

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова
Российской академии наук**

На правах рукописи

ЯКОВЛЕВ ИЛЬЯ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
ПОДЗЕМНОГО РУДНИКА ПРИ ОСВОЕНИИ ГЛУБОКОЗАЛЕГАЮЩИХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ С МОНОЛИТНОЙ
ЗАКЛАДКОЙ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА**

Специальности

2.8.7 – «Теоретические основы проектирования горнотехнических систем»

2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
профессор, доктор технических наук
М.В. Рыльникова

Москва 2025

Оглавление

Оглавление.....	2
Введение.....	5
Глава 1. Обобщение опыта и обоснование перспектив развития логистической архитектуры подземного рудника при подземной разработке с закладкой соляных месторождений.....	13
1.1. Систематизация технологических схем формирования монолитных закладочных массивов в практике освоения глубокозалегающих месторождений подземным способом.....	13
1.2. Специфика закладки выработанного пространства при освоении глубокозалегающих месторождений калийных солей, требования к составу и свойствам закладочных смесей.....	24
1.3. Особенности и параметры логистических схем подземного рудника при разработке соляных месторождений с использованием закладочных смесей с требуемыми характеристиками влажности, прочности, реологии.....	31
1.4. Методы обоснования параметров логистических схем закладки в подземных рудниках.....	38
1.5. Цель, задачи и методы исследования.....	49
Глава 2. Развитие научно-методических основ формирования логистической системы рудника при подземной разработке соляных месторождений с закладкой.....	54
2.1. Понятие логистической системы подземного рудника, ее структуры, функциональных особенностей и задач, классификация логистических схем ведения закладочных работ при разработке соляных месторождений.....	54
2.2. Методика определения параметров логистической схемы подземного рудника с закладкой.....	63
2.3. Математический аппарат расчета рациональных параметров логистической схемы подземного рудника с закладкой.....	74

2.4. Программа-методика опытно-промышленных исследований системы гидротранспортирования компонентов закладочной смеси в рудник Гремячинского ГОКа.....	82
Выводы по главе 2.....	88
Глава 3. Исследование параметров логистической системы закладки на подземном Гремячинском руднике.....	91
3.1. Концептуальные требования к логистической схеме закладочных работ рудника.....	91
3.2. Результаты исследования физико-механических свойств закладочной смеси с целью оценки её реологических характеристик при гидравлическом и конвейерном транспортировании в условиях подземных горных выработок.....	100
3.3. Исследование технологических параметров транспортирования закладочных материалов при цикличной логистической схеме.....	108
3.4. Исследование технологических параметров транспортирования закладочных материалов при циклично-поточной логистической схеме.....	116
3.5. Исследование технологических параметров транспортирования закладочных материалов при поточной логистической схеме транспортирования.....	125
3.6. Разработка алгоритма выбора логистической схемы закладочных работ.....	130
Выводы по главе 3.....	134
Глава 4. Разработка технологических рекомендаций по обоснованию параметров логистической системы Гремячинского рудника с закладкой и оценка ее экономического эффекта.....	138
4.1. Обоснование выбора горнотранспортного оборудования и рекомендации по режимам его эксплуатации.....	138
4.2. Расчёт и сравнительный анализ технико-экономических показателей вариантов логистической системы.....	147
4.3. Рекомендательная календарно-сетевая модель реализации поточной логистической схемы транспортирования закладочного материала и обоснование её технологических параметров.....	150
Выводы по главе 4.....	154

Заключение.....	156
Список литературы.....	158
Приложение А. Затраты на приобретение оборудования для цикличной логистической схемы транспортирования закладочного материала Гремячинского ГОКа.....	176
Приложение Б. Затраты на приобретение оборудования для циклично-поточной логистической схемы транспортирования закладочного материала Гремячинского ГОКа.....	177
Приложение В. Затраты на приобретение оборудования для поточной логистической схемы транспортирования закладочного материала Гремячинского ГОКа.....	179
Приложение Г. Эксплуатационные затраты для цикличной логистической схемы транспортирования закладочного материала Гремячинского ГОКа.....	180
Приложение Д. Эксплуатационные затраты для циклично-поточной логистической схемы транспортирования закладочного материала Гремячинского ГОКа.....	181
Приложение Е. Эксплуатационные затраты для поточной логистической схемы транспортирования закладочного материала Гремячинского ГОКа.....	183

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В условиях увеличения мирового спроса на калийные удобрения в связи с расширением объемов сельскохозяйственного производства возникает актуальная задача разработки новых высокоэффективных технологий ведения горных работ с повышением полноты извлечения калийных солей. Природные минеральные ресурсы России, особенно уникальные месторождения калийно-магниевых солей, представляют значительный экономический потенциал. Развитие техники и технологий добычи и переработки калийных солей основано на совершенствовании технологических комплексов, машин и оборудования, обеспечивающих повышение полноты извлечения запасов, безопасность, высокую степень механизации и автоматизации всех производственных процессов, что в сочетании с передовыми геотехнологическими решениями позволяет максимально эффективно использовать природные ресурсы при минимальном воздействии на окружающую среду. Это особенно важно для эксплуатации глубокозалегающих месторождений калийных солей, таких как Гремячинское месторождение в Волгоградской области, где сложные горно-геологические, геомеханические и горнотехнические условия определяют геотехнологические вызовы.

