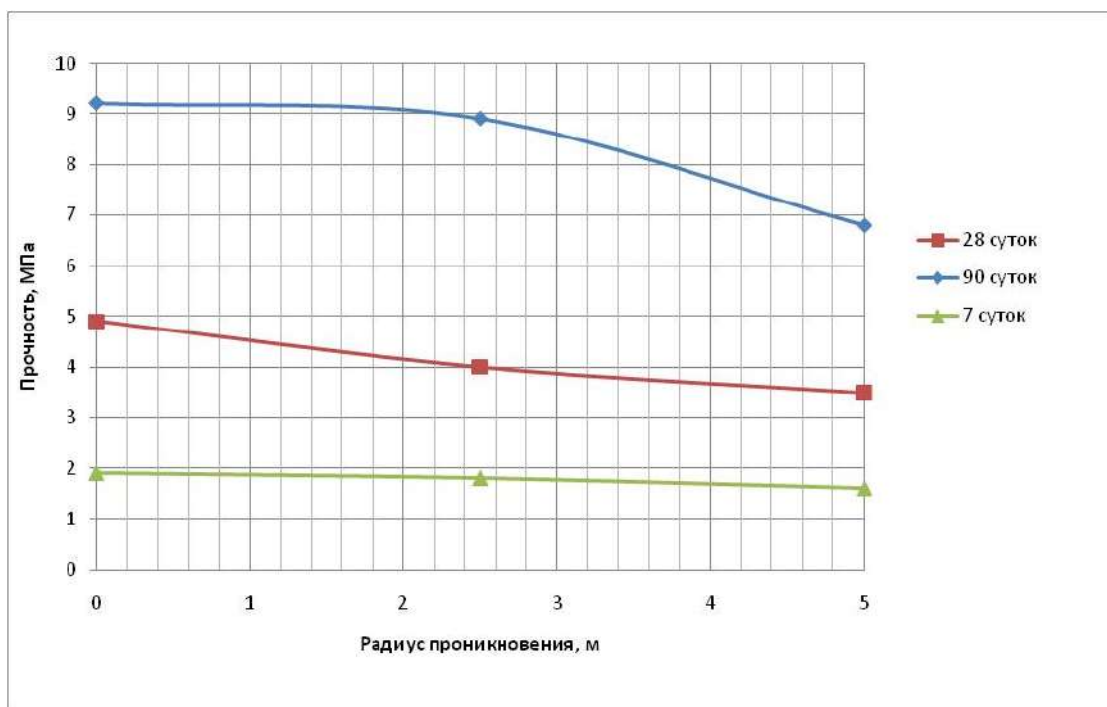


Рисунок 2.7 – Зависимость прочностных характеристик от радиуса проникновения инъекционного раствора при В: Ц=2:1

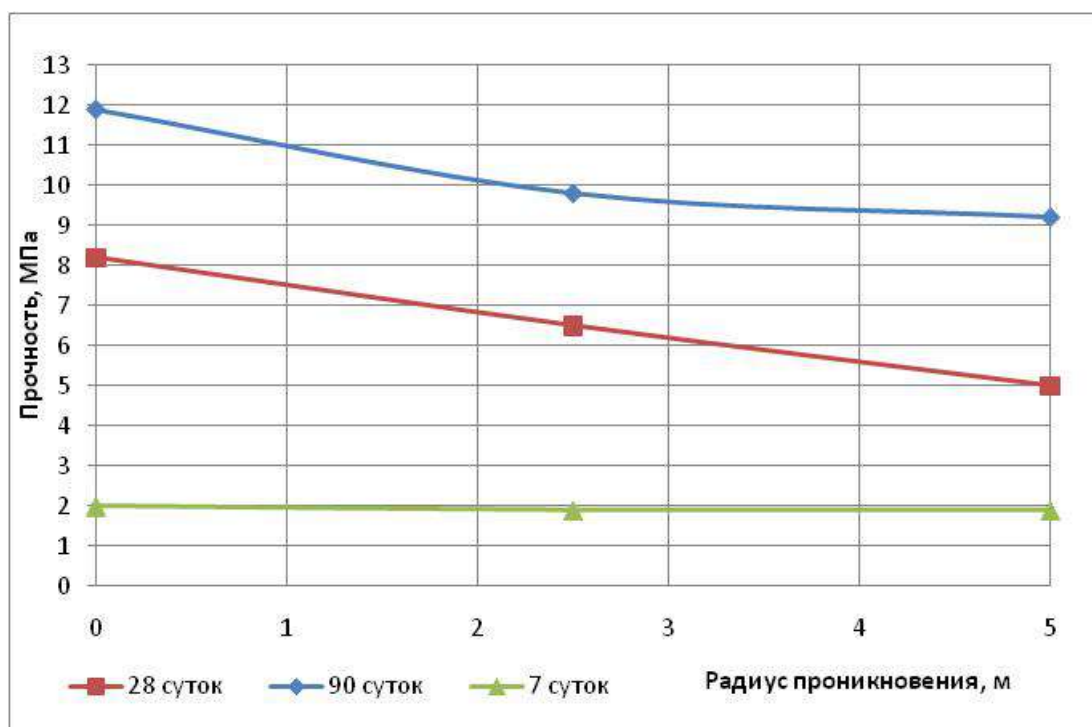


Рисунок 2.8 – Зависимость прочностных характеристик от радиуса проникновения инъекционного раствора при В: Ц=2:1

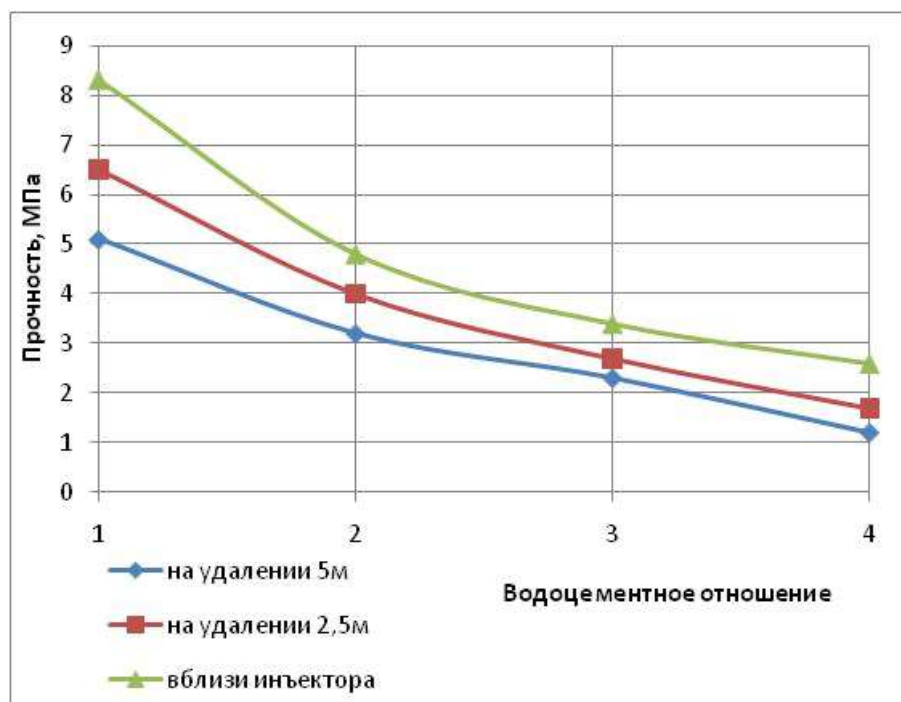


Рисунок 2.9 – Изменение прочности массива от водоцементного отношения и расстояния до иньектора

Эксперименты показали, что при испытании всех видов растворов наблюдалось снижение прочности массива по мере удаления от иньектора. Растворы с В: Ц=4:1, В: Ц=3:1, В: Ц=2:1, В: Ц=1:1 обеспечивают необходимую прочность иньектируемого слоя сухой закладки (2 МПа) при необходимом радиусе проникновения 5 м. Для достижения требуемой прочности на удалении от иньектора следует рассматривать увеличение сроков твердения.

Исследования показали, что во время производства работ по иньекции сыпучих сред необходимо нагнетание раствора начинать при больших водоцементных отношениях с доведением составляющих компонентов до более низких, для достижения высоких прочностных показателей проиньектируемого слоя.

Таким образом, иньекционный способ для рассмотренных пород технически осуществим и не вызывает сомнений.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

Физическим моделированием, выполненным с использованием пород от проходки, установлена возможность создания упрочненного слоя с заданными параметрами.

Эксперименты показали, что при испытании всех видов растворов наблюдалось снижение прочности массива по мере удаления от иньектора. обеспечивают необходимую прочность иньектируемого слоя сухой закладки (2 МПа) при необходимом радиусе проникновения 5 м. Для достижения требуемой прочности на удалении от иньектора следует рассматривать увеличение сроков твердения.

ГЛАВА 3. ИЗЫСКАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОТРАБОТКИ КРУТОПАДАЮЩЕЙ ЗАЛЕЖИ С КАМЕРНОЙ ВЫЕМКОЙ И ЗАКЛАДКОЙ

3.1. Оценка области применения систем с закладкой выработанного пространства твердеющими смесями

Анализ условий формирования Уральских медноколчеданных месторождений показал [65], что месторождения представляют собой одно рудное тело или систему тел, контролируемых локальной вулканической структурой (рис. 3.1). Залежи формируются над рудоподводящими каналами с четко выраженными (для месторождений I-IV групп) закономерностями распределения основных полезных компонентов: от лежачего бока к висячему отмечается переход от бедных медью и цинком пиритовых руд к богатым медным, медно-цинковым и цинковым рудам. По простиранию залежей – повышенное содержание меди приурочено к центральной части рудного тела, максимальное содержание цинка отмечается на флангах рудных тел. Распределение полезных компонентов вкrest простирания пологих залежей и по падению крутопадающих залежей некоординируется.

Одним из наиболее изученных, с точки зрения минералогических, петрографических и квалитетических свойств, среди медноколчеданных месторождений является Учалинское месторождение.

Геологическими изысканиями на Учалинском месторождении установлена взаимосвязь петрографического и минералогического составов руд. Руды сплошные равномернозернистые имеют преимущественно халькопирит-пиритовый состав, неравномернозернистые представлены халькопирит-сфалерит-пиритом, колломорфные – халькопирит-сфалеритовые, слоистые и прожилково-вкрапленные характеризуются пирит-халькопиритовым составом [65].

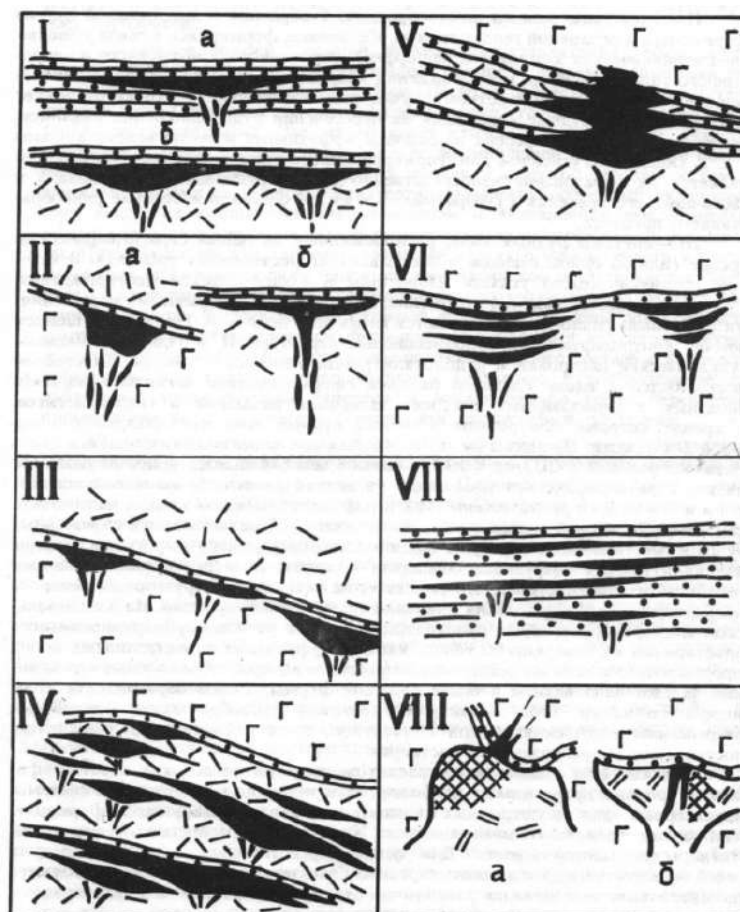


Рисунок 3.1 – Главные морфологические типы колчеданных месторождений Урала (по данным проф. И.Б. Серавкина): I – Учалинское, Дегтярское, Подольское; II – Октябрьское, Озерное, Молодежное; III – Юбилейное, Комсомольское, Левихинское; IV – Гайское, Узельгинское; V – Ново-Сибайское, Ново-Шемурское; VI – Осеннее, Восточно-Семеновское; VII, VIII – мелкие месторождения

В результате проведенного анализа горно-геологических условий Учалинского месторождения установлено, что от лежачего к висячему боку залежи (от восточного к западному борту карьера) текстурные разновидности руд сменяются в следующей последовательности: прожилково-вкрапленные; сплошные, среди которых выделяются слоистые, колломорфные, равномернозернистые и неравномернозернистые (рис. 3.2). Такая направленность в смене текстурных особенностей руд от лежачего к висячему боку залежи прослеживается по всем разрезам вкрест простирания залежи [65].



Рисунок 3.2 – Схема размещения текстурных и минеральных типов руд в контурах Учалинского месторождения: 1-5 – текстурные типы руд: 1-колломорфные, 2-мелкозернистые, 3-среднезернистые, 4-слоистые, 5-брекчиевидные; 6-прожилки халькопиритовые редкие (а) и частые (б); 7-вкрапленность халькопирита редкая (а) и частая (б); 8-гнезда сфалерита редкие (а) и частые (б); 9-рудокласты; 10-текстуры брекчиевые и брекчиевидные в сфалеритовом цементе; 11-прожилки кварц-баритовые с полисульфидной минерализацией; 12-хлорит-серицит-кварцевые метасоматиты; 13-туфы и лавы базальтов; 14-вулканомиктовые породы; 15-габбро-диориты; 16-контур рудного тела; 17-границы литологические; 18-текстуры зернистые и колломорфные

Вместе с тем, анализ результатов работы [75] показал, что руды различной текстуры обладают и значительной разницей в прочностных и деформационных свойствах. Коэффициент крепости по шкале проф. М.М. Протоdjяконова для руд различной текстуры изменяется в пределах $f = 7 \div 10$.

По данным [75], наиболее упругими являются руды сплошной текстуры неравномернозернистые и равномернозернистые (модуль упругости до $E = 41,63 \cdot 10^4$ МПа при коэффициенте Пуассона менее $\mu = 0,2$). Руда с колломорфной и слоистой структурой характеризуется модулем упругости $E = 10-15 \cdot 10^4$ МПа, при $\mu = 0,2-0,3$. Вкрапленная медно-цинковая руда обнаруживает невысокую упругость $E = 4,47 \cdot 10^4$ МПа при коэффициенте Пуассона $\mu = 0,3-0,4$ (рис. 3.3, 3.4).

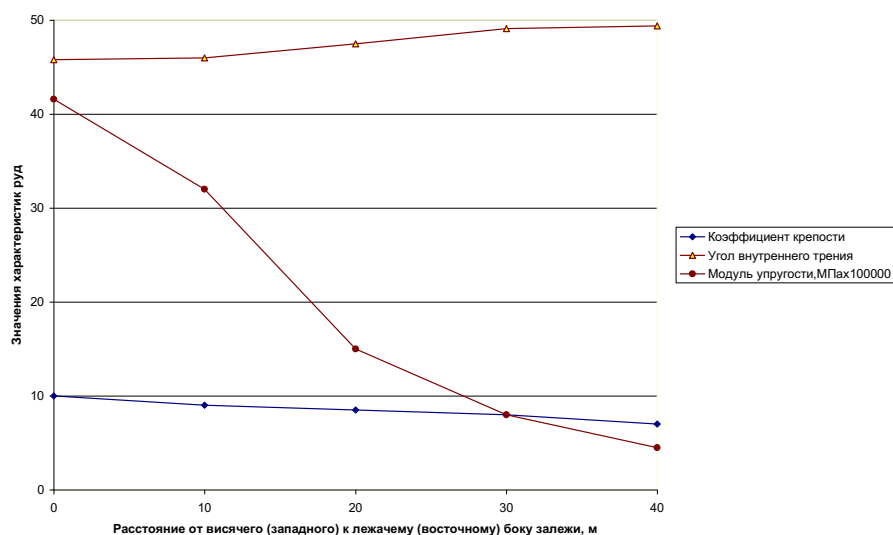


Рисунок 3.3 – Графики зависимости коэффициента крепости, угла внутреннего трения и модуля упругости руд от расстояния от висячего к лежащему боку залежи

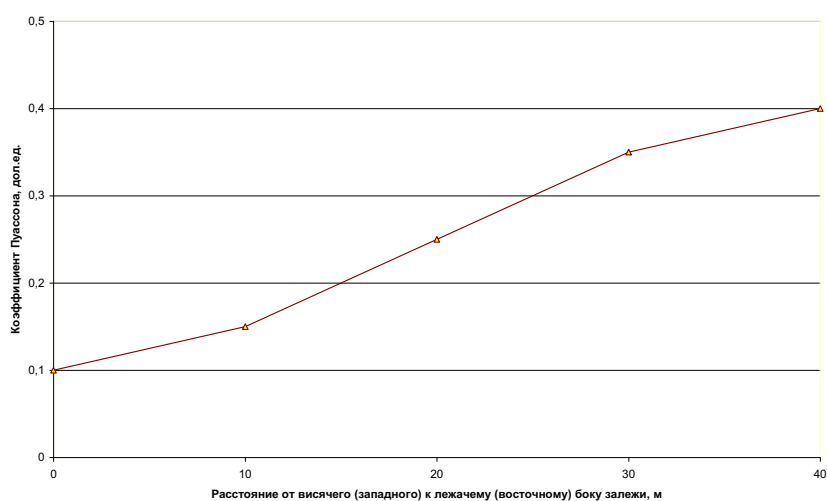


Рисунок 3.4 – График зависимости коэффициента Пуассона от расстояния от висячего к лежащему боку залежи

Таким образом, прочность руд Учалинского месторождения от висячего к лежащему боку снижается на 30%, способность к поперечным деформациям повышается в 3-4 раза, модуль упругости снижается на порядок, снижается содержание меди и цинка.