Исследования, проведенные в Институте проблем комплексного освоения недр Российской академии наук им. академика Н.В. Мельникова (ИПКОН РАН), показали, что традиционные для освоения соляных месторождений методы гидравлической закладки в данных условиях могут приводить к деградации междукамерных и барьерных целиков, разрушению пород почвы выработок, изменению физико-механических и деформационных свойств вмещающих пород под влиянием рассолов, ослаблению кровли горных выработок, изменению состояния рудничной атмосферы, что потенциально повышает риски аварий. В ответ на эти вызовы разработаны новые подходы к технологии закладки выработанного пространства, предусматривающие формирование монолитного консолидированного закладочного массива на основе солеотходов с добавлением

рассолов на границе влагоотдачи, что предопределяет необходимость совершенствования и оптимизации логистических систем подземных рудников для управления основными и вспомогательными минерально-сырьевыми потоками с обеспечением контроля и управления их качеством, в том числе потоков закладочных материалов и смесей.

Обоснование рациональных параметров процессов транспортирования закладочных материалов на большие глубины, включая доставку, перепуск, транспортировку, приготовление и укладку закладочной смеси, представляет собой сложную логистическую задачу и влечет сопутствующие риски на каждом звене технологической схемы. Эти аспекты подчеркивают важность инноваций в технологии и оборудовании для повышения эффективности и безопасности ведения закладочных работ.

Вопрос оптимизации параметров логистических систем подземных рудников, ведущих разработку глубокозалегающих месторождений калийных солей, с учетом особенностей горно-геологических, геомеханических и горнотехнических условий с обеспечением технико-экологических и экономических требований представляет актуальную научно-техническую задачу.

Целью работы является разработка методики выбора и обоснования параметров логистической системы калийного рудника, обеспечивающей требуемую производительность закладочного комплекса, надежность и эффективность его функционирования, безопасность горных работ.

При этом ключевыми задачами системы являются безаварийная эксплуатация транспортного комплекса, комплексов приготовления и доставки закладочных материалов и смесей в выработанное пространство подземных камер, в соответствии с требованиями промышленной и экологической безопасности при ведении подземных горных работ.

Идея работы заключается в повышении полноты и эффективности извлечения запасов и безопасности горных работ на основе применения в логистических схемах закладки на всех звеньях транспортирования горного оборудования, предпочтительно непрерывного действия, в совокупности не

изменяющего структуру солеотходов, не вызывающего повышенного пыления и обеспечивающего формирование монолитных закладочных массивов с требуемыми **прочностными и деформационными характеристиками**.

Достижение поставленной цели и реализация идеи связаны с решением следующих научно-практических **задач**:

- анализ мирового опыта и современных подходов к разработке и формированию логистической системы подземного рудника с учетом особенностей освоения глубокозалегающих месторождений калийных солей с закладкой выработанного пространства;
- анализ структуры логистической схемы и методов обоснования ее параметров с учетом требований к составу и свойствам закладочных смесей;
- классификации логистических схем закладки на подземном руднике и обоснование условий безопасного применения логистических схем различных классов;
- оценка факторов, определяющих параметры логистической схемы закладки при разработке глубокозалегающих калийных месторождений;
- разработка математической модели логистической схемы подземного рудника на основе исследованных физико-механических и технологических свойств закладочной смеси и формируемых закладочных массивов;
- разработка алгоритма выбора приоритетного варианта логистической схемы закладки подземного рудника;
- сравнительный анализ схем транспортирования закладочных материалов и смесей для формирования монолитного консолидированного закладочного массива и выбор предпочтительного для разработки Гремячинского калийного месторождения

Объект исследований: движение возвратных ресурсных потоков при формировании монолитного закладочного массива в подземных рудниках при освоении глубокозалегающих месторождений калийных солей с целью обеспечения требуемых прочностных, реологических и деформационных характеристик, а также повышения полноты извлечения запасов.

Предмет исследования: параметры логистической системы подземного рудника с формированием монолитных закладочных массивов при освоении глубокозалегающих месторождений калийных солей с учетом требований к прочностным, реологическим и деформационным характеристикам солеотходов.

Методы исследования: Анализ параметров производственно-организационной структуры рудника выполнен на основе проектной документации и инструментальных измерений с применением лазерного дальномера Leica DISTO D510 и маркшейдерской рейки Invar в соответствии с ГОСТ 26433.2-94. Оценка условий труда в подземных выработках осуществлялась по данным запыленности воздуха (пылеуловитель ПКА-01), температуры и влажности (термометры AR-360, гигрометры Venetech GM1362). Геологические факторы изучались через комплексную съемку нарушений, включая лазерное сканирование и визуальную фиксацию деформаций пород.

Физико-механические свойства солеотходов исследовались с определением влажности (метод высушивания), насыпной плотности (ГОСТ 32721-2014) и фракционного состава (мокрый ситовой анализ на машине EML 200). Уплотнение солеотходов исследовано на гидравлическом прессе Instron-300DX, склонность к консолидации – пенетрометрическим методом, а износостойкость оценивалась по методике проф. Л.И. Барона и А.В. Кузнецова. Угол естественного откоса определялся с использованием каретки УВТ-3 по методике РСН 51-84.

Расчетные методы включали определение параметров логистической системы закладочных работ, прогнозирование уплотнения солеотходов при перепуске, расчет критических скоростей падения в закладочном трубопроводе, и расчет режимов работы горного оборудования (скиповые установки, конвейеры, трубопроводы). На основе полевых и лабораторных данных разработан алгоритм выбора логистической схемы (ГОСТ 19.701-90), технико-экономическое сравнение вариантов логистических схем закладочных работ выполнено методом приведенных затрат. Рекомендательная календарно-сетевая модель реализации логистической схемы закладочных работ составлена в соответствии с ГОСТ Р 56716–2015 и методологией Numeric Schedule Levels.

Положения, выносимые на защиту:

1. При разработке глубокозалегающих месторождений калийных солей обоснование параметров рациональной логистической схемы закладки должно производиться на основе разработанной методики, особенностью которой является учет влажности смеси, влияния динамических нагрузок на физико-механические свойства солеотходов.

2. Прогнозирование физико-механических свойств солеотходов в ходе транспортирования в зависимости от влажности и динамических нагрузок должно проводиться на основе разработанной математической модели, которая позволяет учитывать процессы самоуплотнения материала, снижая риск его неравномерного осаждения и изменения реологических характеристик.

3. Оптимизация параметров вертикального трубопроводного транспорта закладочных смесей с применением разработанных демпферных устройств позволяет снизить динамические нагрузки на закладочный трубопровод и предотвратить преждевременную консолидацию солеотходов в бункерах-накопителях, что обеспечивает повышение надежности логистической системы рудника.

4. Обоснование логистической схемы закладочных работ при разработке глубокозалегающих месторождений калийных солей должно осуществляться на основе сравнительного анализа гидравлического, сухого и комбинированного способов транспортирования закладочного материала и смеси с применением средств механизации цикличного, поточного и циклично-поточного принципа действия по критерию минимума удельных энергетических и эксплуатационных затрат на перемещение в выработанное пространство 1 м³ закладочной смеси.

Научная новизна работы

1. Классификация логистических схем закладочных работ при освоении соляных месторождений, базирующаяся на способах транспортирования закладочных материалов и смесей, отличительной особенностью которой является учет специфики солеотходов для формирования монолитных закладочных массивов, глубины залегания месторождения, расстояния транспортирования, а

также расположения и типа модуля обезвоживания закладочной смеси, что позволяет выбрать средства доставки и укладки смеси для формирования консолидированного закладочного массива с учетом горнотехнических условий разработки месторождений водорастворимого минерального сырья.

2. Методика обоснования параметров рациональной логистической схемы закладки при разработке глубокозалегающих месторождений калийных солей, отличающаяся учётом влажности смеси, влияния динамических нагрузок на физико-механические свойства солеотходов и удельного энергопотребления на транспортирование закладочных материалов в выработанное пространство подземного рудника.

3. Математическая модель прогнозирования физико-механических свойств солеотходов в процессе их транспортирования, отличающаяся тем, что она учитывает процессы самоуплотнения закладочного материала, снижая риск его неравномерного осаждения и изменения реологических характеристик.

4. Методика оценки допустимой высоты одиночного перепуска без первичной консолидации $H_{\text{доп}}$ компонентов закладочной смеси по вертикальному трубопроводу, основанная на установленной зависимости относительных вертикальных деформаций сыпучих материалов от удельной компрессионной нагрузки при различной влажности W компонентов закладочной смеси (0,05 - 8 %) и количества демпферных гасителей N для предотвращения первичной консолидации солеотходов, выражающейся уравнением:

$$N(W) = \frac{H_{\text{общ}}}{6,64 \cdot W^2 - 90,58 \cdot W + 384,71} \cdot k_{\text{запаса}}.$$

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обусловлена обобщением предшествующих научных достижений в области проектирования логистических систем, представительным объемом исходных данных, достоверной сходимостью теоретических математических расчетов возвратных рудных потоков, результатами лабораторных исследований для уточнения параметров исходного моделирования, использованием современного вычислительного оборудования и апробированных методик, внедрением

результатов исследований в проектирование и планирование горных работ на глубокозалегающих калийных месторождения.

Практическая значимость работы состоит в обосновании предпочтительного варианта логистической схемы закладочных работ на Гремячинском руднике. В рамках исследования разработана циклично-поточная логистическая схема транспортирования закладочных материалов для глубокозалегающих месторождений калийных солей, включающая отдельную подачу обезвоженных солеотходов (влажность 0,05 %) и соляных растворов через модульный закладочный комплекс. В составе схемы обосновано применение конических демпферных устройств с двухслойным износостойким покрытием, системы пневматической продувки для предотвращения закупорки бункеров-накопителей и алгоритма регулировки давления воздуха в вертикальном трубопроводе, что обеспечивает производительность до 446,17 м³/ч.

Реализация результатов. Основные положения диссертационной работы использовались в проектных решениях выбора логистической системы рудника в практике отработки Гремячинского месторождения калийных солей.

Апробация работы. Основные результаты, положения и выводы докладывались и обсуждались на X Международной научной конференции молодых ученых «Молодые - Научкам о Земле» (Москва, 2022); на Международной научной школе академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» (Москва, 2022, 2024); на Международном симпозиуме «Неделя горняка» (Москва, 2023); на XIX Международной научно-практической конференции «Молодёжь и наука» (Нижний Тагил, 2023); на XII Международной конференции «Комбинированная геотехнология: комплексное освоение техногенных образований и месторождений полезных ископаемых» (Магнитогорск, 2023), на XI Российско-Китайской международной конференции «Проблемы нелинейной геомеханики на больших глубинах» (Новосибирск, 2023).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 11 работах, 5 из которых – в изданиях, рекомендуемых ВАК.

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач исследования и определении путей их решения, в формулировании идеи для достижения поставленной цели, определении основных параметров, позволяющих сформировать логистическую систему ведения закладочных работ на калийном руднике с учетом определяющих условий и факторов, а также вида закладочных материалов и смесей.

Объем и структура работы. Диссертация представлена на 175 страницах, состоит из введения, 4 глав, заключения и содержит 39 рисунков, 24 таблиц, список источников из 145 наименований.