Выявленная взаимосвязь минералогического состава, текстуры, прочностных и деформационных свойств руд для условий Учалинского

месторождения при установленных общих закономерностях генезиса и распределения минералогического состава на медноколчеданных месторождениях, позволяет считать взаимосвязь состава, строения и свойств характерной в целом для медноколчеданных рудных тел групп I-IV по классификации И.Б.Серавкина.

Очевидно, наличие вкрапленных и блеклых руд присутствующих в подошвах залежей создает благоприятные условия для применения на данных участках высокопроизводительных и низкзатратных систем подземной разработки с естественным поддержанием очистного пространства и этажного (подэтажного) обрушения.

С целью определения влияния содержания полезного компонента на удельную прибыль для систем разработки с естественным поддержанием очистного пространства (камерная с открытым очистным пространством и камерно-столбовая система разработки), обрушением руды и вмещающих пород (варианты этажного и подэтажного обрушения) и с закладкой выработанного пространства (камерная с закладкой и горизонтальных слоев с закладкой) при постоянной мощности рудного тела и цене металла в 5000 у.е. нами были построены зависимости (рис. 2.5) и проведен соответствующий анализ.

Анализ построенных зависимостей показал, что при содержании полезного компонента от 1 до 2 % происходит конкуренция низкзатратных систем разработки с дорогостоящими вариантами по себестоимости добычи с закладкой выработанного пространства, за исключением системы разработки горизонтальных слоев с закладкой, где отмечается минимальная удельная прибыль при небольших содержаниях полезного компонента. Далее от 2 до 3% происходит характерное увеличение удельной прибыли, где на первом месте доминирует камерная система разработки с закладкой выработанного пространства и на второе и третье место выходят варианты систем разработки с обрушением руды и вмещающих пород. Разница между данными системами разработки по удельной прибыли минимальна 50-100 руб/т при содержании 2-

2,6%. При содержании полезного компонента 2,8-3% система разработки горизонтальных слоев с закладкой составляет конкуренцию системам разработки с естественным поддержанием очистного пространства, а разница между системами разработки камерной с закладкой и вариантами этажного и подэтажного обрушения максимальна и составляет 200-250 руб/т.

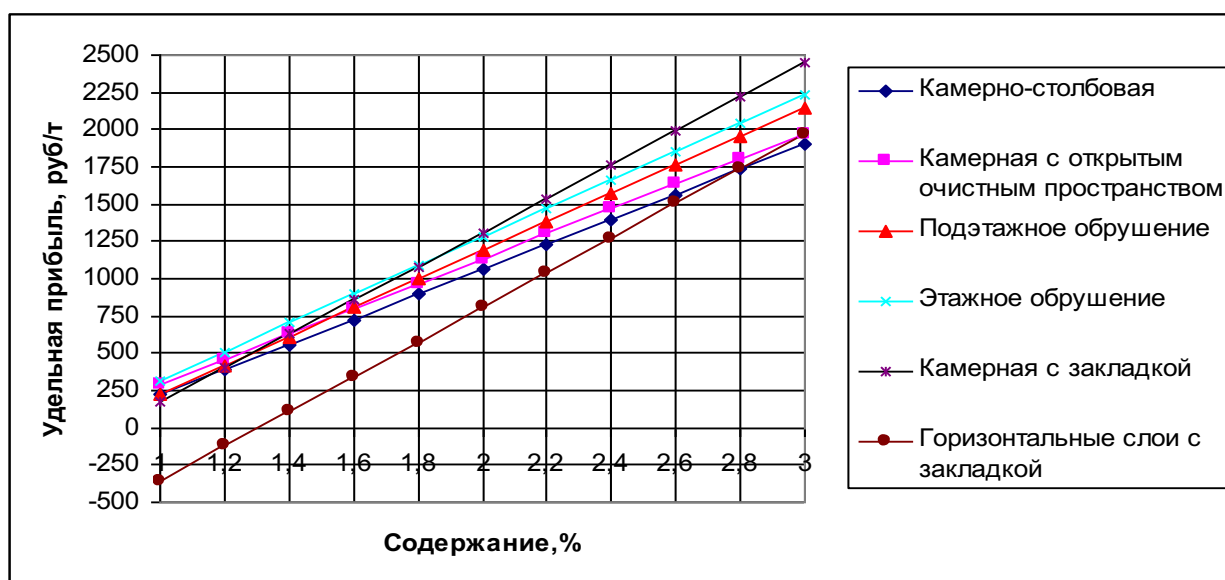


Рисунок 3.5 – График зависимости удельной прибыли от содержания полезного компонента при постоянной мощности, угла падения и цене металла 8000 у.е.

Большую роль при выборе рациональных вариантов систем разработки играет цена металла. С целью определения влияния цены металла на удельную прибыль нами были построены соответствующие зависимости (рис. 3.6) и проведен анализ.

Анализ построенных зависимостей показал, что горизонтальные слои с закладкой наименее прибыльны, при наименьшей цене наблюдается максимальный разрыв, при наибольшей цене составляют конкуренцию вариантам систем разработки с естественным поддержанием очистного пространства (камерная с открытым очистным пространством и камерно-столбовая). В целом, для систем разработки с закладкой характерен более интенсивный рост прибыли по мере возрастания цены металла. До цены металла

в 5500 у.е. на первое место выходит система разработки этажного обрушения, с последующим возрастанием цены доминирующую роль играет камерная система разработки с закладкой выработанного пространства. Исключение составляет система горизонтальных слоев с закладкой, при минимальной цене в 3000 у.е. разница между всеми системами незначительна (50-100 руб/т), при максимальной цене в 8000 у.е. разница максимальна и составляет 200-250 руб/т.

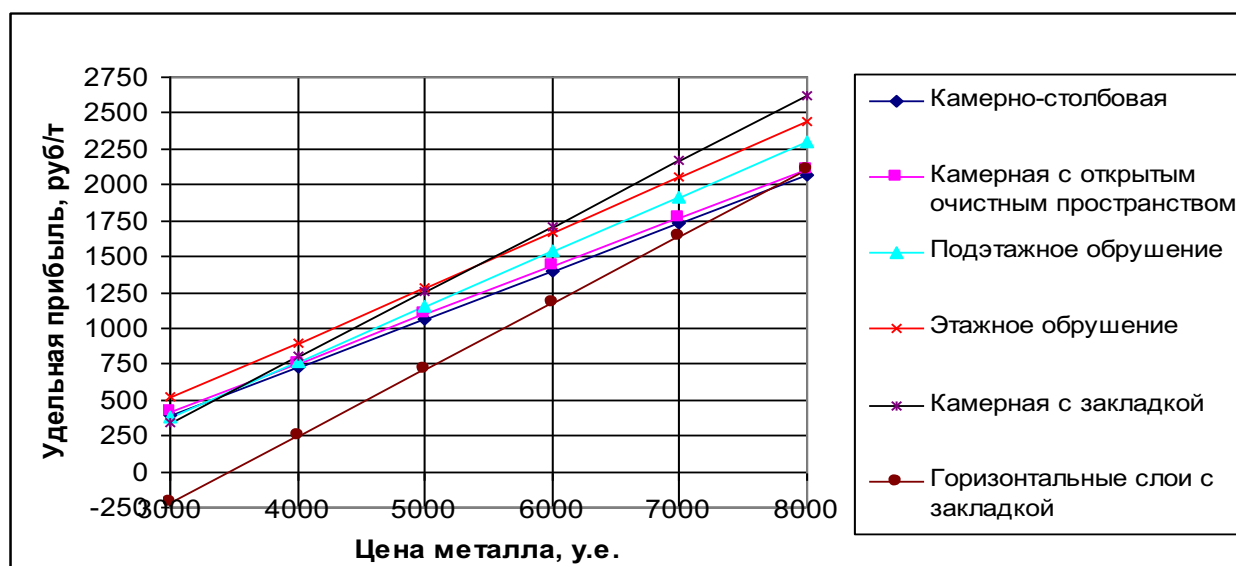


Рисунок 3.6 – График зависимости удельной прибыли от цены металла при постоянной мощности, угла падения и содержания полезного компонента

В связи с установленными закономерностями распределения полезного компонента и прочности руд и пород по площади залежи предлагается участки с неустойчивой кровлей и относительно низким содержанием полезного компонента обрабатывать системами разработки с обрушением руды и вмещающих пород. Однако возникают вопросы по поддержанию качества добываемых руд на уровне технологии добычи с твердеющей закладкой, совмещению на одном горизонте различных схем подготовки, геомеханического взаимовлияния зон рудного, искусственного массива и обрушенных пород. Все это предопределяет необходимость комплекса исследований.

3.2. Оценка существующей технологии отработки и ведения закладочных работ на примере Сафьяновского месторождения

Вмещающие породы на месторождении относятся к классу скальных, объединяющихся в подгруппу эффузивных образований. Руды месторождения в большинстве своем также относятся к скальным породам.

Инженерно-геологическая неоднородность вмещающих пород и руд обусловлена проявлением трещиноватости и особенно наложенными процессами метасоматических изменений и выветривания. В целом, трещиноватость наиболее развита в центральной части месторождения в рудном теле и околорудном пространстве, где наблюдается хлоритизация, гидрослюдизация и каолинизация вмещающих пород и проработка колчеданных руд до полностью дезинтегрированных разностей, получивших название сыпучих руд. Трещины имеют преимущественно субмеридиальное простирание и западное падение под углами 65-70°.

С участками повышенной трещиноватости в околорудном пространстве связаны зоны метасоматических изменений и гипергенного преобразования рудных тел и вмещающих пород.

Кора выветривания на месторождении представлена двумя типами – площадной и линейной. В пределах центральной части месторождения развита линейная кора выветривания, которая имеет зональное строение и форму крутопадающего тела с мощностью по падению до 100-135м. Этот тип коры выветривания тяготеет к зонам сульфидной минерализации с метасоматически измененными породами. Характерным проявлением вторичных изменений в рудной зоне является наличие сыпучих руд, которые представляют собой в керне песок со щебнем и характеризуются слабым сцеплением.

Исходя из горно-геологической характеристики (скальные трещиноватые породы при наличии ослабленных последующими процессами зон и мощной линейной коре выветривания в околорудном пространстве), Сафьяновское

месторождение относится к типу 3 «В» - сложное скальное глубоко залегания – для подземных работ [79].

Наиболее крупным по размерам и запасам руды и меди (около 95 %) В является рудное тело № 1 и характеризуется довольно сложной линзообразной формой (рис. 3.7). По простиранию в субмеридиональном направлении рудное тело прослежено на расстоянии около 500 м. Падение тела – крутое, западное, под углом 70–80°, глубиной выполаживающееся до 20–30°. Максимальная длина тела по падению составляет 350–400 м. В Мощность его изменяется от 50–130 м, составляя, в среднем 80 м.

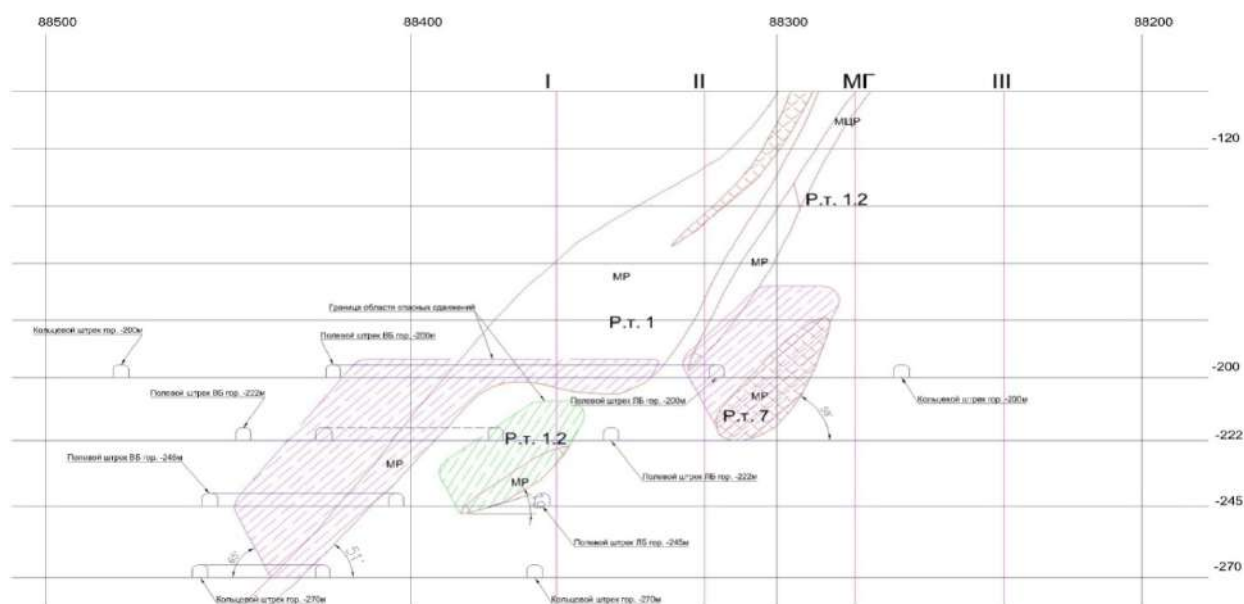


Рисунок 3.7 – Разрез по разведочной линии 1

Прожилково-вкрапленные руды занимают наиболее глубокую часть данного рудного тела и представлены, в основном, медными разновидностями.

Серный колчедан, в виде отдельных маломощных участков и линзочек, приурочен только к северной и верхней части рудного тела.

Руды месторождения приурочены к гидротермально-метасоматически измененным риолитам, дацитам, с линзами и пластами вулканических брекчий, туфов, вулканогенноосадочных пород. Метасоматические изменения

закключаются в развитие кварца, хлоритов, гидрослюд, корбаната. Мощность ореола метасоматитов достигает 200 м. Ореол метасоматических изменений имеет зональность. Наиболее интенсивные изменения пород характерны для внутренней гидрослюдисто-хлоритовой зоны. Породы, подвергнутые кварц-хлорит- гидрослюдистым изменениям мало отличаются от первоначального состояния. Породы, подвергнутые гидрослюдизации, в условиях естественного залегания зачастую устойчивы. Однако, после вскрытия довольно быстро теряют свои прочностные свойства. Так, у дацитовых порфиров, извлеченных с глубины 300 м, предел прочности при одноосном сжатии составил 46 МПа, что может быть объяснимо тем, что проба была отобрана из зоны метасоматических околорудных изменений пород [79].

Прочность риолитовых порфиров, а также вулканических брекчий риолитовых и дацитовых порфиров ниже прочности других разновидностей вулканогенных пород, что связано с наложением на первые метасоматических околорудных изменений.

Основные физико-механические характеристики пород и руд представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1 – Основные физико-механические характеристики пород и руд месторождения

Наименование руды	Объёмный получена вес, γ , т/м ³	Прочность на сжатие $\sigma_{к сж}$; МПа	Сцепление в образце С0 МПа	Угол внут. трения, ρ град.
Руда прожилково- вкрапленная	2,9	45	12	36
Метасоматиты кварц- карбонатного состава	2,7	30 50	5-10	35
Риолитовые порфиры	2,7	~100	20-25	35
Вулканические брекчии риолитовых и дацитовых порфиров	2,7	47-77	17-20	35
Руда медноцинковая	4,6	227	44	36
Руда медная массивная	4,6	170	44	36

Учитывая специфические условия отработки запасов, в первую очередь пожароопасность руд месторождения, а также условия залегания и наличие нескольких сортов руды [79], в качестве основной системы разработки для отработки Сафьяновского месторождения принят вариант камерной системы разработки с закладкой выработанного пространства и торцевыми заездами в нисходящем порядке [89, 90]. Вариант камерно-целикового порядка отработки по схеме 1-2-3-1. показан на рис. 3.8.

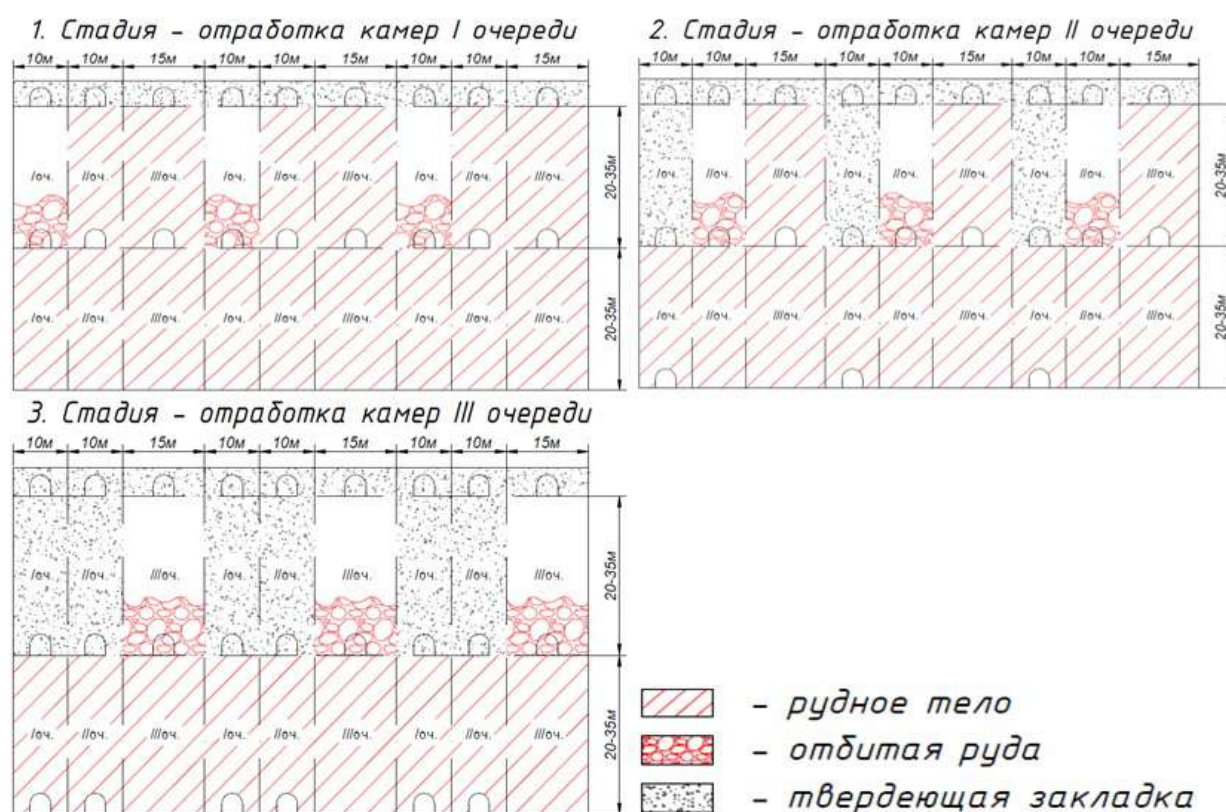


Рисунок 3.8 – Вариант камерной системы разработки с торцевыми заездами

Отработка камер в соседних (смежных) секциях может осуществляться независимо друг от друга. Отработка запасов подэтажей системой с камерной выемкой и закладкой осуществляется в нисходящем порядке.