Глава 1. ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТА И ОБОСНОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ АРХИТЕКТУРЫ ПОДЗЕМНОГО РУДНИКА ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ С ЗАКЛАДКОЙ СОЛЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

1.1. Систематизация технологических схем формирования монолитных закладочных массивов в практике освоения глубокозалегающих месторождений подземным способом

В современной горнодобывающей практике безопасность и эффективность горных работ являются ключевыми приоритетами, а устойчивость горных выработок играет критически важную роль в обеспечении безопасности горных работ. Обеспечение устойчивости подработанного массива горных пород, минимизация деформаций земной поверхности и охраняемых объектов, а также управление горным давлением и снижение вероятности возникновения и развития аварий, таких как обрушение, подземные пожары и внезапные выбросы угля или газа обеспечивается путем возведения в выработанном пространстве подземного рудника закладочных массивов с требуемыми прочностными и деформационными характеристиками [60].

Применение монолитных закладочных массивов с заданными прочностными характеристиками становится особенно актуальным при разработке месторождений солей подземным способом на глубинах свыше 1 км, где требуется обеспечение максимальной надежности поддержания горных выработок и особый контроль за состоянием горного массива. На таких глубинах критически важно контролировать и управлять горным давлением, что требует создания монолитных закладочных массивов, способных выдерживать нагрузки на всех стадиях ведения горных работ и предотвращать деформации контура выработанного пространства. Формирование закладочного массива на основе солеотходов позволяет не только снизить экологическую нагрузку на окружающую среду за счет утилизации отходов добычи, но и значительно повышает экономическую эффективность горнодобывающего производства за счет сокращения потерь полезных ископаемых [49]. Монолитные закладочные массивы представляют собой интегрированную

часть современных горнодобывающих геотехнологий, обеспечивающих устойчивость и безопасность подземных работ. В работах Галченко Ю.П. и Айнбиндера И. И [30, 52] предложена систематизация монолитных закладочных массивов по способу их формирования, в соответствии с чем технология закладки подразделяется на: льдопородную, твердеющую, бутобетонную, инъекционную, гидравлическую, и консолидированную закладки.

На зарубежных и отечественных предприятиях накоплен значительный опыт применения льдопородной закладки [125, 3, 129]. В работе [97] описан опыт применения усовершенствованной технологии возведения льдопородной закладки на руднике «Бадран» ЗАО «Горнорудная компания Западная». При закладке камер, расположенных в мерзлых породах, после размещения в камере пустой породы, в выработанное пространство подаётся вода в количестве 11-23% от ее объема. Для транспортирования льдопородной закладки применяется трубопроводный транспорт. Так как источники подачи воды изнутри горного массива отсутствуют, вода для закладочных работ подаётся с поверхности по трубопроводу и распределяется по горизонтальным и наклонным выработкам через прорезиненные рукава. Полученная закладочная смесь из породы и воды тщательно перемешивается скреперной установкой до состояния шуговой смеси.

Промышленное внедрение метода льдопородной закладки в значительных объемах было осуществлено при эксплуатации рудника № 3/6 на территории Норильского горно-металлургического предприятия [109]. Образование ледяных массивов происходило при поддержании штатного вентиляционного режима и использовании естественных температурных условий внутри камер, где летом фиксировалось около $-2,5^{\circ}\text{C}$, а зимой температурные значения снижались до -6°C , при среднегодовых показателях в диапазоне от -4 до -5°C . Для реализации технологии в тупиковое пространство регулярно подавали водные массы с поверхности, приближая температуру жидкости до $0,5-1^{\circ}\text{C}$ и создавая оптимальные условия для постепенного формирования ледяной породы внутри резервуаров, организованных перемычками. Замораживание происходило через

специальные отверстия в стенках камер, а общий процесс не требовал внесения изменений в систему проветривания шахты (рис. 1.1).

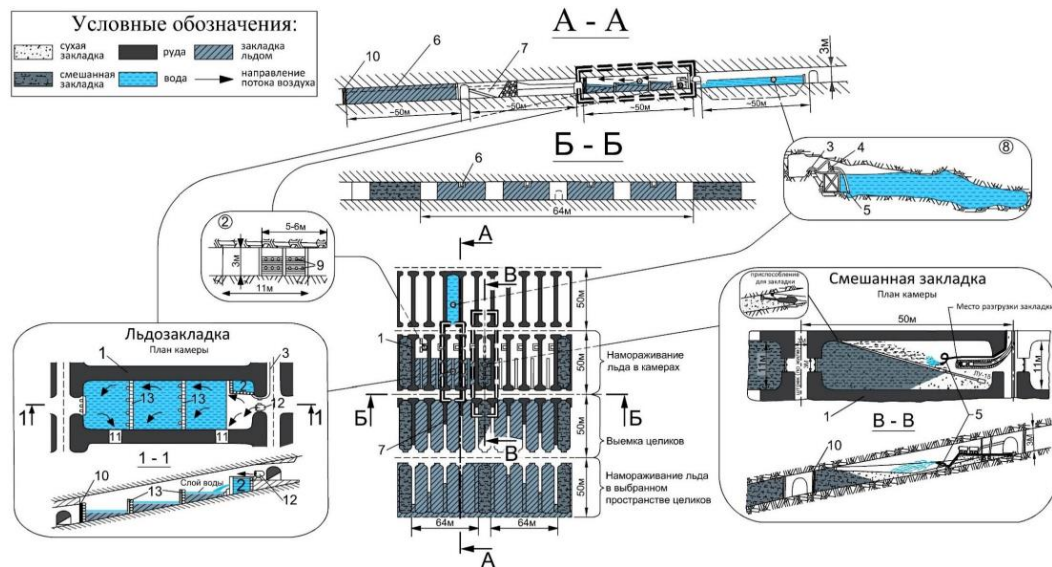


Рисунок 1.1 - Технологическая схема организации работ по закладке выработанного пространства: 1 - рудные целики; 2 - распределительный бассейн в камере (объем 50 м^3); 3 - водопровод; 4 - центробежный насос; 5 - водозаборный шланг; 6 - вентиляционный канал; 7 - выемка межкамерного целика; 8 - камера-бассейн (объем до 1000 м^3); 9 - отверстия ($d = 4\text{-}6 \text{ мм}$); 10 - водонепроницаемая перемычка; 11 - сбойка; 12 - вентилятор; 13 - ограждение из досок.

Петров А.Н и Петров Д.Н в работе [98] подчеркивают ограниченность применения льдопородной закладки от климатических факторов, так как для формирования закладочного массива требуются низкие температуры, которые возможно достичь естественным методом за счет сезонного снижения температур, либо формированием искусственных низких температур. Другим немаловажным фактором, при формировании льдопородного массива, является значение нормативной прочности на одноосное сжатие, которое не превышает $3,0 \text{ МПа}$. Продолжительность естественного промерзания заложенных первичных камер составляет 4 - 8 месяцев. И также существенным минусом является ограниченность применения при разработке месторождений водорастворимых полезных ископаемых.

В практике ведения закладочных работ используются твердеющие смеси с крупным наполнителем, а также с мелким наполнителем, формируемые литым способом. Смеси с крепким крупным наполнителем обеспечивают высокую

прочность создаваемого твердеющего массива, но требуют значительного расхода дорогостоящего вяжущего цемента [38, 50, 54, 71, 95]. Существенно осложняет транспорт таких смесей в подземных условиях: опасность закупорки, износа трубопроводов и отказов в системе гидротранспортирования [59, 39, 82].

На зарубежных и отечественных предприятиях накоплен значительный опыт применения твердеющей закладки [2, 25, 63, 20, 24]. Твердеющая закладочная смесь представляет собой смесь инертных материалов (песок, отсев, дробленая порода) с вяжущими веществами (цемент, известь, шлаки, золы) и водой. Ключевым технологическим параметром для твердеющего закладочного массива является его прочность на одноосное сжатие, которую необходимо достичь в установленный срок.

В исследовании [124] описана технологическая схема приготовления закладочной смеси для формирования твердеющего монолитного закладочного массива на Гайском руднике (рис.1.2).

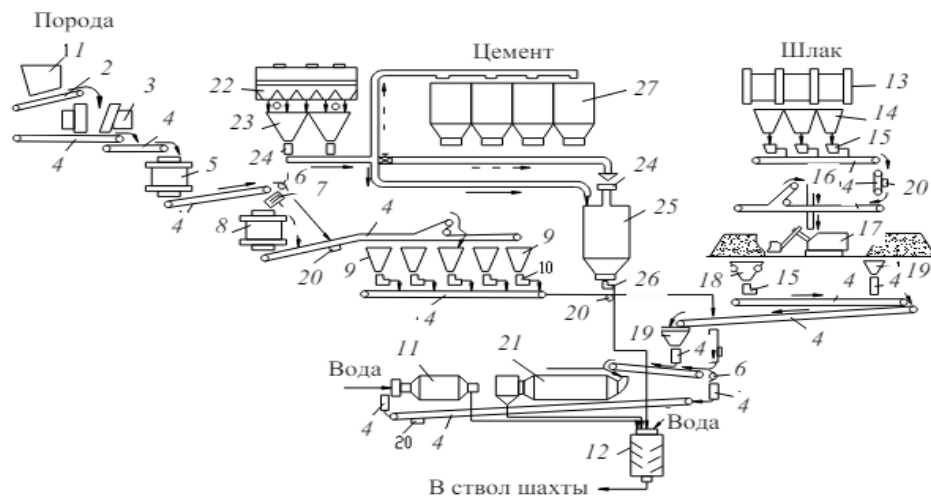


Рисунок 1.2 - Технологическая схема приготовления закладочной смеси на комплексе № 2: 1 – приемный бункер дробильного отделения; 2 – питатель пластинчатый; 3 – дробилка шнековая; 4 – конвейер ленточный; 5 – дробилка конусная; 6 – шибер; 7 – грохот инерционный; 8 – дробилка конусная; 9 – приемные бункера дробленой породы; 10 – дозатор породы; 11 – мельница стержневая; 12 – смеситель гравитационный; 13 вагоноопрокидыватель; 14 – приемные бункера шлака; 15 – питатели качающиеся; 16 – штабелеукладчик; 17 – экскаватор; 18 – бункер приемный самоходный; 19 – бункер-накопитель; 20 – весы; 21 – мельница шаровая; 22 – хопер-цементовоз; 23 – бункер-накопитель цемента; 24 – пневмобетонасосы; 25 – емкость для цемента; 26 – дозаторы цемента; 27 – склад цемента.

Закладочную смесь подают в камеры с вышележащего горизонта или с поверхности по вертикальным трубопроводам. Смесь поступает с фланга камеры и укладывается слоями. Дозакладку ведут через трубы или скважины, подводящие раствор к высшей точке купола. Производительность закладочной установки ограничивается производительностью узла помола шлаков. Качество раствора контролируют в лаборатории.

Важным фактором при формировании твердеющего закладочного массива является подбор состава закладочной смеси и обеспечение его стабильности на всем маршруте транспортирования.

Значительные усилия в работах [32, 112] посвящены подбору состава твердеющей смеси и изучению их реологических свойств; выбору соотношения жидкой и твердой составляющих смеси, а также методам приготовления твердеющих закладочных смесей с использованием в качестве заполнителя отсева доменного металлургического шлака, фракции 0-5 мм, без предварительной технологической подготовки (например, отсева после промывки, помола и т.д.). Используемые в настоящее время специально подготавливаемые для закладочных работ материалы (щебень, песок, гравий, цемент) характеризуются достаточно высокой стоимостью. Их применение снижает конкурентоспособность и ограничивает область использования систем разработки с твердеющей закладкой при добыче руд не высокой ценности [67, 82, 132].