Первоначально в секциях обрабатываются камеры первой очереди шириной 10 метров. При этом камеры первой очереди в смежных секциях разделяются друг от друга рудным целиком (камеры второй и третьей очереди) шириной 25

метров. После отработки и закладки камер первой очереди производится отработка камер второй очереди в смежных секциях. Камеры 2-й очереди разделены друг от друга комбинированным целиком шириной 25 метров, состоящий из закладочного массива камер первой очереди и рудного массива камер третьей очереди.

На третьей стадии производится отработка камер третьей очереди. Данные камеры в смежных секциях разделяются закладочным массивом шириной 20 метров.

Специалистами ОАО «Уралмеханобр» [106] в рамках технического перевооружения предложен вариант камерной системы разработки в восходящем порядке с закладкой выработанного пространства при выемке запасов в «шахматном» порядке 1-2-1-2.

Принципиальная схема отработки камер представлена на рис. 3.8. Первоначально отрабатываются камеры так называемой «переходной зоны» (камеры первой очереди, высотой 23 м). Затем после отработки, закладки и набора прочности закладочного массива камер первой очереди приступают к отработке камер второй очереди – основные камеры высотой 46 м, нижняя часть данной камеры высотой 23 м ограничена с двух сторон закладочным массивом отработанных камер первой очереди; верхняя часть камеры (23 м) располагается в рудном массиве.

Отработка запасов подэтажей системой с камерной выемкой и закладкой осуществляется в восходящем порядке.

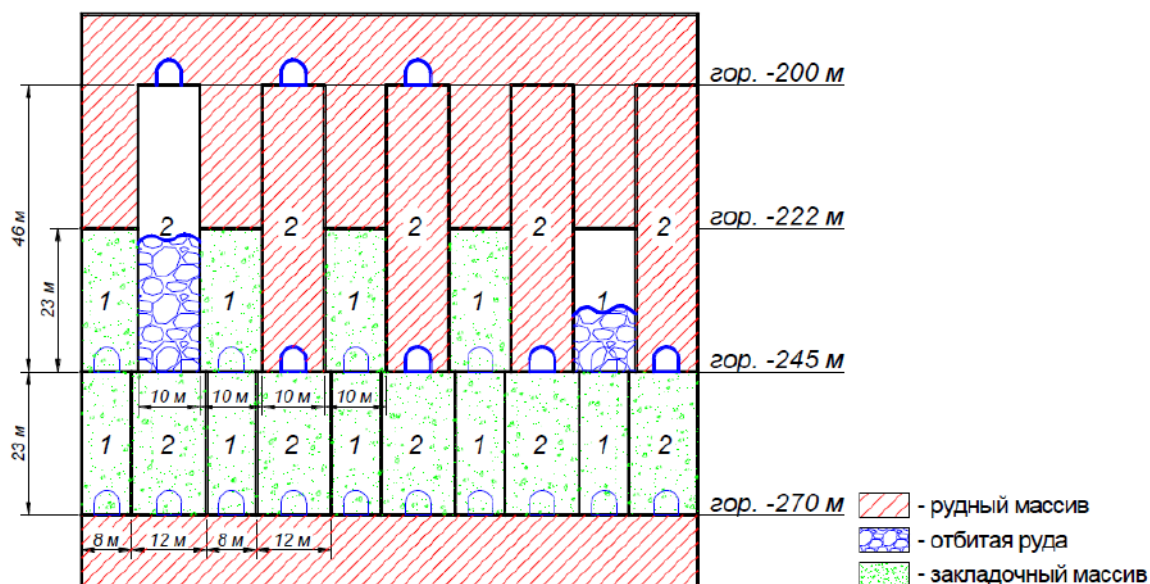


Рисунок 3.8 – Вариант камерной системы разработки в восходящем порядке с закладкой выработанного пространства при выемке запасов в «шахматном» порядке

Данная схема отработки запасов позволит обрабатывать камеры увеличенных параметров (по высоте). При этом обеспечивается безопасность горных работ и осуществляется полная закладка выработанного пространства (дозакладка пустот, появляющихся после усадки, производится при подаче закладочной смеси в смежные камеры). Это позволит исключить расслоение и деформации рудного массива при восходящей выемки запасов, а также сократить затраты на закладочные работы.

Несомненным достоинством камерных систем разработки с твердеющей закладкой является полнота извлечения руд при обеспечении сохранности земной поверхности. Основным недостатком вышеуказанной системы разработки является высокий уровень ресурсоемкости добычи, поэтому применение ее, особенно на участках с низким содержанием полезного компонента, приводит к снижению экономической эффективности освоения недр. В связи с этим возникает вопрос возможности снижения себестоимости закладочных работ без ухудшения показателей эффективности освоения недр.

Повышение экономической эффективности очистных работ возможно за

счет снижения или полного исключения из производства высокзатратных твердеющих смесей при освоении Сафьяновского медноколчеданного месторождения путем инъекционного упрочнения закладочного массива.

3.3. Конструирование варианта камерной системы разработки с инъекционным упрочнением сыпучего закладочного массива

Высокие затраты на закладочные работы являются существенным недостатком применения камерных систем разработки. Конструкция нового варианта системы разработки, заключающегося в инъекционном упрочнении стенок закладочного массива, позволит существенно снизить себестоимость закладочных работ.

Реализуемая технология (рис. 3.9) включает проведение доставочного и вентиляционного штреков, вентиляционно-ходового восстающего, соединяющего доставочный и вентиляционный этажи, а также буродоставочных ортов, разделяющих рудное тело на камеры. Очистным камерам придают форму параллелепипеда с углом наклона контакта с рудным массивом смежной камеры 75-85 градусов и располагают вкрест простирания рудного тела. Камеры отрабатываются в сплошном порядке без оставления в выработанном пространстве несущих целиков. Развитие фронта горных работ в пределах этажа осуществляется от центра к флангам, либо от одного фланга к другому, при восходящем разработке залежи. Оработка первой камеры начинается с проходки отрезного восстающего и формирования отрезной щели. Отбойка основных запасов камеры осуществляется на компенсационное пространство отрезной щели. Висячий бок камеры формируется под углом 75-85 градусов, причем при отработке от центра к флангам, центральная камера имеет форму трапеции и соответственно два висячих бока. Угол наклона стенок камер в сторону выработанного пространства повышает устойчивость закладочного массива. После очистной выемки выработанное пространство камеры

заполняется пустой породой. Далее производится упрочнение слоя породной закладки на границе с рудным массивом, путем инъектирования. Подача цементного раствора производится по скважинам, пробуренным из выработок вентиляционного этажа. Количество скважин рассчитывается исходя из радиуса проникновения раствора в породу, высоты и длины камеры. Отбойка запасов последующих камер ведется в зажимающей среде, обеспечивая тем самым уплотнение не потерявшего подвижность закладочного массива сопряженной камеры

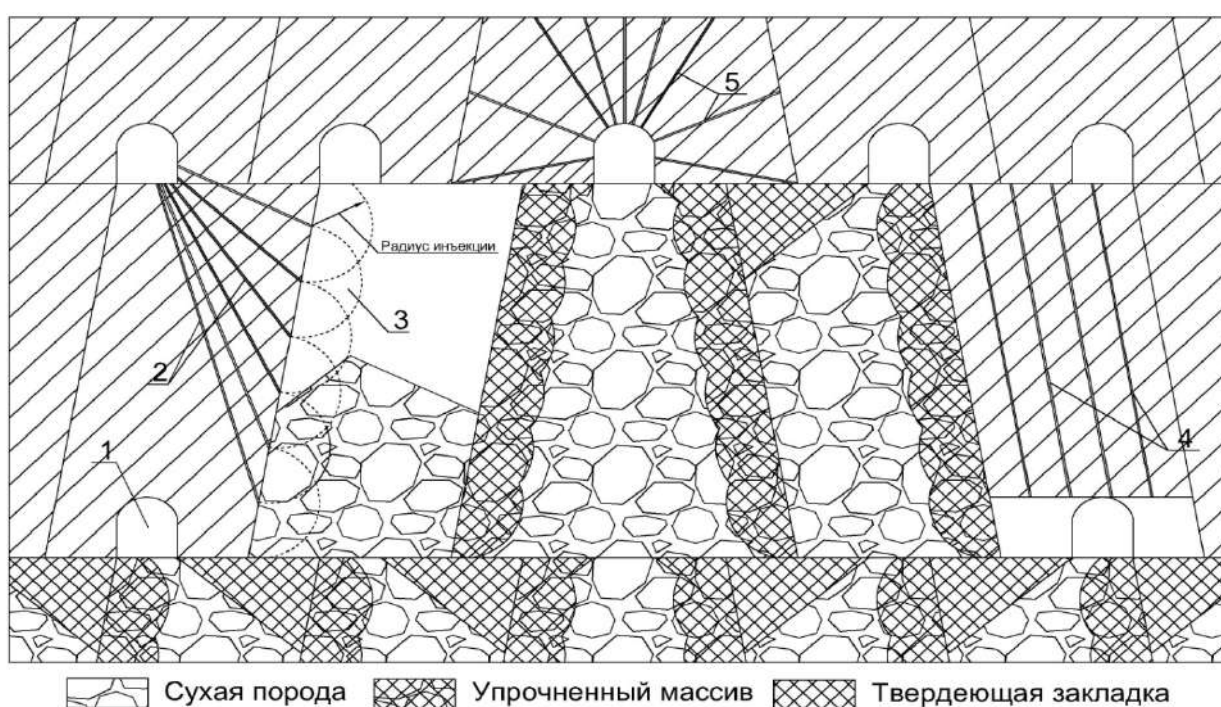


Рисунок 3.9 – Вариант камерной системы разработки с инъекционным упрочнением закладочного массива: 1 –буро-доставочный орт; 2 – закладочные скважины; 3 –зона влияния инъекции; 4 – отбойные скважины; 5 –веер скважин

Практика работы предприятий показывает, что отбойка руды взрывным способом непосредственно у закладочного массива вызывает его усадку и уплотнение [7, 61]. Накопленный опыт по применению отбойки руды в зажиме показывает, что отбитая и замагазинированная руда уплотняется взрывом скважин на 25-35 %, причем уплотнение распространяется на глубину до 20 м в разрыхленный массив при взрыве сравнительно небольших зарядов (около 1-1,5 т).

В качестве сухой закладки используется пустая порода с проходки горно-капитальных и подготовительных выработок (дробленный диабазовый щебень фракции 5÷300 мм).

Доставка породной закладки к закладываемым камерам производится подземными автосамосвалами, если расстояние доставки превышает 200-250 метров, или в ковшовых ПДМ при расстоянии доставки до 200-250 метров.

При доставке породы в ковшах ПДМ он разгружается из сбойки с камерой непосредственно в камеру. Необходимо строгое соблюдение мер ПДМ безопасности, в том числе:

- в вентиляционно-закладочной выработке вблизи камеры устанавливается отбойный брус или насыпное ограждение, ограничивающее движение транспортного средства;

- высота отбойного бруса должна быть не менее половины высоты колеса ПДМ;

- на стенке вентиляционно-закладочной выработки краской наносятся метки, показывающие положение кабины ПДМ в момент разгрузки.

Разгрузка автосамосвалов, транспортирующих породную закладку, осуществляется на почву вентиляционно-закладочной выработки вблизи закладываемой камеры. Подача доставленного закладочного материала непосредственно в камеру производится с помощью ковшовых ПДМ, выполняющих роль бульдозера с соблюдением мер безопасности. Для разгрузки автосамосвала на почву выработки предусматривается разгрузочный пункт (участок выработки с увеличенной высотой кровли).

Порода, подаваемая в камеру с помощью ковшовых ПДМ, распространяется по камере самотёком под действием силы тяжести. При этом в выработанном пространстве в районе места подачи закладка отсыпается в виде конуса с углом естественного откоса 30-40°, в связи с этим в выработанном пространстве могут возникать значительные объёмы недозаложенных пустот. Это требует применения дополнительных мероприятий по обеспечению необходимой

степени заполнения выработанного пространства. Одним из мероприятий может считаться максимально возможное увеличение ширины вентиляционно-закладочной выработки (по опыту применения восходящей выемки руды на зарубежных рудниках для увеличения степени заполнения выработанного пространства породной закладкой ширина закладочной выработки увеличивается до 6 – 8 метров).

Когда вершина конуса достигнет уровня почвы вентиляционно-закладочной выработки, подача породы в камеру под действием собственного веса станет затруднительной. Дальнейшее заполнение выработанного пространства камер осуществляется с помощью ПДМ с дистанционным управлением. При этом дистанционно управляемая машина заходит в камеру по навалу отсыпанной породы и перемещает отсыпанный навал по исклочить камере, выполняя функции бульдозера. Использование этого способа требует дополнительных мер безопасности. При движении машины по свежееотсыпанному навалу породы не исключается его оползание, и машина вместе с оползнем может сползти к основанию навала. Для предотвращения этого рекомендуются следующие меры:

- производить закладку камер порциями с перерывом для некоторой слёживаемости пород в навале и снижения подвижности пород. В этом случае движение ПДМ по слежавшейся породе, а не по свежееотсыпанному навалу будет значительно безопаснее;

- закреплять на ПДМ страховочный трос, чтобы вытянуть её в случае сползания по откосу.

По истечении времени за счёт естественной слёживаемости пород, а также при воздействии на них веса передвигающейся по породной закладке ПДМ будет происходить уплотнение закладочного массива. Соответственно будет образовываться усадка закладочного материала и уровень закладки будет понижаться. Для регистрации состояния породной закладки должен быть организован систематический контроль верхнего уровня закладочного массива силами сменного надзора (ИТР рудника). Для ликвидации появляющихся

недозакладов за счёт усадки закладочного массива периодически, а также перед началом отработки вышележащего выемочного подэтажа производится подсыпка породы и восстановление уровня закладочного массива до кровли отработанных камер.

Схема закладки представлена на рис. 3.10.

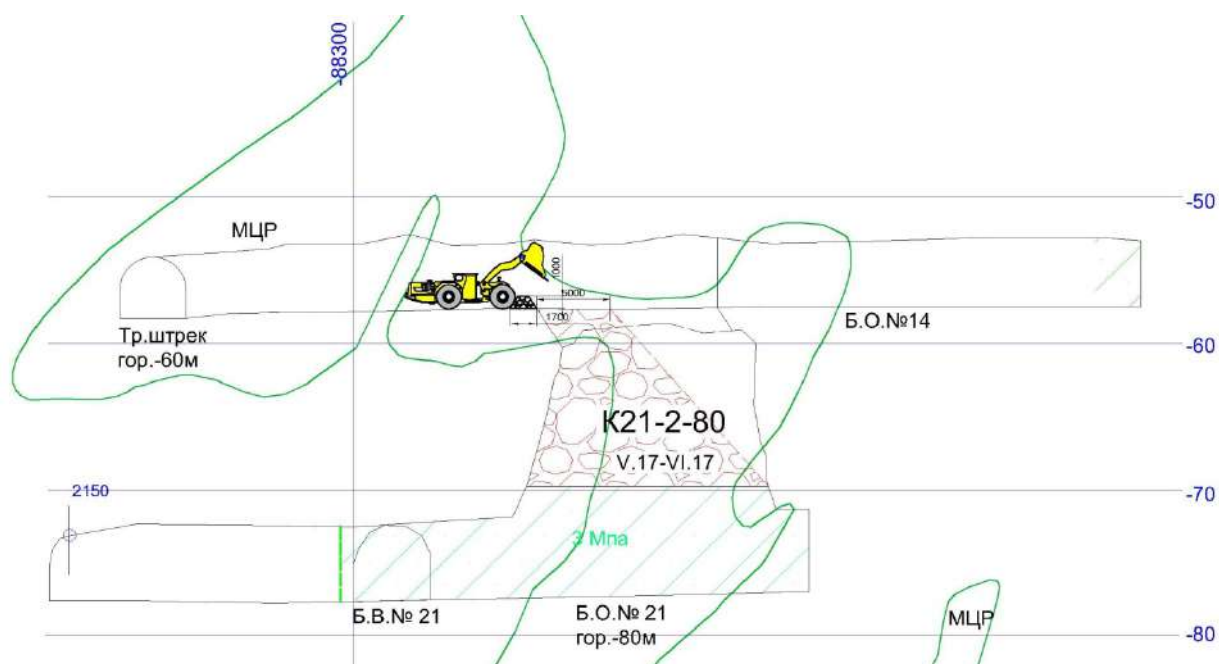


Рисунок 3.10 – Схема формирования сухой закладки

При закладке камер твердеющей закладкой закладываемое пространство должно быть изолировано путем установки изолирующих перемычек на всех выработках, сбитых с очистным пространством. Места установки перемычек указываются в проекте на закладку камеры.

Основным видом перемычек, рекомендуемых к применению является бетонная (железобетонная). В отдельных случаях возможно применение деревянной и породной перемычек. Конструкция перемычек для каждого конкретного случая выбирается производителем работ; конструктивные параметры подтверждаются расчётом или ссылкой на типовые конструкции перемычек.

Место установки перемычки, как правило, принимается на расстоянии не

менее 3 м от выработанного пространства камеры.

При невозможности установки перемычки на расстоянии 3 м от выработанного пространства камеры, перемычка может быть установлена ближе 3 м по локальному проекту, утверждённому главным инженером рудника, с выполнением дополнительных мер по безопасности.

Подход к изолирующей перемычке должен быть под закрепленной частью выработки. Строительство перемычек ведётся согласно проекту или специально разработанному паспорту.

3.4. Расчет параметров упрочненного закладочного массива

Применение варианта камерной системы разработки с инъекционным упрочнением закладочного массива предполагает, что давление вышележащего массива на упрочненный слой отсутствует в связи неизбежным недозакладом закладочного материала под кровлю, а воздействие горного давления пород висячего бока не учитывается. При определении параметров упрочненного слоя в качестве внешней силы, действующей на него, рассматривается только активное давление сыпучей породной закладки (рис. 3.11).

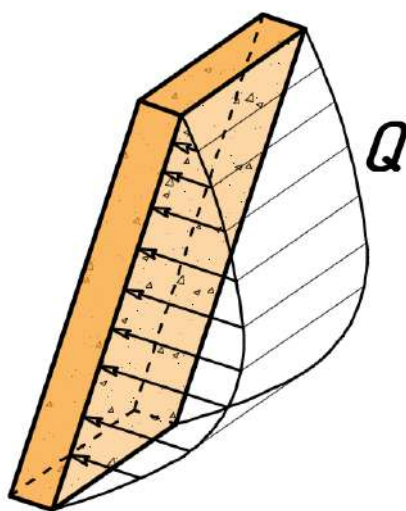


Рисунок 3.11 – Силы действующие на упрочненный слой закладочного массива

Боковое давление, создаваемое породной закладкой, зависит от величины призмы сползания, которая в свою очередь зависит от высоты, ширины и угла наклона камеры. Для примера были рассчитаны значения бокового давления на различных высотах камеры по формуле (3.1):

$$G_{6\max} = \gamma S \cdot \sin\alpha / P \cdot f_1, \text{ т/м}^2 \quad (3.1)$$

где γ – удельный вес закладки в разрыхленном состоянии, т/м³; S – площадь поперечного сечения камеры, м²; P – периметр сечения, м; f_1 – коэффициент трения сыпучей закладки о стенки камеры.

Эпюра распределения бокового давления представлена на рис. 3.12.

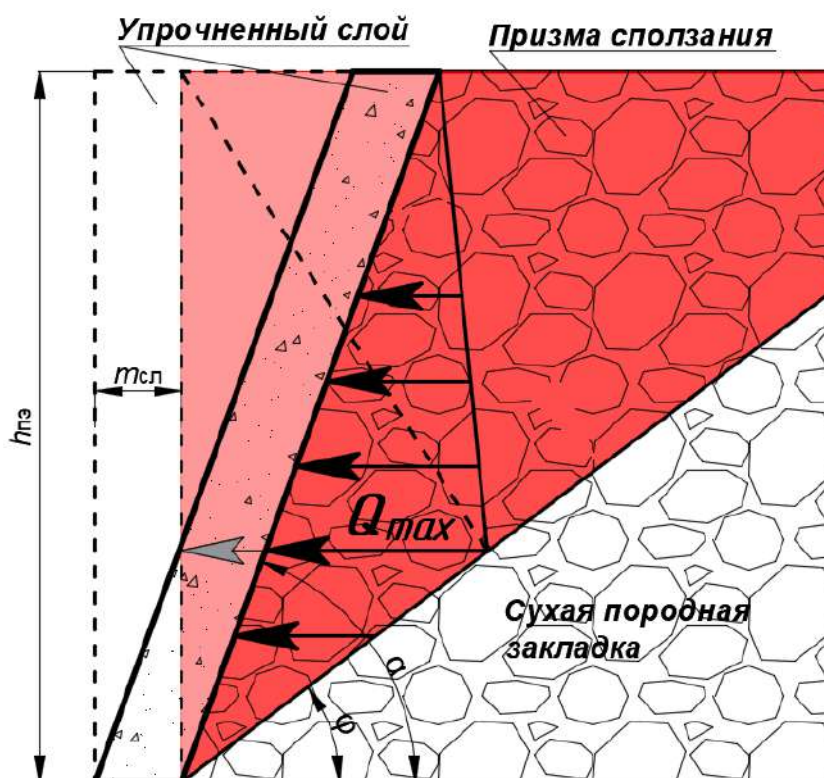


Рисунок 3.12 – Эпюра давления сыпучей закладки на упрочненный слой (1 – упрочненный массив, 2 – порода)

Проведенными исследованиями установлено влияние угла наклона камеры на величину бокового давления (рис. 3.13), а также высоты камеры и глубины ведения горных работ на ширину упрочненного слоя закладочного массива (рис. 3.14).



Рисунок 3.12 – Зависимость бокового давления сыпучей закладки от угла наклона камеры

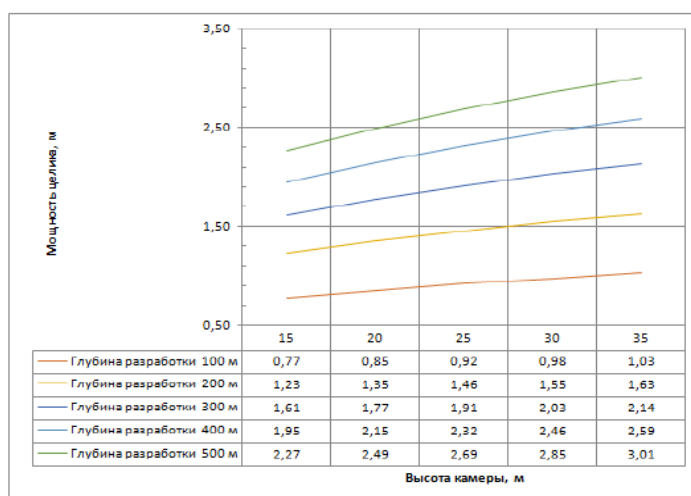
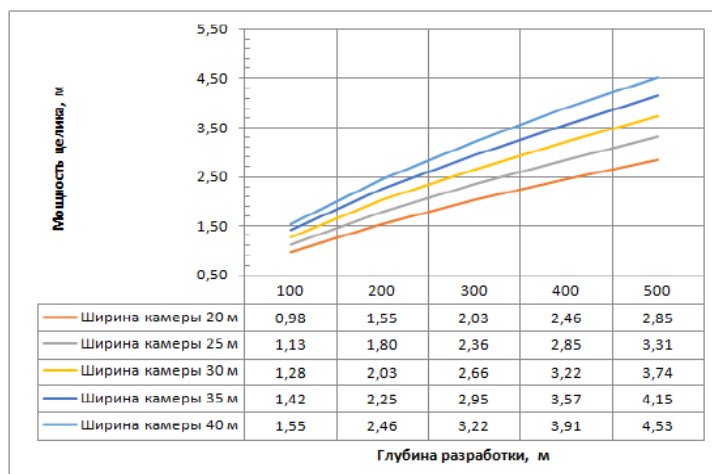


Рисунок 3.14 – Зависимости толщины упроченного слоя от глубины разработки и высоты камеры

Определено влияние угла наклона камеры, на величину бокового давления создаваемого породой. Рассматривался диапазон от 60° до 90° , что обусловлено областью применения камерных систем разработок. Проведенные расчеты показали, что уменьшение угла наклона камеры ведет к снижению бокового давления оказываемой породной закладкой. Это объясняется тем, что уменьшение угла наклона, при неизменных других параметрах камеры, приводит к изменению геометрических размеров призмы сползания, за счет перемещения части веса породной закладки на вмещающие породы. Боковое давление при принятом оптимальном угле 80° (по С предельному пролету обнажения рудного массива) не превышает 1,5 МПа. Таким образом, прочность инъектируемого слоя (упрочненного слоя) необходимо и достаточно создать 1,5 МПа.

Аналитическими расчетами, на основе зависимости, приведенной в работе [18], получена необходимая ширина упрочненного слоя (при заданной прочности 1,5 МПа) при различной глубине (рис. 3.14а) и ширине камеры (рис. 3.14б). Средняя ширина слоя для условий Сафьяновского месторождения составила 3-5 м. Физическим моделированием, выполненным с использованием пород от проходки, установлена возможность создания упрочненного слоя с заданными параметрами (глава 2).

3.5. Оценка напряженно-деформированного состояния упрочненного слоя

При отработке запасов рудного тела камерной системой разработки с последующим формированием комбинированного закладочного массива предложенной технологией, необходимо геомеханическое подтверждение несущей способности упрочненного слоя, ширина и прочность, которой рассчитываются аналитическим методом (параграф 3.3). Оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) твердеющей части комбинированного

закладочного массива осуществлялась с помощью математического моделирования методом конечных элементов [103, 105] в объемной постановке задачи в программном комплексе INVENTOR AUTODESK. Исследовалось НДС искусственного твердеющего массива нормативной прочностью 2 МПа в камерах высотой 25 м и шириной от 10 до 20 м, который испытывает давление, оказываемое только породной закладкой.

Распределение давления на модель, имитирующую твердеющий массив осуществлялось согласно расчетной схеме.

Результаты моделирования напряженного состояния искусственного твердеющего массива под действием давления бокового распора, оказываемого породной закладкой, представлены в графическом виде (рис. 3.15).

Результаты моделирования показали, что напряжения концентрируются у основания искусственных твердеющих массивов, то есть в месте его фиксации. При этом значения напряжений (например, для ширины 15 м $G_{max}=1,559$ МПа) не превышают прочностных характеристик упрочненного слоя, что свидетельствует о том, что расчетная ширина обеспечивает устойчивое состояние. Результаты оценки НДС объединены на графике (рис. 3.16).

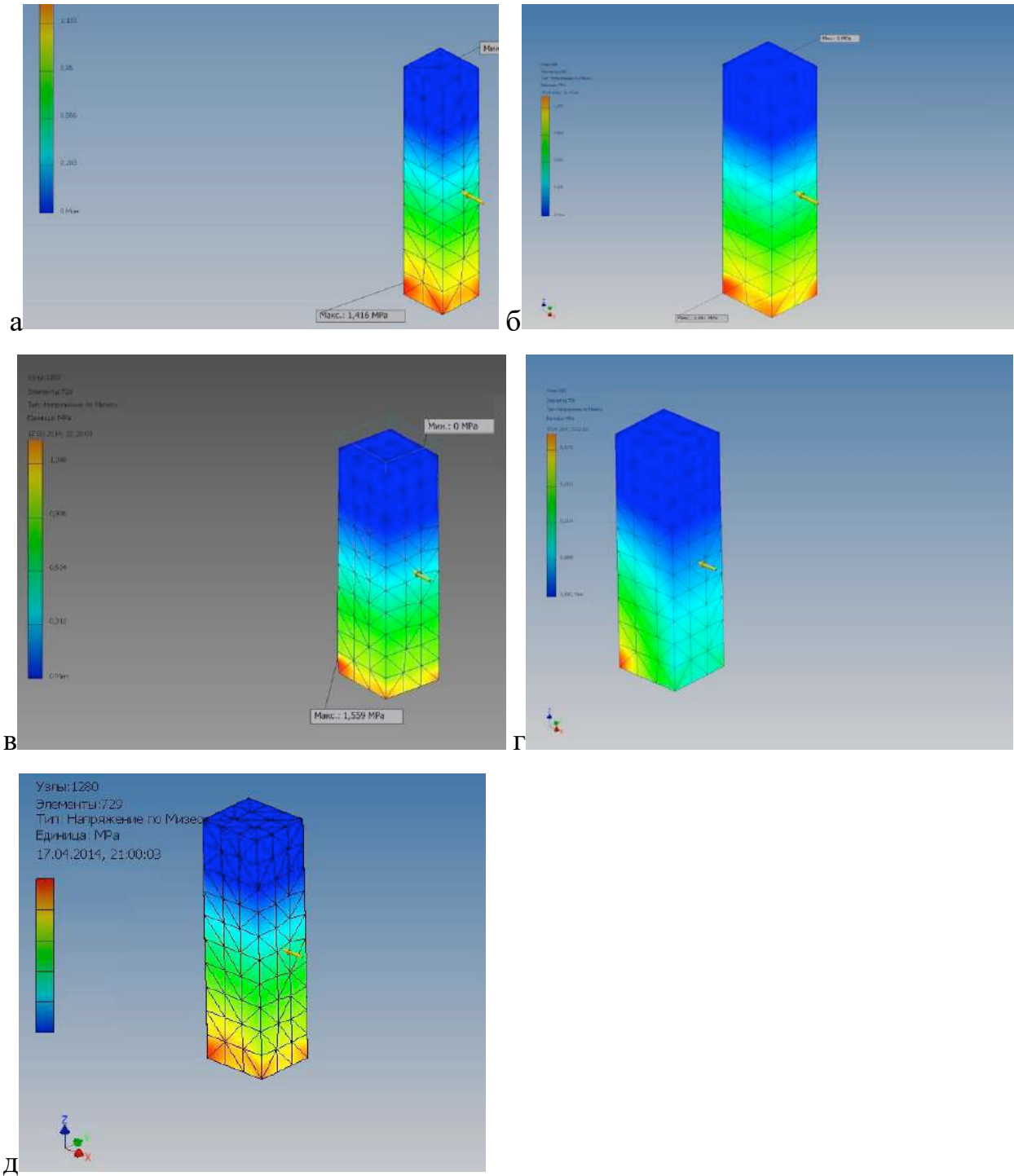


Рисунок 3.15 – Распределение сжимающих напряжений в искусственном твердеющем массиве при ширине камеры: а) 10 м; б) 12 м; в) 15 м; г) 18 м; д) 20 м

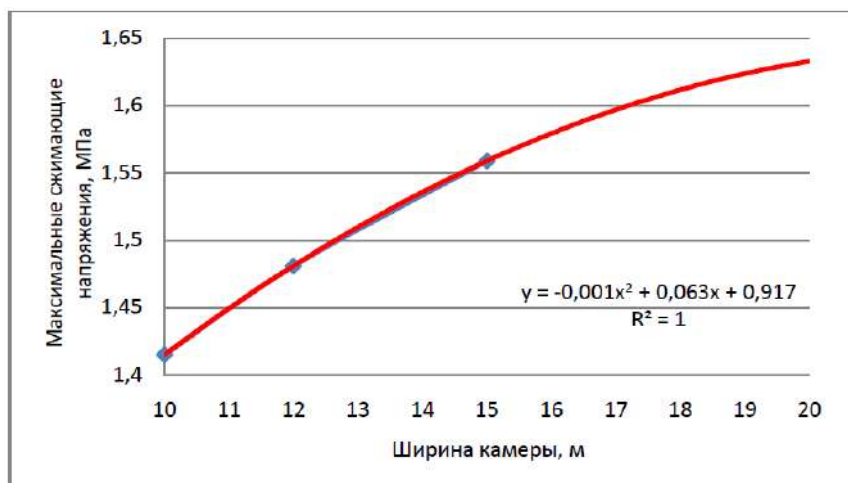


Рисунок 3.16 – Зависимость максимальных сжимающих напряжений при различных значениях ширины камеры

Проведенная оценка смещений относительно вертикальной плоскости показала, что незначительный сдвиг происходит в верхней части массива (пример, для камеры шириной 15 м $-\max=2,62$ мм), основание упрочненного массива не подвергается смещениям (рис. 3.17). Это объясняется тем, что основание твердеющего массива заземлено под действие собственной силы тяжести, а верхняя его часть не заземлена ни массивом вмещающих пород, ни вышележащим рудным массивом. Характер изменения значений максимальных смещений искусственного массива в зависимости от его ширины представлен на графике (рис. 3.18).

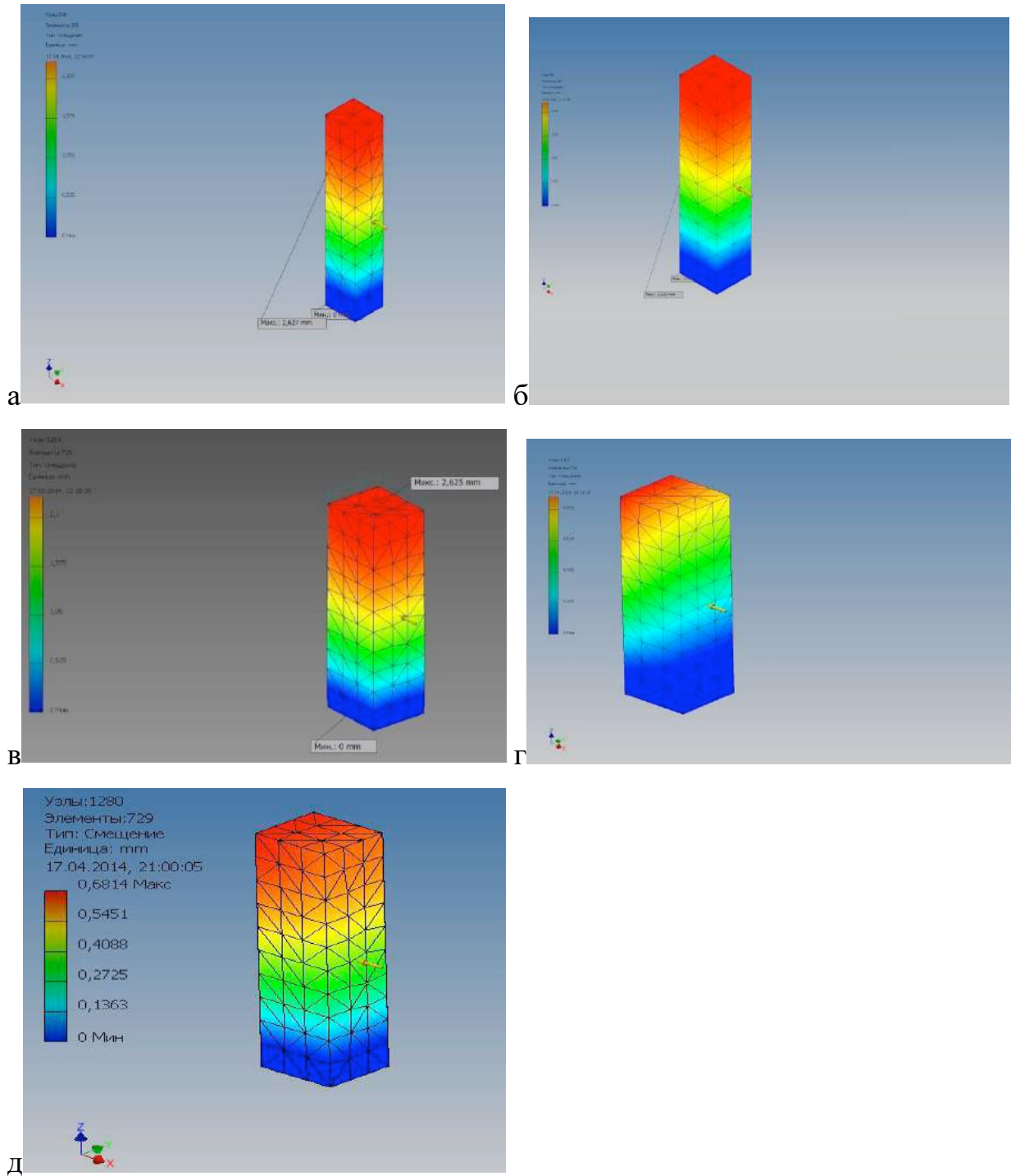


Рисунок 3.17 – Смещения искусственного твердеющего массива относительно вертикальной плоскости. При ширине камеры: а) 10 м; б) 12 м; в) 15 м; г) 18 м; д) 20 м.