Достаточно перспективным способом закладки является полураздельный – бутобетонный метод возведения твердеющих закладочных массивов, предусматривающий смешение компонентов, преимущественно пустой породы и цементного молочка в процессе укладки непосредственно в выработанном пространстве, либо перед сбросом в выработанное пространство. Использование пустых пород в комплексе с цементирующим материалом позволяет не только обеспечить безопасность процесса ведения горных работ за счет снижения негативного влияния процессов сдвижения горных пород при подработке, но и снизить площади, занимаемые под отвалы отходами, выдаваемыми на поверхность. Наиболее известными рудниками за рубежом, использующими бутобетонную

закладку, являются австралийские рудники: «Cosmos» и «The Ballarat Gold Project» [18, 17].

В работе [83] рассмотрена технологическая схема доставки и приготовления бутобетонной закладки в шахтных условиях. Согласно схеме (рис. 1.3), цемент с промплощадки подземного рудника доставляется до специально пройденного зумпфа в горных выработках.

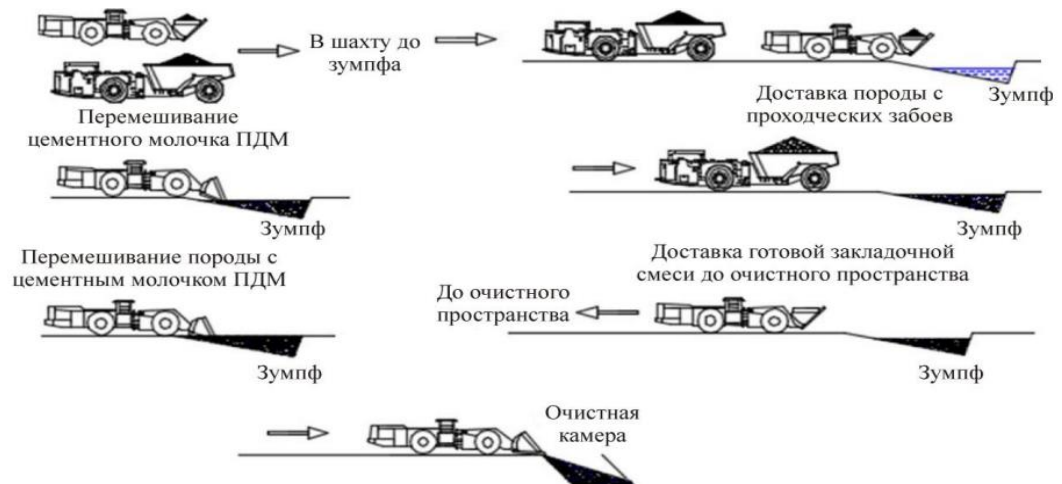


Рисунок 1.3 - Технологическая схема приготовления бутобетонной закладочной смеси на руднике.

Далее производится перемешивание цемента с водой при помощи погрузочно-доставочной машины (ПДМ). Со склада или с действующих проходческих забоев пустая порода до зумпфа доставляется самосвалами или ПДМ. Порода, выгруженная в зумпф, перемешивается с цементным раствором при помощи ПДМ. Далее готовая закладочная смесь посредством ПДМ доставляется к подготовленной для заполнения открытой камере.

В альтернативном варианте, согласно технологии, представленной в работах Аллабердина А.Б [85, 31], заполняют лишь участки, граничащие со смежными блоками, а в оставшуюся часть эксплуатационного блока подают породную закладку. Равномерное формирование уплотненного породного штабеля осуществляется, используя автосамосвал, оборудованный метателем сыпучего материала. Автор отмечает, что привлекательность бутобетонной закладки обусловлена отсутствием необходимости строительства закладочного комплекса и простотой изготовления закладочной смеси в подземных условиях, а также

минимальным расходом воды, что имеет большое значение для снижения относительной влажности рудничной атмосферы. Однако сложная механизация работ ограничивает область ее применения.

При технологии скважинной закладки, которая противопоставляется твердеющим и бутобетонным способам, процесс начинается с заполнения выработанного пространства сухим материалом, чаще всего мелкофракционной или самообрушенной породой. На следующем этапе через трубопроводы с поверхности вводится цементный раствор, свойства которого позволяют проникать в межзерновое пространство, после чего происходит формирование монолита за счет связывания породы в единый массив.

В исследовании Айнбиндера И.И. и Пацкевича П.Г. [29] описан опыт применения скважинной закладки выработанного пространства на рудниках компании Норникель. Для подачи закладочной смеси используются специальные скважины или стволы, выделенные для этих целей (рис. 1.4). Например, в Таланахском кластере Норникеля насчитывается 34 ствола разного назначения, обслуживающих 6 рудников.