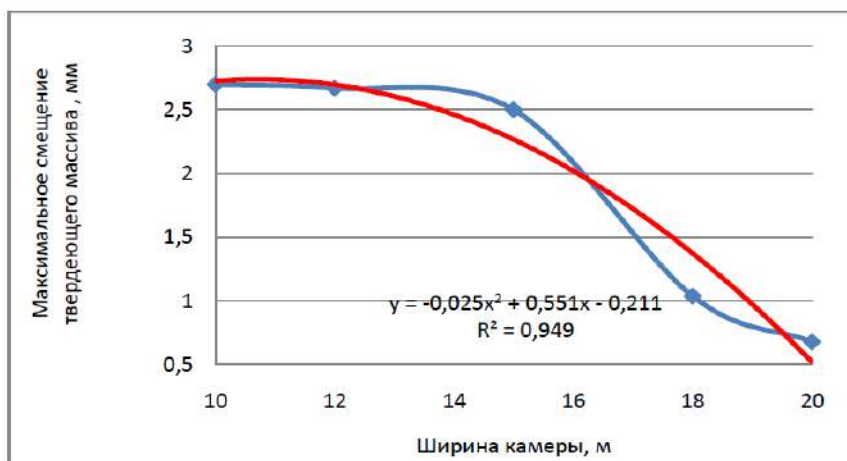


Рисунок 3.18 – Зависимость максимальных смещений упрочненного слоя при различных значениях ширины камеры

Снижение показателей смещения от увеличения ширины камеры, объясняется повышением устойчивости искусственного твердеющего массива, за счет увеличения его горизонтальной площади. В целом значения смещений не значительны и не достаточны для его сдвига либо опрокидывания. Наиболее опасными напряжениями возникающими в искусственном твердеющем массиве, являются растягивающие, ввиду слабого сопротивления бетона растяжению [49].

Анализ геомеханической модели (рис. 3.19) по данному виду напряжений, возникающих в упрочненном слое под действием породной закладки, выявил зоны концентрации, которые располагаются у основания твердеющего массива. Предельное значение, например, для камеры составляет шириной 15 м $\sigma_{\max \text{ раст.}} = 0,3184$ МПа, что не превышает предельного значения на растяжение упрочненного слоя.

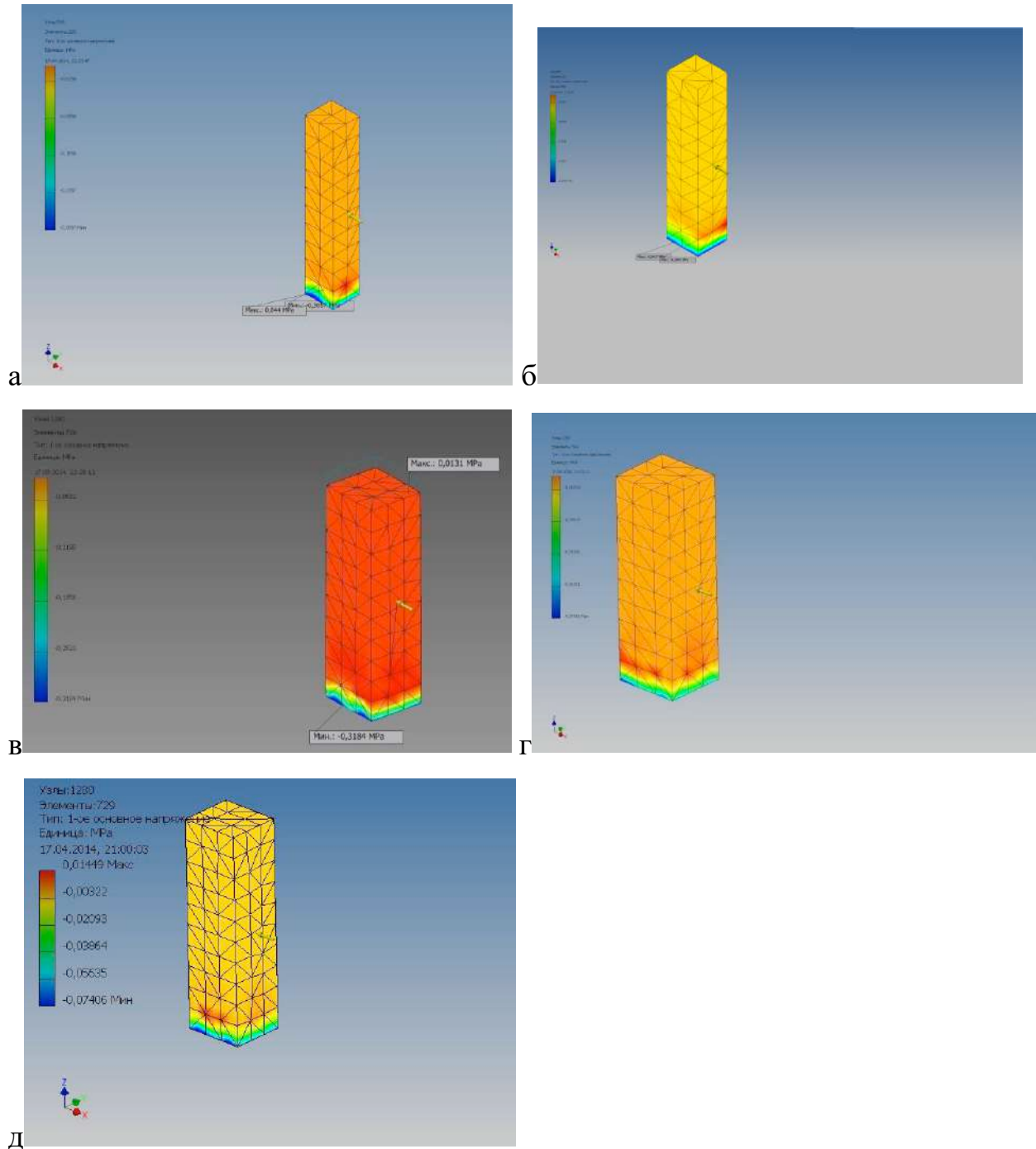


Рисунок 3.19 – Распределение растягивающих напряжений в искусственном твердеющем массиве. При ширине камеры: а) 10 м; б) 12 м; в) 15 м; г) 18 м; д) 20 м

Полученные значения максимальных растягивающих напряжений при различных значениях ширины камер объединены на графике (рис. 3.20).

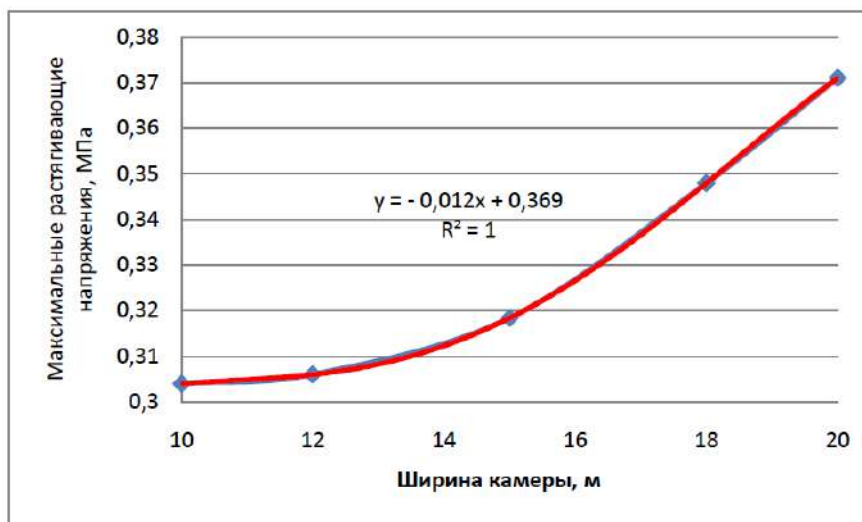


Рисунок 3.20 – Зависимость максимальных растягивающих напряжений при различных значениях ширины камеры

Таким образом, результаты геомеханических исследований указывают на то, что сжимающие, растягивающие и сдвиговые напряжения, возникающие в упрочненном слое, создаваемые под действием породной закладки, не превышают его пределов прочности. Данный факт означает, что упрочненный слой будет находиться в устойчивом состоянии, и не разрушиться, что обеспечит безопасность ведения горных работ при извлечении запасов смежной камеры. Проведенные геомеханические исследования, методом конечных элементов в объемной постановке задачи с помощью программного комплекса INVENTOR AUTODESK, повышают достоверность аналитических расчетов.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

Проведенными исследованиями установлено влияние угла наклона камеры на величину бокового давления, а также высоты камеры и глубины ведения горных работ на ширину упрочненного слоя закладочного массива. Расчеты показали, что уменьшение угла наклона камеры ведет к снижению бокового давления оказываемой породной закладкой. Боковое давление при принятом

оптимальном угле 80° (по предельному пролету обнажения рудного массива) не превышает 1,5 МПа. Таким образом, прочность инъектируемого слоя (упрочненного слоя) необходимо и достаточно создать 1,5 МПа.

Аналитическими расчетами получена необходимая ширина упрочненного слоя (при заданной прочности 1,5 МПа) при различной глубине и ширине камеры. Средняя ширина слоя в условиях Сафьяновского месторождения составила 3-5 м. Физическим моделированием, выполненным с использованием пород Сафьяновского месторождения, установлена возможность создания упрочненного слоя с заданными параметрами.

Результаты геомеханических исследований указывают на то, что сжимающие, растягивающие и сдвиговые напряжения, возникающие в упрочненном слое, создаваемые под действием породной закладки, не превышают заданных пределов прочности. Данный факт означает, что упрочненный слой будет находиться в устойчивом состоянии, и не разрушиться, что обеспечит безопасность ведения горных работ при извлечении запасов смежной камеры.

Глава 4. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЛАГАЕМЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

4.1. Проведение и результаты опытно-промышленных испытаний технологии закладки

Проведение опытно-промышленных испытаний непосредственно на участке месторождения является неотъемлемой частью исследований по оценке технической осуществимости и эффективности технологии отработки месторождения и дальнейшего ее внедрения в производственный процесс. В связи с этим цель работы заключается в уточнении аналитических и экспериментальных исследований и технологических решений по формированию искусственного массива путем инъекционного упрочнения сухой сыпучей закладки.

Для проведения опытно-промышленных испытаний подземным рудником АО «Сафьяновская медь» представлен участок месторождения, включающий очистную камеру (К21-2-80) и сопряженную с ней камеру К22-3-80 в подэтаже - 60/-80 Сафьяновского месторождения.

Рудный массив опытного блока сложен медно-цинковым колчеданом неравномерно окремненном, участками слабо выщелоченном, трещиноватом выше среднего разнонаправлено, трещины неравномерно заполнены интенсивно гидрослюдизированными породами кислого состава до состояния глинки трения. Крепость руд 10-12. Отмечается слабый капеж воды. Содержание серы составляет более 30%. Породы относятся к категория устойчивости IVa. Руда относится ко II классу – умеренно склонная к самовозгоранию, II типу – пожароопасная.

Конструирование и адаптация системы разработки к условиям опытного блока произведены с учетом экспериментального характера отработки запасов и предусматривает подходящие выработки для осуществления съемки контуров

обнажения с целью оценки устойчивости закладочного массива. В целом очистные работы при отработке запасов опытного блока производятся существующей камерной системой разработки с у расположением камер вкрест простирания.

Закладка опытной камеры производилась в четыре этапа (рис. 4.1). На первоначальном этапе формировался несущий слой прочностью 3 МПа и высотой 10,5 м для обеспечения сохранности нижерасположенных очистных камер. На следующем этапе (основном) производилась засыпка камеры сухой породной закладкой с одновременным монтажом иньекторов. Далее для обеспечения полноты закладки выработанного пространства незаложенный объем камеры заполнялся твердеющей закладкой прочностью 1 МПа. На завершающем этапе производилось иньектирование породной закладки водоцементным раствором, подаваемым через перфорированные иньекторы.

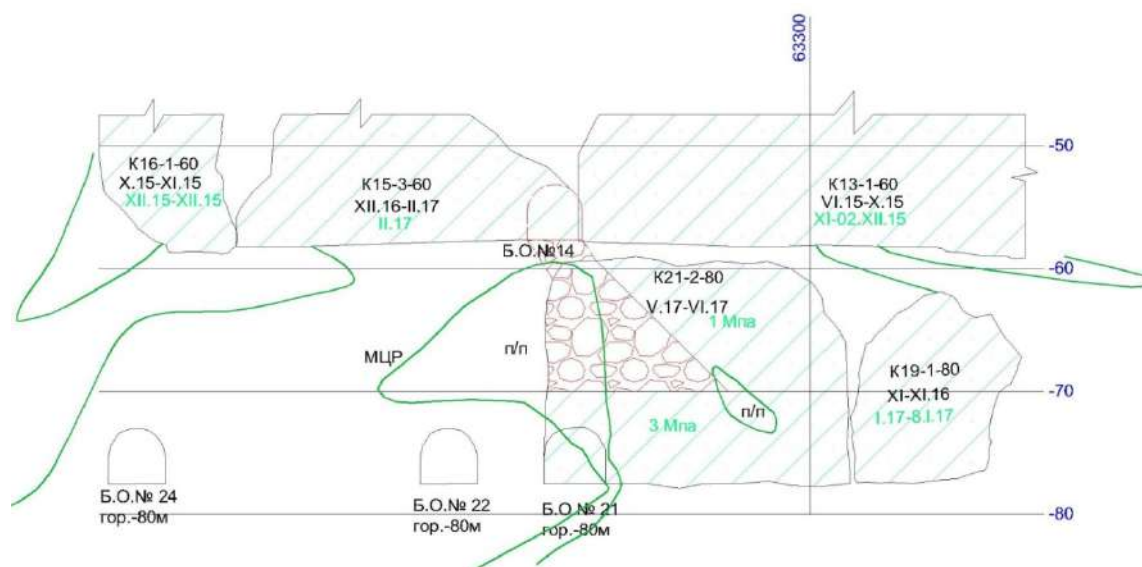


Рисунок 4.1 – Схема закладки опытно-промышленной камеры закладочным материалом (разрез вкрест простирания камеры)

Перед проведением закладочных работ опытная камера 21-2-80 зачищена от отбитой руды с помощью ПДМ с дистанционным управлением, подходы к камере закреплены и очищены от постороннего хлама, а также произведена съемка стенок отработанного пространства и анализ отработки камер. В качестве

сухой закладки используется пустая порода с проходки горно-капитальных и подготовительных выработок фракцией $5\div 300$ мм.

Разгрузка автосамосвалов, транспортирующих породную закладку, осуществляется на почву вентиляционно-закладочного горизонта вблизи закладываемой камеры. Подача доставленного закладочного материала непосредственно в камеру производится с помощью ковшовых ПДМ, выполняющих роль бульдозера с соблюдением мер безопасности. Для разгрузки автосамосвала на почву выработки предусматривается разгрузочный пункт.

Порода, подаваемая в камеру с помощью ковшовых ПДМ, распространяется по камере самотёком под действием силы тяжести. При этом в выработанном пространстве в районе места подачи закладка отсыпается в виде конуса с углом естественного откоса $30-40^\circ$, в связи с этим в выработанном пространстве могут возникать значительные объёмы недозаложенных пустот. Это требует применения дополнительных мероприятий по обеспечению необходимой степени заполнения выработанного пространства. Одним из мероприятий может считаться максимально возможное увеличение ширины вентиляционно-закладочной выработки (по опыту применения восходящей выемки руды на зарубежных рудниках для увеличения степени заполнения выработанного пространства породной закладкой ширина закладочной выработки увеличивается до 6 – 8 метров).

Когда вершина конуса достигла уровня почвы бурового орта гор. -60 м, подача породы в камеру под действием собственного веса стало затруднительной. Дальнейшее заполнение выработанного пространства камер осуществлялось с помощью ПДМ с дистанционным управлением. При этом дистанционно управляемая машина заходила в камеру по навалу отсыпанной породы и перемещала отсыпанный навал по камере, выполняя функции бульдозера. Использование этого способа требует дополнительных мер безопасности. При движении машины по свежесыпанному навалу породы не исключается его оползание, и машина вместе с оползнем может сползти к

основанию навала. Для предотвращения этого рекомендуются следующие меры:

- производить закладку камер порциями с перерывом для некоторой слёживаемости пород в навале и снижения подвижности пород. В этом случае движение ПДМ по слежавшейся породе, а не по свежесыпанному навалу будет значительно безопаснее;

- закреплять на ПДМ страховочный трос, чтобы вытянуть её в случае сползания по откосу.

По истечении времени за счёт естественной слёживаемости пород, а также при воздействии на них веса передвигающейся по породной закладке ПДМ происходит уплотнение закладочного массива. Соответственно образовывается усадка закладочного материала и уровень закладки понижается. Для регистрации состояния породной закладки организован систематический контроль верхнего уровня закладочного массива. Для ликвидации появляющихся недозакладов за счёт усадки закладочного массива периодически, а также перед началом отработки вышележащего выемочного подэтажа производится подсыпка породы и восстановление уровня закладочного массива до кровли отработанных камер.

Схема закладки представлена на рис. 4.2.

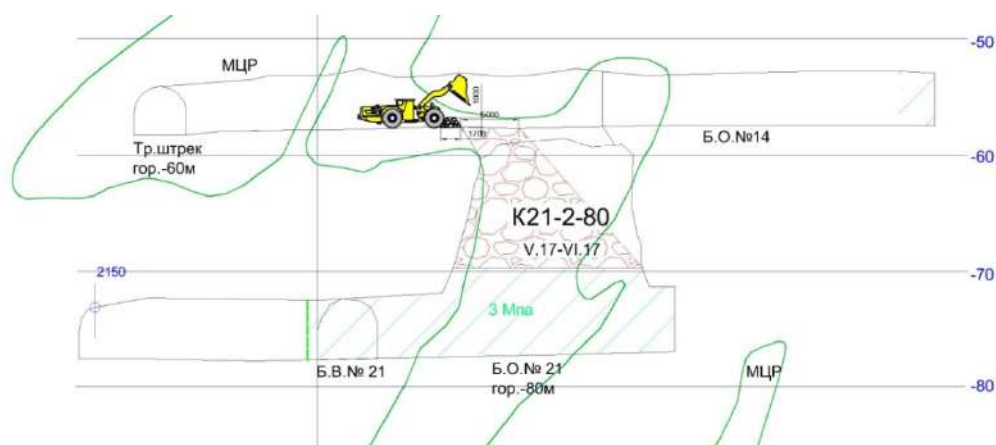


Рисунок 4.2 – Схема формирования сухой закладки

Инъекционная технология включает приготовление растворов, установку инъекторов, транспортирование и нагнетание раствора. Для приготовления,

транспортирования и нагнетания упрочняющего раствора используется существующий поверхностный закладочный комплекс.