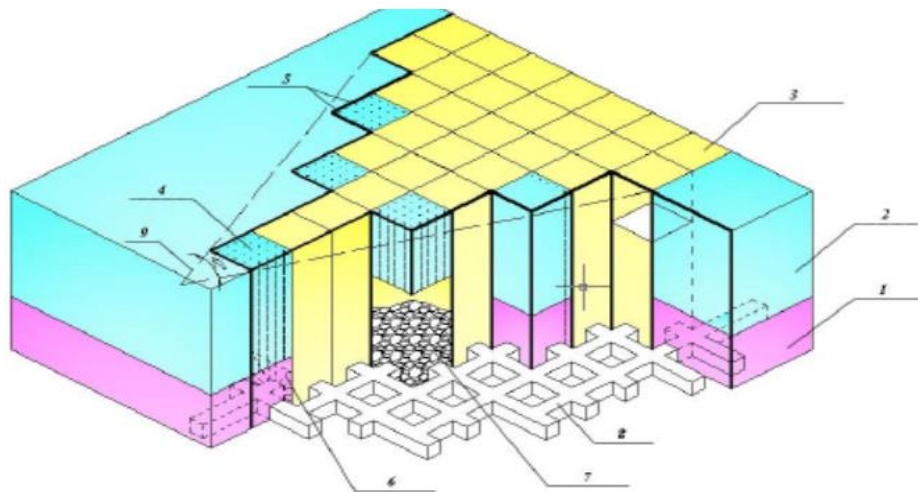


Рисунок 1.4 - План горных работ при отработке ударопасных участков со скважинной закладкой. ГМК «Норникель» 1- горизонт выпуска; 2- руда; 3- закладка; 4- вертикальная скважина; 5 - обуренный блок (блок, подготовленный к отбойке); 6 – веерные скважины; 7 - отбитая руда; 8 – откаточные выработки; 9 – фронт развития горных работ.

Одним из ключевых факторов при использовании вертикальных трубопроводов для перемещения закладочного материала является обеспечение и

увеличение дальности его транспортирования за счет создания давления вертикального столба под действием собственной силы тяжести.

В работе, выполненной группой ученых из ИГД им. Н.А. Чинакала СО РАН [126] для условий рудника «Октябрьский» предложено использование гидродинамических активаторов для управления текучестью различных типов закладочных смесей (расход, вязкость, напряжение сдвига), что позволило увеличить дальность её транспортирования подземным трубопроводом до 3,5 км. Однако метод имеет ряд ограничений: он эффективен только для шахтных полей площадью до 3-4 км² из-за высокого расхода цементного молочка (до 40% от объёма смеси) и ряда технологических и экономических факторов. Для крупных месторождений (свыше 4 км²) рекомендовано гидротранспортирование: пульпа подаётся через вертикальный ствол и по кровле выработок, где давление создаётся за счёт разницы высотных отметок начала и конца трубопровода, обеспечивая доставку материала на значительные расстояния [34, 77].

На одном из самых производительных подземном цинковом руднике «Garpenberg» (Швеция) [5] с переходом на более глубокие горизонты добычи с 800 м на 1250 м возникала необходимость в использовании закладочных смесей с большей нормативной прочностью для предотвращения обрушений пород и закладочного массива. Увеличение содержания цемента в смесях вызвало значительное удорожание добычи и увеличило время на закладочные работы. Похожая комбинация проблем проявилась при добыче медно-никелевой руды на месторождении «Kidd Creek» (Канада). Только в отличие от первых двух рудников, увеличение глубины включало в себя разработку трех дополнительных производственных уровней и углубление ramпы уже с уровня 2700 м до 2900 м, что вызывало проблемы с горным давлением и водоотведением при закладочных работах.

Кроме того, следует иметь в виду, что применение закладки при добыче полезных ископаемых сопряжено со строительством закладочных комплексов, требующих значительных финансовых затрат, а также с усложнением технологической схемы процессов добычи полезных ископаемых [128].

Важно, что большая доля в стоимости закладочных работ приходится на транспортирование закладочной смеси в выработанное пространство. Развитие горных работ приводит к удалению (углублению) места укладки смеси от места приготовления и, соответственно, к увеличению длины транспортирования. Так, по данным исследований [115, 116], проведённых на Бурибаевском ГОКе (Башкортостан), развитие горных работ привело к удалению места очистной выемки от закладочного комплекса на 2,5–3 км. Такое удаление сделало неэффективным и нецелесообразным применение системы с закладкой на данном руднике.

Де Соуза и соавторы [61] отметили, что горнодобывающая компания может потреблять до 100 000 тонн цемента в год. Следовательно, есть веская причина для любой попытки снизить содержание связующего, хотя бы на 1%. Помимо большого углеродного следа, связанного с производством цемента, из-за высоких затрат на транспортировку его до места добычи, цемент, даже в небольших дозах, увеличивает затраты на закладку выработанного пространства на 3–6%. Как видно из приведенного анализа, применение технологий с закладкой связано с существенными затратами и эффективно, как правило, при разработке глубоких и сверхглубоких месторождений полезных ископаемых. Применение природного и техногенного сырья, образующегося непосредственно на месторождении или в ходе производства, способствует значительному снижению расходов, связанных как с выполнением закладочных операций, так и с поддержанием инфраструктуры для складирования отходов, что, в свою очередь, позволяет сократить площади земель, вовлекаемые в горный отвод.

В применении технологии консолидационной закладки наибольший интерес представляет способ, при котором образование монолитной структуры осуществляется за счет обработки сухого закладочного материала, предварительно размещенного в очистном пространстве, паровыми или химически активными растворами, минуя использование цементного вяжущего. Воздействие реагентов на породу приводит к процессам перекристаллизации и формированию уплотненной массы непосредственно в пределах выработанного объема через

определенный временной интервал. Метод консолидированной закладки, хотя изначально не получил широкого применения из-за его высокой стоимости в условиях разработки твердых полезных ископаемых, прошел трансформацию в метод искусственного упрочнения горных пород вокруг выработок за счёт создания сверхпрочных экранирующих слоев, которые обеспечивают дополнительную поддержку и стабилизацию горных выработок.