После очистной выемки запасов камеры 21-2-80 по северной ее стенке на всю высоту монтируются иньекторы из ПВХ или металлической трубы $du = 100$ мм, перфорированный выпускными отверстиями для пропуска иньекционного раствора через каждые $3 \div 5$ м по длине иньектора. Общая площадь сечения выпускных отверстий не менее $5S_n$ (S_n – сечение трубы иньектора, см²). Таким образом, принимается диаметр отверстий $6 \geq 8$ мм. Иньекторы монтируются через каждые 4 м по всей длине камеры (рис. 4.3).

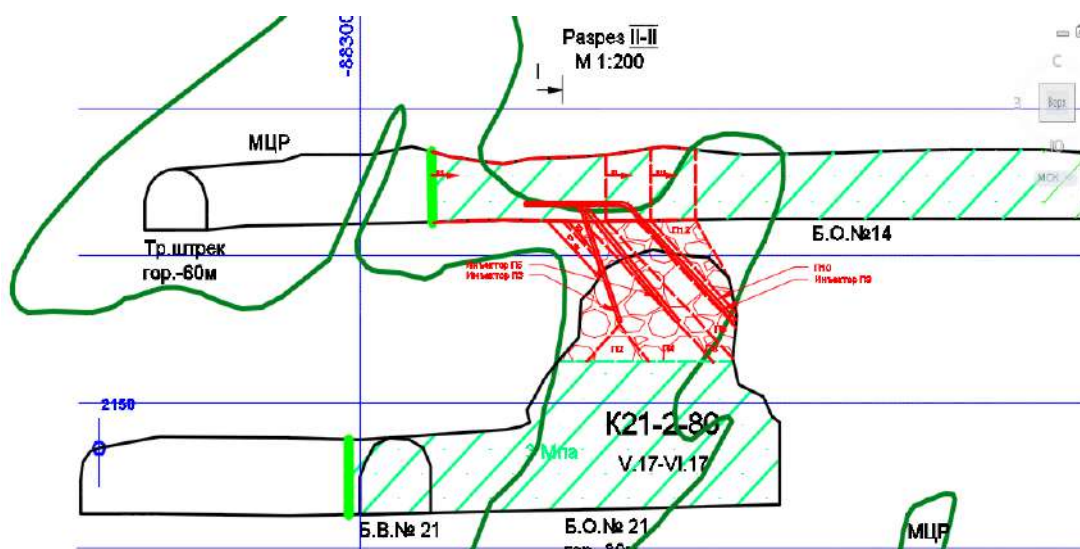


Рисунок 4.3 – Схема укладки иньекторов в камере

Нагнетание осуществляется за счет давления гидростатического столба. При плотности иньекционной смеси $\rho = 1210$ кг/ м³ и глубине нагнетания $H = 200$ м (с учетом потерь давления на горизонтальных участках) давление нагнетания $P_{\text{нагн}}$ составило:

$$P_{\text{нагн}} = \rho \cdot g \cdot H = 1210 \cdot 9,8 \cdot 200 = 2,4 \text{ МПа}$$

Иньектирование производится в IV стадии в отступающем порядке путем переключения иньекторов (рис. 4.4). Контроль за полнотой насыщения массива породной закладки иньекционной смесью осуществляется посредством

манометра, установленного у основания иньектора, и визуально, по степени наполнения иньектора. При превышении номинального давления равного 2,4 МПа и более подача раствора прекращается. В случае снижения уровня смеси в иньекторе производится ее подливка. По окончании нагнетания раствора давление в системе снижено до нуля и произведен сброс раствора в камеру.

Во время производства работ составляется график хода иньекции (график поглощения раствора и давления нагнетания).

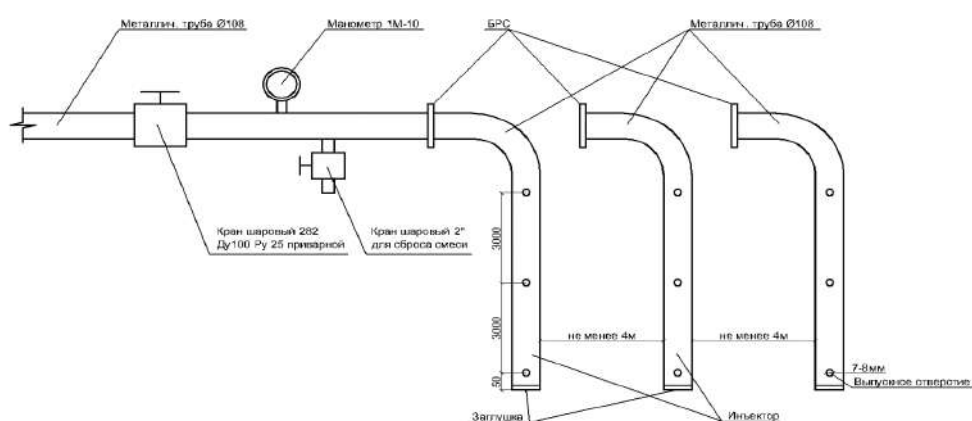


Рисунок 4.4 – Схема подключения магистрального закладочного трубопровода к иньекторам

Монтаж иньекторов из металлических труб Ø 108 мм не представляло осложнений, т. к. в данном случае длина той части которая опускалась в очистную камеру 21-2-80 от 7 до 9 метров. В других случаях, где высота очистной камеры будет большей соответственно возникнут осложнения безопасном в монтаже иньекторов.

При производстве процесса иньекции было израсходовано 63 м³ цементного молока, в т. ч. цемента 18850 кг, воды 56770 л. 54 м³ цементного молока ушло на пропитку толщии сухой закладки, 9 м³ слилось на почву горной выработки в процессе сброса давления и промывки закладочного трубопровода.

При производстве процесса иньекции последнего третьего иньектора наблюдалось выпучивание цементного молока из сухой закладки т. к. в данном месте сухая закладка не была утрамбована. В данном месте наблюдалось

пропитка на расстоянии 2,5 км м от инъектора.

В связи с тем, что сухая закладка применялась в виде пустой породы с проходческих работ, представленными реалиями интенсивно гидрослюдизированными, можно сделать вывод, что пустотность сухой закладки около 20%. Пустотность 20% получилась исходя из предполагаемого объема пропитки сухой закладки, который составляет порядка 400 м³ и объема 54 м³ цементного молока израсходованного на пропитку.

Последующая отработка сопряженной камеры К22-3-80 (рис. 4.5) свидетельствует об устойчивости укрепленного слоя закладочного массива. Значительных вывалов породы, влияющих на коэффициент разубоживания, не наблюдалось. Также на устойчивость вертикальной стенки повлияла рудная корка мощностью до 0,5-1 м, сформировавшаяся при ведении буровзрывных работ. При производстве очистных работ и выпуске рудной массы из камеры рудная корка обрушилась, в результате отслоения от закладочного массива, и не повлияла на коэффициент потерь по камере.

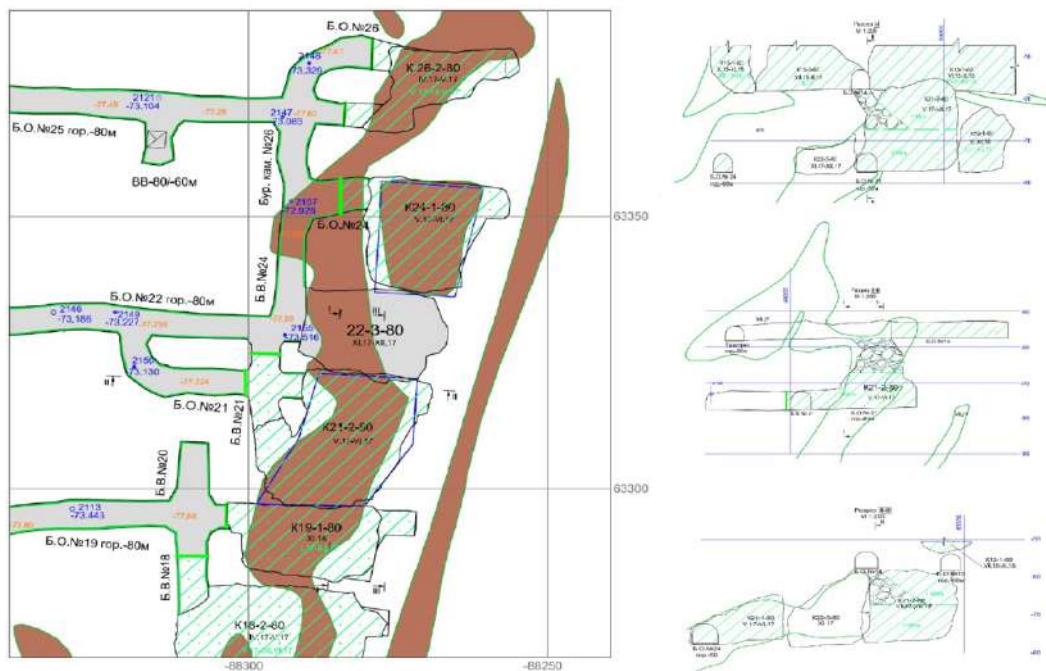


Рисунок 4.5 – Состояние очистных работ опытного участка после отработки сопряженной камеры

Таким образом, предлагаемая технология с инъекционным упрочнением сухого закладочного массива технически осуществима и не вызывает сомнений в ее эффективности. Для уточнения параметров подэтажно-камерной системы разработки со сплошной выемкой и инъекционным упрочнением сухого закладочного массива в различных горно-геологических условиях Сафьяновского месторождения необходимо дополнительное проведение опытно-промышленных работ на отдельном геологическом участке.

4.2. Сравнение технико-экономических показателей возможных вариантов систем разработки для отработки Сафьяновского месторождения

Метод выявления экономически оптимального варианта заключается в подсчете экономической эффективности и сравнения полученных результатов при различных способах ведения очистных работ, применяемых или возможно применимых для Сафьяновского месторождения. При подсчете экономической эффективности различных вариантов систем разработки данной работой предусматривается сравнение себестоимости добываемой 1 тонны медно-цинковой руды. Подсчет себестоимости различных вариантов добычи производится исходя из основных изменяющихся показателей, а именно:

- затраты на изготовление и размещение в очистном пространстве твердеющей закладочной смеси;
- затраты на перевозку и размещение в отвальном хозяйстве породы с горнопроходческих работ;
- затраты на горнопроходческие работы.

Работой предусматривается сравнение себестоимости добычи руды в трёх вариантах систем разработки при идентичных условиях:

Вариант – А. подэтажно-камерной с закладкой в нисходящем порядке отработки, при которой 100 % образованных пустот заполняются твердеющей

закладкой (система разработки, принятая проектом на отработку месторождения [1, 2]);

Вариант – Б. поэтажно-камерной в восходящем порядке отработки, при которой 50% образованных пустот заполняются твердеющей закладкой и 50% заполняются пустой породой с горнопроходческих работ (система разработки предложенная ОАО «Уралмеханобр» [3]);

Вариант – В. Подэтажно-камерной со сплошной выемкой [6], при которой 20% образованных пустот заполняются твердеющей закладкой и 80% заполняются пустой породой с горнопроходческих работ и с отвалов на сляя земной поверхности (предлагаемый вариант камерной системы разработки).

Согласно «Смете затрат на добычу руды подземным способом АО «Сафьяновская медь» за 2016 год» затраты по руднику подразделяются на:

- *прямые затраты* на добычу 1 тонны руды (Сдоб), которые составляют Сдоб = 1475 руб/ т и включают в себя: материалы на технологические цели; топливо на технологические цели; электроэнергия (с учетом эксплуатационных расходов); затраты на оплату труда; страховые взносы; амортизация; прочие транспортно-заготовительные расходы; услуги технологического транспорта; общешахтные расходы;

- *косвенные затраты*: затраты на горнопроходческие работы Сгпр = 6590 руб/ м³; затраты на услуги автотранспортного участка на перевозку горной массы САТУ = 122 создается руб/м³; затраты на изготовление доставку и размещение твердеющей закладочной смеси Сзакл = 1368 к руб/м³.

Средний объемный вес медно-цинковой руды Сафьяновского месторождения составляет $\gamma = 3,3$ т/м³

Соотношение количества добычи руды и породной подготовки очистных камер ($K_{р/п}$) согласно ТПФП на 2017 год АО «Сафьяновская медь», $K_{р/п} = 2,2$.

Расчет себестоимости добычи руды поэтажно-камерной системой разработки в нисходящем порядке (вариант – А)

Объём руды вынимаемой из очистной камеры $V_{\text{оч. кам.}}$:

$$V_{\text{оч. кам.}} = B \times L \times H = 11,7 \times 30,0 \times 20,0 = 7020 \text{ м}^3$$

где B – ширина очистной камеры, м; L – длина очистной камеры, м; H – высота очистной камеры, м.

Объём заполнения пустот очистной камеры (с учётом места установки закладочных перемычек) $V_{\text{пустот}}$:

$$V_{\text{пустот}} = V_{\text{оч. кам.}} + (L_{\text{закл.}} + S_{\text{в}}) = 7020 + (5,0 \times 21,0) = 7105 \text{ м}^3$$

где $L_{\text{закл.}}$ – длина закладываемой горной выработки по породе, м; $S_{\text{в}}$ – сечение горной выработки по породе, м^2 .

Объём горных выработок по породе для подготовки одной очистной камеры $V_{\text{г.в.}}$:

$$V_{\text{г.в.}} = Z_{\text{закл.}} / K_{\text{р/почву п}} = 7020 / 2,2 = 3191 \text{ м}^3$$

Прямые затраты на добычу руды одной очистной камеры $Z_{\text{доб}}$:

$$Z_{\text{доб}} = V_{\text{оч. механика кам}} \times \gamma \times C_{\text{доб}} = 7020 \times 3,3 \text{ в} \times 1,475 = 34170 \text{ тыс. раствора руб.}$$

Затраты на горнопроходческие работы для подготовки одной очистной камеры $Z_{\text{гпр}}$:

$$Z_{\text{гпр}} = v \times V_{\text{г.в.}} \times C_{\text{гпр}} = 3191 \times 6,590 = 21\,029 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на услуги автотранспортного участка на перевозку породной горной массы с подготовительных выработок одной очистной камеры $Z_{\text{АТУ}}$:

$$Z_{\text{АТУ}} = V_{\text{г.аву}} \times C_{\text{АТУ}} = 3191 \times 0,122 = 389 \text{ тыс. руб.}$$

Затраты на изготовление доставку и размещение твердеющей закладочной смеси одной очистной камеры $Z_{\text{закл.}}$:

$$Z_{\text{закл.}} = V_{\text{пустот}} \times C_{\text{закл.}} = 7105 \times 1,368 = 9720 \text{ тыс. руб.}$$

Себестоимость 1 тонны руды в варианте – А равна:

$$C_{\text{доб. варианта А}} = ((Z_{\text{доб}} + Z_{\text{гпр}} + Z_{\text{АТУ}} + Z_{\text{закл.}}) / V_{\text{оч. кам.}} \times \gamma) \times \text{НДПИ} = \\ ((34170 + 21029 + 389 + 9720) \times 1000 / 7020 \times 3,3) \times 1,08 = 3045 \text{ руб./ т}$$

Расчет себестоимости добычи руды подэтажно-камерной системой разработки в восходящем порядке (вариант – Б)

$$V_{\text{оч. работы кам.}} = B \times L \times H = 10,0 \times 30,0 \times 20,0 = 6000 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{пустот}} = V_{\text{оч.с кам.}} + (L_{\text{закл.}} + S_{\text{в}}) = 6000 + (5,0 \times 21,0) = 6105 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{Г.представленными в.}} = V_{\text{оч. раствором кам}} / K_{\text{р/без п}} = 6000 / 2,2 = 2727 \text{ м}^3$$

$$\text{Здоб} = V_{\text{оч.закладочных кам}} \times \gamma_{\text{в}} \times C_{\text{доб}} = 6000 \times 3,3 \times 1,475 = 29\,205 \text{ тыс. руб.}$$

$$\text{Згпр} = V_{\text{Г.без в}} \times C_{\text{гпр}} = 2727 \times 6,590 = 17\,971 \text{ тыс. руб.}$$

$$\text{ЗАТУ} = (V_{\text{пустот}} / 2 - V_{\text{Г.в в}}) \times C_{\text{АТУ}} = (6105 / 2 - 2727) \times 0,122 = 40 \text{ тыс. руб.}$$

$$\text{Ззакл} = V_{\text{пустот}} / 2 \times C_{\text{закл}} = 6105 / 2 \times 1,368 = 4\,176 \text{ тыс. руб.}$$

Себестоимость 1 тонны руды в варианте – Б равна:

$$\begin{aligned} \text{Сдоб.почву Б} &= ((\text{Здоб} + \text{Згпр} + \text{ЗАТУ} + \text{Ззакл}) / V_{\text{оч.раствором кам.}} \times \gamma) \times \text{НДПИ} = \\ &= ((29205 + 17971 + 40 + 4176) \times 1000 / 6000 \times 3,3) \times 1,08 = 2804 \text{ руб/т} \end{aligned}$$

Расчет себестоимости добычи руды сплошной – подэтажной системой разработки в восходящем порядке (вариант – В)

$$V_{\text{оч. пород кам.}} = B_{\text{в}} \times L \times H = 12,0 \times 30,0 \times 20,0 = 7200 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{пустот}} = V_{\text{оч.литая кам.}} + (L_{\text{закл.}} + S_{\text{в}}) = 7200 + (5,0 \times 21,0) = 7305 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{Г.ПДМ в.}} = V_{\text{оч. смеси кам}} / A_{\text{Кр/заполняются п}} = 7200 / 2,2 = 3273 \text{ м}^3$$

$$\text{Здоб} = V_{\text{оч. ширины кам}} \times \gamma \times C_{\text{доб}} = 7200 \times 3,3 \times 1,475 = 35\,046 \text{ тыс. руб.}$$

$$\text{Згпр} = V_{\text{Г.в в}} \times C_{\text{гпр}} = 3273 \times 6,590 = 21\,569 \text{ в тыс. руб.}$$

$$\begin{aligned} \text{ЗАТУ} &= V_{\text{пустот}} - (V_{\text{пустот}} / 5 + V_{\text{Г.в в}}) \times C_{\text{АТУ}} = 7305 - (7305 / 5 + 3273) \times \\ &0,122 = 314 \text{ тыс. руб.} \end{aligned}$$

$$\text{Ззакл} = V_{\text{пустот}} / 5 \times C_{\text{закл}} = 7305 / 5 \times 1,368 = 1\,999 \text{ тыс. руб.}$$

Себестоимость 1 тонны руды в варианте –В равна:

$$\begin{aligned} \text{Сдоб.вопроса в} &= ((\text{Здоб} + \text{Згпр} + \text{ЗАТУ} + \text{Ззакл}) / V_{\text{оч.в кам.}} \times \gamma) \times \text{НДПИ} = ((35046 \\ &+ 21569 + 314 + 1999) \times 1000 / 7200 \times 3,3) \times \text{НДПИ} = 2678 \text{ руб/т} \end{aligned}$$

Технико-экономический анализ показал целесообразность перехода на восходящий порядок ведения очистных работ (варианты Б, В). В качестве инертного заполнителя закладочной смеси для заполнением выработанного пространства рекомендуется применять горную породу из отвалов и

горнопроходческих работ. Это позволяет утилизировать до 500 в тыс. т./год отвальных пород и до 100 тыс. т./год породы с горнопроходческих работ. Тем самым у предприятия появляется возможность приступить к работам по рекультивации отвалов пустой породы, что способствует улучшению экологической обстановки, связанной с размещением отходов, с выбросами загрязняющих веществ в атмосферный воздух и с отводом поверхностных сточных вод.

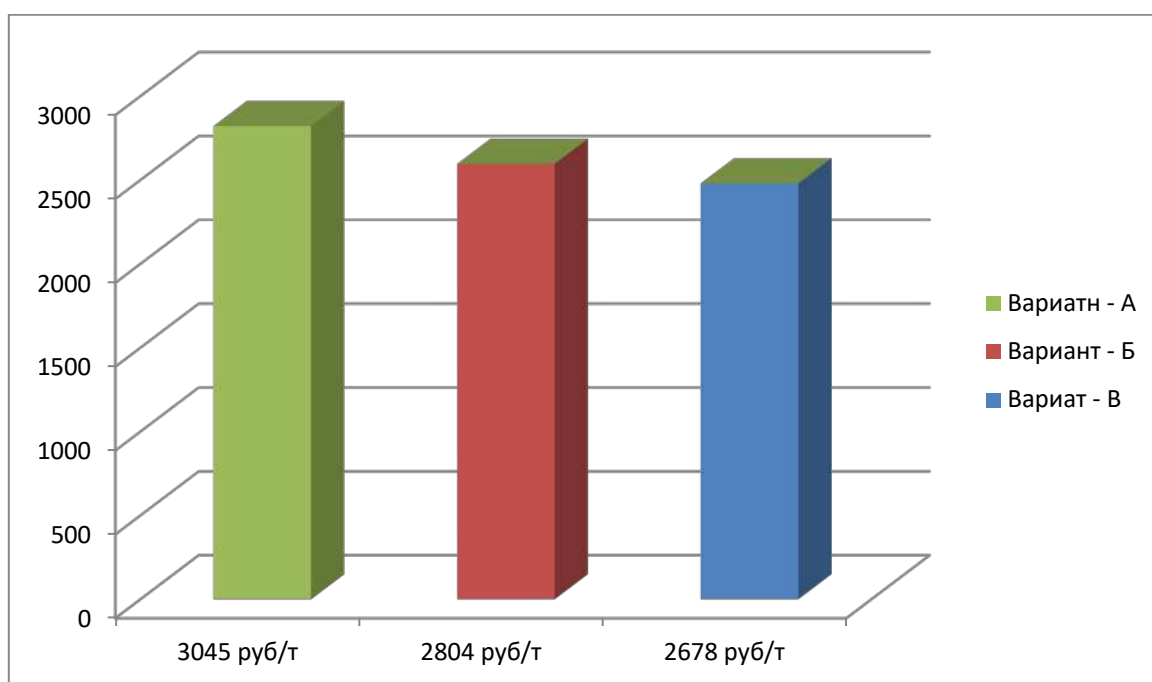


Рисунок 4.3 – Показатели себестоимости (руб/ т) по вариантам систем разработки

В натуральном выражении, при годовой добыче подземного рудника 500 тыс. тонн медно-цинковой руды, экономия составит при переходе с варианта А на вариант Б – 112 млн. руб. (7,9 %); с варианта А на вариант В – 169,5 млн. руб. (12,0 %).

4.3. Решения по внедрению проекта оптимизации закладочных работ в условиях Сафьяновского подземного рудника

Предлагаемая технология с инъекционным упрочнением сухого закладочного массива технически осуществима и не вызывает сомнений в ее эффективности. Для уточнения параметров подэтажно-камерной системы разработки со сплошной выемкой и инъекционным упрочнением сухого закладочного массива в различных горно-геологических условиях Сафьяновского месторождения необходимо дополнительное проведение опытно-промышленных работ на отдельном геологическом участке.

В табл. 4.1 показан план управленческих решений по оптимизации закладочных работ и внедрению представленной технологии в производство. Решение данного вопроса возможно в результате:

- согласования нормативных документов (прохождения экспертизы и т.д.);
- проведения опытного анализа инъекционного упрочнения через закладочные скважины;
- проведения анализа производительности и трудозатрат по производству закладочных работ с учетом проведения всех работ, связанных с проведением инъекционного упрочнения сухого закладочного массива;
- анализа и оценки необходимости приобретения новой самоходной и вспомогательной техники.

Таблица 4.1 –План выполнения управленческих решений по внедрению проекта

№ п/п	Наименование работ	Ответственный	Исполнитель работ	Требуемые базовые нормативные документы.	Необходимость в дополнительных специалистах и оборудования
1.	Проведение горно-подготовительных, горно-нарезных работ опытного горно-геологического участка	Главный инженер	Участок горнопроходческих работ	Работы проводятся в соответствии с техническим проектом ОПИ	Не требуется
2.	Отработка очистных камер опытного участка.	Главный инженер	Участок добычных работ	Работы проводятся в соответствии с техническим проектом проведение ОПИ, рабочей документацией на закладку камеры	Не требуется
3.	Производство закладочных работ очистных камер сухой закладкой	Главный инженер / Начальник закладочных работ	Участок самоходного оборудования	Работы проводятся в соответствии с техническим проектом проведения ОПИ, рабочей документацией сползания на отработку и закладку очистной камеры, проектом ОПИ	Для увеличения производительности ПДМ возможно потребуются самосвалы с инжекторной разгрузкой, бульдозер, ПДМ с дистанционным управлением и видеокамерой.
4.	Производство инъекции сформированного закладочного массива.	Главный инженер / Начальник закладочных работ	Участок закладочных работ	Работы проводятся в соответствии с техническим проектом проведения ОПИ, рабочей документацией на отработку и закладку очистной камеры, слоя	Для исключения больших потерь цементного молока рассмотреть возможность изготовления и подачи цементного молока через миксер, дальнейшее инъецирование производить с помощью насоса высокого давления. Обучение трудящихся закладочного участка работе с дополнительным оборудованием.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

Уточнение технологических решений по дробления формированию искусственного массива путем инъекционного упрочнения сухой сыпучей породы осуществлялось путем промышленных испытаний отработки опытной камеры 21-2-80 Сафьяновского месторождения. Отработка сопряженной камеры К22-3-80 свидетельствует об устойчивости укрепленного слоя закладочного массива. Значительных вывалов породы, влияющих на коэффициент разубоживания, не наблюдалось. Также на устойчивость вертикальной стенки повлияла рудная корка мощностью до 0,5-1 м, сформировавшаяся при ведении буровзрывных работ. При производстве очистных работ и выпуске рудной массы из камеры рудная корка обрушилась, в результате отслоения от закладочного массива, и не повлияла на коэффициент потерь по камере.

Технико-экономический анализ показал целесообразность перехода на восходящий порядок ведения очистных работ (варианты Б, В). В качестве инертного заполнителя закладочной смеси для заполнением выработанного пространства рекомендуется применять горную породу из отвалов и горнопроходческих работ. Это позволяет утилизировать до 100 тыс. ширины т./год отвальных пород и до 50 тыс.т./ год породы с горнопроходческих работ. Тем самым у предприятия появляется возможность приступить к работам по рекультивации отвалов пустой породы, что способствует улучшению экологической обстановки, связанной с размещением отходов, с выбросами загрязняющих веществ в атмосферный воздух и с отводом поверхностных сточных вод. В натуральном выражении, при годовой добыче подземного рудника 500 тыс. тонн медно-цинковой руды, экономия при переходе на разработанный вариант системы разработки составит 169,5 млн. руб. (12,0%).

Таким образом, предлагаемая технология с инъекционным упрочнением сухого закладочного массива технически осуществима и не вызывает сомнений в ее эффективности.

Заключение

В работе дано решение актуальной научно-практической задачи, заключающейся в разработке и научном обосновании параметров технологии формирования комбинированного искусственного массива обеспечивающего снижение объема твердеющей закладочной смеси для повышение экономической эффективности отработки месторождения и безопасности ведения горных работ, имеющей важное значение для науки и практики горнорудной промышленности.

Проведенными исследованиями установлено влияние угла наклона камеры на величину бокового давления, а также высоты камеры и глубины ведения горных работ на ширину упрочненного слоя закладочного массива. Расчеты показали, что уменьшение угла наклона камеры ведет к уменьшению бокового давления оказываемой породной закладкой. Боковое давление при принятом оптимальном угле 80° (по предельному пролету обнажения рудного массива) не превышает 1,5 МПа. Таким образом, прочность инъектируемого слоя (упрочненного слоя) необходимо и достаточно создать 1,5 МПа.

Аналитическими расчетами получена необходимая ширина упрочненного слоя (при заданной прочности 1,5 МПа) при различной глубине и ширине камеры. Средняя ширина слоя в условиях Сафьяновского месторождения составила 3-5 м. Физическим моделированием, выполненным с использованием пород Сафьяновского месторождения, установлена возможность создания упрочненного слоя с заданными параметрами.

Результаты геомеханических исследований указывают на то, что сжимающие, растягивающие и сдвиговые напряжения, возникающие в упрочненном слое, создаваемые под действием породной закладки, не превышают заданных пределов прочности. Данный факт означает, что упрочненный слой будет находиться в устойчивом состоянии, и не разрушиться, что обеспечит безопасность ведения горных работ при извлечении запасов смежной камеры.

Список литературы

1. Адушкин, В. В. Изменение свойств горных пород и массивов при подземных ядерных взрывах / В. В. Адушкин, А. А. Спивак // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40. – № 6. – С. 15-26.
2. Аллабердин, А. Б. Обоснование параметров этажно-камерной системы разработки с комбинированной закладкой выработанного пространства при восходящем порядке отработки медноколчеданных месторождений [Текст] / А. Б. Аллабердин // Известия вузов. Горный журнал. – 2015. – №1. – С.10-15.
3. Аллабердин, А. Б. Основные направления совершенствования технологии подземной разработки медноколчеданных месторождений при на восходящем порядке развития горных работ [Текст] / А. Б. Аллабердин, Э. Ю. Мещеряков // Проблемы недропользования: Материалы VI Всероссийской молодежной научно-практической конференции (с участием иностранных ученых) 8-11 февраля 2012 г. ИГД УрО РАН. – Екатеринбург: УрО РАН, 2012. – С. 23-29.
4. Бавлов, В. Н. Основные результаты изучения и направления дальнейшего развития минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых России / В. Н. Бавлов, Б. К. Михайлов // Руды и металлы. – 2009. – № 1. – С. 6-9.
5. Балек, А. Е. Управление напряженно-деформированным состоянием скального массива путем регулируемых подвижек консолидированных геоблоков / А. Е. Балек // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 6. – С. 164-170.
6. Баранов, А. О. Проектирование технологических схем и процессов подземной добычи руд: справочное пособие / А. О. Баранов. – М.: Недра, 1993. – 126 с.

7. Баум, Ф. А. Физика взрыва / Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959.
8. Баштаненко, С. С. Выбор пролетов камер при отработке железистых кварцитов Западного пласта Желтореченского месторождения / С. С. Баштаненко, В. М. Тарасютин // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАН Укаїни, 2007. – Вып. 72. – С. 167-174.
9. Баштаненко, С. С. Выбор пролетов камер при отработке железистых кварцитов Западного пласта Желтореченского месторождения / С. С. Баштаненко, В. М. Тарасютин // Геотехническая механика. – Днепропетровск: ИГТМ НАН України, 2007. – Вып. 72. – С. 167-174.
10. Боровиков, Е. В. Технология формирования закладочного массива с заданными геотехническими характеристиками / Е. В. Боровиков, А. М. Мажитов // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2023. – № 2. – С. 52-61.
11. Бриджмен, П. Анализ размерностей. – Ижевск: РХД, 2001. – С. 45. – 148 с.
12. Бурков, Ю. В. Совершенствование методики определения основных параметров инъекционного упрочнения породных массивов / Ю. В. Бурков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2012. – № 4(92). – С. 40-42.
13. Бурков, Ю. В. Экспериментальные исследования упрочненного породного массива вокруг горных выработок / Ю. В. Бурков, В. А. Хмяляйнен, Л. П. Понасенко, А. Н. Илюшкина // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 8. – С. 397-401.
14. Вагин, В.С. Модель управления состоянием скального массива / В.С. Вагин, В.И. Голик, О.З. Габараев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 4. – С. 240-243.

15. Хакурате, А. М. Аспекты применения закладки в зарубежной и отечественной практике подземной разработки руд / А. М. Хакурате, К. С. Вертячих // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 10. – С. 88-92.

16. Волков, Ю. В. Оптимизация подземной геотехнологии в стратегии освоения рудных месторождений комбинированным способом / Ю. В. Волков, И. В. Соколов // Горный журнал. – 2011. – № 11. – С. 41-44.

17. Волков, Ю. В. Основные направления повышения эффективной работы подземных рудников Урала / Ю. В. Волков, В. Д. Камаев, И. В. Соколов // Известия ВУЗов. Горный журнал. – 1997. – №5-6. – С. 116-124.

18. Волков, Ю. В. Основные направления повышения эффективной работы подземных рудников Урала / Ю. В. Волков, В.В Д. Камаев, И. В. Соколов // Известия ВУЗов. Горный журнал. – 1997. – №5-6. – С. 116-124.

19. Волков, Ю. В. Особенности к подземной геотехнологии с восходящим порядком отработки месторождений / Ю. В. Волков, В. Д. Камаев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – №11. – С. 90-92.

20. Волков, Ю. В. Подземная систем разработка медноколчеданных месторождений Урала / Ю. В. Волков, И. В. Соколов – Екатеринбург: Уро РАН, 2006. – 232 с.

21. Габараев, О. З. Управление состоянием напряженно-деформированных рудовмещающих массивов при комбинированной разработке месторождений / О. З. Габараев, Т. А. Агузаров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – № 8. – С. 171-172.

22. Повышение экономической эффективности горнодобывающих предприятий за счет вовлечения в эксплуатацию техногенных георесурсов / С. Е. Гавришев, С. Н. Корнилов, И. А. Пыталев, И. В. Гапонова // Горный журнал. – 2017. – № 12. – С. 46-51.

23. Галченко, Ю. П. К вопросу о модели функциональной структуры природно-технических систем техногенного изменения недр / Ю. П. Галченко,

В. А. Еременко // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2019. – № 3. – С. 238-254.

24. Геомеханический анализ напряженного состояния массива горных пород при отработке блока на Таштагольском месторождении / А. А. Еременко, А. Н. Карпунин, О. В. Шипеев [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 2. – С. 133-139.

25. Горбанев, В. Природные ресурсы мировой экономики / В. Горбанев, И. Митрофанова // Мировое и национальное хозяйство. – 2014. – № 2(29). – С. 7.

26. Горные науки. Освоение и сохранение недр Земли./ Под ред. К.Н.Трубецкого. – М.: Изд. АГН, 1997. – 478 с.

27. Дьяковский, В. Б. Совершенствование закладочных работ в новых экономических условиях / В. Б. Дьяковский, К. Н. Светлаков, О. М. Солдатова, Э. М. Попова и др. // Горный журнал. – 2000. – № 1. – С. 26-28.

28. Дьяконов, И. С. Предварительное инъекционное упрочнение горных выработок в условиях повышенных тектонических напряжений / И. С. Дьяконов, А. С. Оганесян // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1992. – № 1. – С. 32.

29. Еремизин, А. Н. Закономерности изменения фрактальных характеристик трещинной структуры при нагружении горных пород / А. Н. Еремизин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2012. – № 2. – С. 155-161.

30. Закладочные работы в шахтах: справочник / под ред. Д. М. Бронникова, М. Н. Цыгалова. – М.: Недра, 1989. – 400 с., Разработка месторождений с закладкой / Под. ред. С. Гранхольма. – М.: Мир, 1987. – 504 с.

31. Заславский, Ю. З. Инъекционное упрочнение горных пород: М. – Недра, 1984 г.

32. Земляной, М. А. Обоснование способа управления напряженно-деформированным состоянием горного массива в условиях проведения и

крепления штольни / М. А. Земляной, Ю. И. Разоренов, А. В. Денисов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 9. – С. 35-40.

33. Зубков, А. В. Управление напряженным состоянием рудного массива при отработке этажно-камерной системой с закладкой крутопадающих мощных рудных тел / А. В. Зубков, О. Ю. Смирнов // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – № 1. – С. 43-47.

34. Изыскание бесцементных составов закладочных смесей и их опытно-промышленное испытание: отчет по договору № 34/1 / Магнитогорск: ЗАО Маггеоэксперт, 2005. – 76 с.

35. К обоснованию выбора и определению параметров геотехнологий добычи руд с учетом вида напряженно-деформированного состояния горных пород / А. М. Фрейдин, С. А. Неверов, А. А. Неверов, А. И. Конурин // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. – 2017. – Т. 4. – № 3. – С. 180-185.

36. Козырев, А. А. Об управлении напряженно-деформированным состоянием массива горных пород при проходке горных выработок в удароопасных условиях / А. А. Козырев, С. Н. Савченко // Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. – 2014. – Т. 17. – № 2. – С. 221-224.

37. Комащенко, В. И. Влияние структурных особенностей и физико-механических свойств массивов на качество взрывной подготовки руды и эффективность защиты окружающей среды / В. И. Комащенко, С. В. Анциферов, А. С. Саммаль // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2016. – № 3. – С. 190-203.

38. Коновалов, А. П. Закладочные работы на подземных рудниках и перспективы их совершенствования / А. П. Коновалов, В. В. Аршавский, В. И. Хуцишвили, Л. Н. Сорокина, С. В. Анфиногеев // Горный журнал. – 2001. – № 7. – С. 3–7.

39. Коновалов, А. П. Закладочные работы на подземных рудниках и перспективы их совершенствования / А. П. Коновалов, В. В. Аршавский, В. И. Хуцишвили, Л. Н. Сорокина, С. В. Анфиногеев // Горный журнал. – 2001. – № 7. – С. 3–7.

40. Красновский, А. А. Особенности напряженно-деформированного состояния крепи горных выработок при заполнении вывалов пород фенольными смолами / А. А. Красновский // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – Т. 2. – № 3. – С. 266-273.

41. Кривцов А.И. Термины и понятия отечественного недропользования: словарь-справочник / А.И. Кривцов, Б.И. Беневольский, В.М. Минаков, И.И. Морозов. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000. – 344 с.

42. Кузнецов, А. С. О проблеме управления напряженно-деформированным состоянием массива горных пород / А. С. Кузнецов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2002. – № 11. – С. 19-22.

43. Кузнецов, П. А. Определение масштаба моделирования / П. А. Кузнецов. - М., 1964.

44. Кузькин, В. И. Влияние техногенных процессов на инженерно-геологические и геоэкологические условия эксплуатации месторождений / В. И. Кузькин // Разведка и охрана недр. – 2016. – № 1. – С. 71-72.

45. Кузьмин, Е. В. Инъекционное упрочнение массива неустойчивых горных пород с предварительным торкретированием при подземной добыче руд / Е. В. Кузьмин, А. Р. Калинин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1999. – № 2. – С. 199-202.

46. Ливанова, Е. Ю. Инвестиционная привлекательность пользования недрами на территории Российской Федерации в контексте мирового рынка / Е. Ю. Ливанова // Власть. – 2014. – № 4. – С. 36-40.

47. Лизункин, В. М., Породобетонная закладка как фактор снижения себестоимости добычи и повышения экологической безопасности при выемке богатых урановых руд камерно-целиковыми системами разработки / В. М.

Лизункин, В. В. Медведев // Вестник Читинского государственного университета. – 2002. – Вып. 26. – С. 130–133.

48. Лис, С. Н. Самоорганизация горного массива при техногенных воздействиях на него / С. Н. Лис, Ж. П. Вареха // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 7. – С. 237-250.

49. Лисов, В. И. Некоторые аспекты развития минерально-сырьевого комплекса России в условиях модернизации экономики / В. И. Лисов; В. И. Лисов; Российский гос. геологоразведочный ун-т им. Серго Орджоникидзе. – Москва: ЦентрЛитНефтеГаз, 2011. – 467 с.

50. Мажитов, А. М. Определение параметров и показателей адаптивного варианта системы разработки с площадно-торцевым выпуском для условий отработки пологих залежей / А. М. Мажитов, Э. Ю. Мещеряков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013. – № 2(42). – С. 5-8.

51. Мажитов, А. М. Оценка влияния подземных горных работ на напряженно-деформированное состояние прикарьерного массива месторождения Камаганское / А. М. Мажитов // Актуальные проблемы горного дела. – 2016. – № 1. – С. 29-35.

52. Майоров, А. Е. Геомеханические аспекты консолидирующего крепления горных выработок / А. Е. Майоров // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2011. – № 3(84). – С. 41-44.

53. Майоров, А. Е. Технология инъекционной цементации нарушенной приконтурной зоны безврубловых перемычек горных выработок / А. Е. Майоров, Е. И. Нургалиев // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС 2016: сборник материалов XVI международной научно-практической конференции, Кемерово, 23–24 ноября 2016 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, 2016. – С. 185.

54. Малышев, М. В. Механика грунтов. Основания и фундаменты: учебное пособие / М. В. Малышев, Г. Г. Болдырев. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов – 2004. – 328 с.

55. Мальцева, И. А. Особенности управления геомеханическим состоянием массива горных пород при отработке кимберлитовых трубок Якутии / И. А. Мальцева // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2003. – № 12. – С. 18-20.

56. Матвеев, А. А. Исследование параметров трещинной структуры горных пород и породных массивов / А. А. Матвеев // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2012. – № 2. – С. 64-67.

57. Медведев, В. В. Обоснование эффективной технологии формирования породобетонной закладки при камерных системах разработки: с автореф. дис. ... канд. техн. наук. Чита, 2009. 19 с.

58. Медведев, В. В. Повышение эффективности закладочных работ при камерных системах разработки // Отдельный выпуск Горного информационно-аналитического бюллетеня. 2007. Вып. 4. С. 80–84.

59. Медведев, В. В. Совершенствование технологии закладочных работ при камерных системах разработки с закладкой / В. В. Медведев, В. В. Пакулов // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2013. – Вып. 10 (101). – С. 25–31.

60. Медведев, В. В. Совершенствование технологии закладочных работ при камерных системах разработки с закладкой / В. В. Медведев, В. В. Пакулов // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2013. – № 10(101). – С. 25-31.

61. Медведев, С. В. Сейсмика горных взрывов / С. В. Медведев. – М.: Издательство «Недра», 1964.

62. Метод одностадийной проходки восстающего при одновременном формировании отрезногокомпенсационного пространства / А. М. Мажитов, И.

А. Пыталев, Д. В. Доможиров [и др.] // Рациональное освоение недр. – 2022. – № 5(67). – С. 46-51.

63. Мещеряков, Э. Ю. Совершенствование способа управления состоянием прикарьерного массива при подземной разработке ценных руд: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.22 / Мещеряков Эдуард Юрьевич. – Магнитогорск, 1998. – 153 с.

64. Минаев, Д. Ю. Технология комбинированного восходяще-нисходящего порядка отработки крутопадающей рудной залежи Гундрового месторождения Кольской ГМК: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.22 / Минаев Дмитрий Юрьевич. – Санкт-Петербург, 2007. – 230 с.

65. Минеральные ресурсы Учалинского ГОКа И.В. Серавкин, П.И. Пирожок, Н.И. Знаменский и др. - Уфа, 1994.

66. Монтянова, А. Н. Формирование закладочных массивов при разработке алмазных месторождений в криолитозоне / А. Н. Монтянова. –М.: Издательство «Горная книга», 2005. – 597 с.

67. Мосинец, В.Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах. М.: Недра. 1976. 271 с.

68. Мосинец, В.Н. Исследование особенностей сейсмического действия взрывов на карьере со сложными горно-геологическими условиями / В.Н. Мосинец, Э.А. Григорьянц, А.И. Тетерин // Физ.-техн. Проблемы разработки полезных ископаемых. – 1977. – № 3. – С. 33-43.

69. Набатов, В. В. Управление напряженно-деформированным состоянием массива горных пород / В. В. Набатов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № 6. – С. 215-216.

70. Неверов, С. А. Типизация рудных месторождений с ростом глубины по виду напряженного состояния Ч. II. тектонотипы рудных месторождений и модели геосреды / С. А. Неверов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 3. – С. 25-34.

71. Нефедов, М.А. Определение эффективности дробления массива горных пород по данным анализа сейсмозрывных волн в зоне разрушения / М.А. Нефедов, В.П. Макарьев, Ю.И. Виноградов // Управление сейсмическим воздействием массовых взрывов в различных горно-геологических условиях. Киев: Наукова думка. – 1976. – С. 37-38.

72. Низаметдинов, Н. Ф. Особенности напряженного состояния массива горных пород / Н. Ф. Низаметдинов, В. Н. Долгоносов, О. В. Старостина // Труды университета. – 2009. – № 3(36). – С. 42-44.

73. Обоснование инвестиций ОАО «УГОК». Подземный рудник на базе месторождения «Озерное»: общая пояснительная записка. – Москва, 2007 – 34 с.

74. Обоснование технологических схем отработки месторождения с учетом техногенного преобразования / А. М. Мажитов, И. А. Пыталев, Е. В. Боровиков, Г. Д. Першин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2021. – № 4. – С. 5-14.

75. Определение физико-механических свойств руд и пород Учалинского подземного рудника / Отчет по НИР. М.: ИПКОН РАН, 1993.

76. Орлов, В. П. Проблемы оценки воспроизводства минерально-сырьевой базы / В. П. Орлов // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2010. – № 3. – С. 2-5

77. Орлов, В. П. Проблемы оценки воспроизводства минерально-сырьевой базы / В. П. Орлов // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2010. – № 3. – С. 2-5.

78. Основы технологии подземной разработки с закладкой / Д. М. Бронников, И. Ф. Замесов, Г. С. Кириченко и др. – М.: Наука, 1973. – 315 с.

79. Отчет по оценке южного фланга и глубоких горизонтов Сафьяновского медноколчеданного месторождения на среднем Урале с подсчетом запасов по состоянию на 01.01.2005г. за 1996-2004гг. (в 6 книгах). Книга 1. текст отчета. / Уральская Горно-Металлургическая Компания, ООО «Сафьяновская Медь-Медин». – Реж, 2005.

80. Оценка устойчивости бортов карьера "Камаган" при подземной доработке месторождения / А. М. Мажитов, С. А. Корнеев, И. А. Пыталев, Т. С. Кравчук // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № S4-2. – С. 205-215,

81. Оценка эффективности системы планирования на предприятиях горно - добывающей отрасли / Г. Н. Соколова, А. Б. Болатова, А. К. Турсунбаева, Е. В. Боровиков // Актуальные вопросы экономики и современного менеджмента: сборник научных трудов по итогам III международной научно-практической конференции, Самара, 11 апреля 2016 года. – Самара: Инновационный центр развития образования и науки, 2016. – С. 232-234.

82. Павлов, А. М. Влияние геологической среды на качество добываемой руды Коневинского месторождения / А. М. Павлов, Д. С. Васильев // Известия Сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2016. – № 4(57). – С. 83-90.

83. Патент РФ № 2003135134/03, 02.12.2003. Трушко В. Л., Огородников Ю. Н., Протосеня А. Г. Способ разработки мощных крутопадающих залежей слабых руд // Патент России № 2248448. 2005. Бюл. № 8.

84. Патент РФ № 2012112768/03, 02.04.2012. Дик Ю. А., Котенков А. В., Танков М. С., Минин В. В., Кульминский А. С., Арестов О. Ю. Способ разработки крутопадающих рудных тел с неустойчивыми рудами // Патент России № 2515285. 2014. Бюл. № 13.

85. Патент № 2723812 С1 Российская Федерация, МПК E21C 41/22. Способ разработки пологих и наклонных удароопасных рудных месторождений: № 2019136592: заявл. 13.11.2019: опубл. 17.06.2020 / Н. Г. Валиев, В. Х. Беркович, В. Д. Пропп [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уральский государственный горный университет".

86. Патент № 2796992 С1 Российская Федерация, МПК E21F 15/00. Способ разработки наклонных и крутопадающих рудных тел средней мощности: № 2022114953: заявл. 01.06.2022: опубл. 30.05.2023 / А. М. Мажитов, И. А. Пыталев, В. В. Якшина [и др.]; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Уфимский университет науки и технологий".

87. Пирогов, Г. Г. Подземные горнотехнические системы: техногенные воздействия на природную среду / Г. Г. Пирогов // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2019. – Т. 25. – № 4. – С. 13-20.

88. Практика совершенствования системы разработки горизонтальными слоями с гидрозакладкой при отработке крутопадающего жильного месторождения / Н. Г. Валиев, В. Х. Беркович, В. Д. Пропп, Е. В. Боровиков // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2020. – № 1. – С. 171-182.

89. Проект «Вскрытие и отработка глубоких горизонтов Сафьяновского месторождения» / ОАО Институт «Уралгипроруда». – Екатеринбург, 2013.

90. Проект опытно-промышленной отработки участка месторождения на стадии развития горных работ на Сафьяновском руднике / ОАО «Уралмеханобр». – Екатеринбург, 2015.

91. Проект разработки Юбилейного месторождения. Том 4. Усть-Каменогорск: «Казгипроцветмет», 2008. – 227 с.

92. Разоренов, Ю. И. Обоснование способов разработки системой подэтажных штреков в восходящем порядке / Ю. И. Разоренов, В. В. Скорин, Е. О. Лашин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 9. – С. 114-118.

93. Результаты поисковых и оценочных работ на флангах Озерного и Западно-Озерного медноколчеданных месторождений (Башкортостан) / А. В.

Чадченко, Е. А. Мустакимова, В. А. Крылатов [и др.] // Металлогения древних и современных океанов. – 2013. – № 1. – С. 29-31.

94. Рыльникова, М.В. Методы проектного финансирования инвестиционных технологий в сфере недропользования / М.В. Рыльникова, И.А. Пыталев, К.И. Струков, И.А. Трушина // Горный журнал. – 2018. – № 2. – С. 5-8.

95. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике. - М.: Наука, 1981. - С. 31. - 448 с.

96. Сентябов, С. В. Выбор методов управления горным давлением в горных конструкциях камерной системы разработки / С. В. Сентябов // Проблемы недропользования. – 2021. – № 1(28). – С. 73-80.

97. Скачков, М. С. Подземная разработка месторождений полезных ископаемых Норильского промышленного района: справочное пособие / М. С. Скачков. – Норильск: Норильский индустр. ин-т. – 2005. – 77 с.

98. Смирнов, А. А. Обоснование типов и методов адаптации горно-технологической системы горного предприятия к изменяющимся условиям подземной разработки / А. А. Смирнов, И. В. Никитин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2019. – № 6.

99. Соколов, И. В. Разработка и оценка вариантов стратегии освоения железорудных месторождений экологически сбалансированными подземными геотехнологиями / И. В. Соколов, Ю. Г. Антипин, А. А. Смирнов // Проблемы недропользования. – № 4. – 2015 г. – С. – 59-67.

100. Спивак, А.А. Перспективы и возможности применения подземных ядерных взрывов в геотехнологии / А.А. Спивак, Н.В. Перов, И.Л. Машковцев, С.Н. Деб // Вестник РУДН. сер. Инженерные исследования. – 2004. – № 2(9). – С. 113-124.

101. Способ разработки рудных месторождений. А. с. 1638302 СССР. / Шестаков В. А., Игнатов В. Н., Дулин А. Н., Хакулов В. А., Бозиев С А. О., Джамбаев Ф. М., Мещеряков Ю. А., Макоев А. С. – 1991. – № 12. – С. 4.

102. Способ создания днища блока при восходящем порядке разработки рудных месторождений: патент РФ № 2310075.

103. Способ формирования закладочного массива. Ермолович Е. А. Патент на изобретение RUS 2436962 12.04.2010.

104. Струков, К.И. Концепция развития горного предприятия на завершающей стадии освоения золоторудного месторождения / К.И. Струков, М.В. Рыльникова, И.Л. Никифорова // Горная промышленность. – 2018. – № 2(138). – С. 46-48.

105. Сулейманов, М. Г. Обоснование целесообразности применения инъекционной технологии. Свердловск, 1982 г. Межвузовский сборник, вып. 11.

106. Техническое перевооружение технологического процесса отработки запасов участка Сафьяновского месторождения в этаже -200/-270 м между разведочными линиями 0,5-2,0 (оптимизация параметров камерной системы разработки и порядка выемки запасов) / ОАО «Уралмеханобр». – Екатеринбург, 2016.

107. Технологический регламент по отработке Юбилейного месторождения подземным способом: пояснительная в записка. Книга 1. – Екатеринбург: ЗАО «Горный проектно-строительный центр», 2007. – 212 с.

108. Трушко, В. Л. Оценка устойчивости обнажений и расчет нагрузок на крепь выработок Яковлевского рудника / В. Л. Трушко, А. Г. Протосеня В. Ф. Плащинский // Записки горного института. – СПГГИ (ТУ), С-Пб. – 2006 г. Т. 168. – С. 115– 122.

109. Туртыгина Н.А. Анализ влияния природной и технологической изменчивости качества руды на показатели результирующего рудопотока // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 12. – С. 43–45.

110. Туртыгина Н.А. Сущность проблемы контроля и управления качеством руд на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 6. – С. 372–373.

111. Хайрутдинов, М. М. Бесцементные закладочные смеси на основе водорастворимых техногенных отходов / М. М. Хайрутдинов, Ч. Б. Конгар-Сюрюн, Ю. С. Тюляева, А. М. Хайрутдинов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 11. – С. 30-36.

112. Хайрутдинов, М. М. Подземная геотехнология с закладкой выработанного пространства: недостатки, возможности совершенствования / М. М. Хайрутдинов, И. К. Шаймярданов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – С. 240-250.

113. Хайрутдинов, М. М. Формирование разнопрочных закладочных массивов при разработке месторождений полезных ископаемых / М. М. Хайрутдинов, Г. А. В Карасев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – С. 276-283.

114. Хоменко, О. Е. Ресурсосберегающие технологии добычи руд на больших глубинах / О. Е. Хоменко, В. И. Ляшенко // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2018. – № 8. – С. 23-33.

115. Хомяков, В. И. Зарубежный опыт закладки на рудниках / В. И. А Хомяков. – М.: Недра, 1984. – 224 с.

116. Цой, А. Э. Препятствия на пути формирования российского рынка объектов недропользования и привлечения к нему иностранных инвесторов / А. Э. Цой // Недропользование XXI век. – 2013. – № 3(40). – С. 34-35.

117. Цыгалов, М. Н. Разработка месторождений полезных ископаемых механика с монолитной закладкой / М. Н. Цыгалов, П.В Зурков. –М.: Недра, 1970. – 176 с.

118. Черемушкин, С.В. Экономическая добавленная стоимость и затраты на капитал: рыночный и бухгалтерские подходы / Черемушкин С.В., Понкрашкина Г.А. // Управление финансами публичных компаний. – 2008. – № 6.

119. Чмыхалова, С. В. Перспективы развития рудно-сырьевой базы АО "Апатит" и способы её улучшения / С. В. Чмыхалова // Научные исследования: от теории к практике. – 2016. – № 4-1(10). – С. 103-106.

120. Шарф, И. В. Динамическая эффективность воспроизводственных процессов на ресурсодобывающих территориях / И. В. Шарф, А. А. Михальчук, И. В. Филимонова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 10. – С. 102-110.

121. Шеломенцев, А. Г. Формирование социально-экономической политики северных регионов России с учётом фактора освоения природных ресурсов : монография / А.Г. Шеломенцев, С.В. Дорошенко, О.А. Козлова, В.Н. Беляев [и др.]. Екатеринбург: Ин-т экономики УрО РАН, 2011. – 140 с.

122. Шумилин, М. В. Риски недропользования за рубежом и в России / М. В. Шумилин // Недропользование XXI век. – 2013. – № 1(38). – С. 40-44.

123. Юров, А. А. Обоснование параметров и порядка очистной выемки с учетом неравномерного распределения полезного компонента по мощности рудной залежи: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.22 / Юров Александр Александрович. - М., 2005. - 106 с.