Способ химического укрепления пород заключается в нагнетании закрепляющего состава на основе различных смол в законтурный массив через заранее пробуренные скважины. Эффективность применения полимерных составов для повышения устойчивости трещиноватых пород определяется прочностью адгезионной связи пограничного слоя «полимер — горная порода». В наибольшей мере этому требованию удовлетворяют эпоксидные смолы. Преимуществом химических растворов является их высокая способность проникновения в трещины с раскрытием до 0,01 мм. В то же время, высокая стоимость химических материалов, а в ряде случаев их токсичность, сдерживают применение этого универсального и эффективного способа в шахтном и гидротехническом строительстве [131, 62]. С целью преодоления указанных недостатков институтом Бергбау-Форшунг (Эссен, ФРГ) разработан способ укрепления угля и вмещающих пород нетоксичными полиуретановыми смолами [103].

Исследования в области формирования консолидированных закладочных массивов получают в последние годы все большее развитие, так в ИПКОН РАН была выдвинута идея [106, 107, 42] формирования монолитного консолидируемого закладочного массива на основе солеотходов уменьшенной влажности до 8-10%. Это предложение основано на анализе технологических свойств таких солеотходов. Было выявлено, что при затворении водой солеотходов, включая шламы, происходит повторная кристаллизация массива за счёт химических реакций между компонентами смеси, что приводит к формированию образцов с прочностью на одноосное сжатие до 5 МПа. При такой влажности расход затворителя составляет 280 кг/м³. Смесь обезвоженных солеотходов, увлажненная

методом разбрызгивания рассола и подвергнутая механическому воздействию, уплотняется на более чем на 40% от первоначального объема. Однако, для создания такого массива на калийном месторождении требуется дополнительное развитие логистических систем рудника. В работе [108] отмечено, что сформированный таким образом закладочной массив обладает достаточно высокими прочностными характеристиками, которые сохраняются при длительном объемном нагружении налегающими породами, также отмечается необходимость разработки нового (или подбора адекватного) технологического оборудования, способного смешивать, транспортировать и укладывать увлажненные солеотходы в очистном пространстве отработанных камер.

Анализ литературных источников показал, что эффективные технологии утилизации отходов рассматриваются в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, а также в патентах. Однако, большинство работ связано с изучением и выбором оптимальных и экономичных компонентов закладочной смеси на основе переработки отходов пиро- и гидрометаллургических производств, а также с использованием цемента и его производных в качестве вяжущих.

В современной научной литературе недостаточно освещена тема использования монолитной твердеющей закладки на основе солеотходов. Патентная активность в части технологий транспортирования и подбора эффективной цепи аппаратов на горных предприятиях весьма низкая, особенно при выборе технологии транспортирования компонентов смеси во взаимосвязи с характеристиками материалов. Отсутствуют работы, в которых приводятся результаты исследования параметров логистической системы глубокозалегающего рудника при формировании закладочного массива.

Имеющиеся патенты в области формирования монолитного закладочного массива на основе обезвоженных материалов не поддерживаются заявителями, что свидетельствует о том, что ранее запатентованные технологии не были внедрены на горных предприятиях мира, из-за отсутствия рационального способа их транспортирования смесей и, как следствие, формирования закладочного массива. Это указывает на необходимость дальнейших исследований и разработки новых

методов, которые обеспечат эффективное и экономически целесообразное использование данных технологий в горнодобывающей промышленности. В частности, требуется детальная проработка логистических схем и параметров транспортных систем для обеспечения стабильности и целостности закладочного массива, его несущей способности. Особое внимание следует уделить специфике закладки выработанного пространства при освоении глубокозалегающих месторождений калийных солей, требованиям к составу и свойствам закладочных смесей в контексте логистической схемы рудника, подбору цепи аппаратов для обеспечения безопасности, надежности и устойчивости ведения закладочных работ.

1.2. Специфика закладки выработанного пространства при освоении глубокозалегающих месторождений калийных солей, требования к составу и свойствам закладочных смесей.

Специфика закладки выработанного пространства при освоении месторождений калийных солей, а также требования к составу и свойствам закладочных смесей, в первую очередь, обусловлена особенностями залегания соляного пласта и применяемыми методами разработки калийных месторождений, которые являются логическим следствием уникальных геологических и технологических условий, характерных для них.

Основной особенностью разработки калийных месторождений, и, как следствие, ведения закладочных работ, является необходимость сохранения и исключения деформаций водозащитной толщи (ВЗТ) [70]. Эта толща играет критически важную роль в предотвращении проникновения вод в промышленные пласты, что обеспечивает сохранность соляных пластов, безопасность горных работ и защиту экологической обстановки в районе добычи и укладки в отработанные очистные камеры требуют особого подхода.

Анализ статистики катастрофических прорывов вод и рассолов в выработки калийных рудников показывает, что за последние 100 лет в мире такие случаи

фиксировались в среднем раз в 3-5 лет, в России и странах ближнего зарубежья – раз в 10-20 лет (табл.1.1) [77].

Таблица 1.1 - Хронология аварий на калийных рудниках России

Год аварии	Рудник	Тип залежи	Происшествие
1979	Соль-Илецкий рудник № 1	Купольное	Затопление
1986	БКРУ-3	Пластовое	Затопление
1995	СКРУ-2	Пластовое	Обрушение
2006	БКРУ-1	Пластовое	Затопление
2014	СКРУ-2	Пластовое	Прорыв надсолевых вод

Анализ мировой практики [40, 14] свидетельствует о серьёзных последствиях затопления калийных рудников, связанных с формированием техногенных водопроводящих каналов в результате подработки водозащитной толщи. Более 80 соляных рудников, включая три объекта на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей, были затоплены и не подлежали восстановлению. Это привело к потере до 50% калийных предприятий в мире до окончания срока их эксплуатации. Неконтролируемое затопление, вызванное прорывом рассолов, ведет к экологическим катастрофам, потере запасов полезных ископаемых и значительному экономическому ущербу. Управление состоянием подработанного массива посредством закладки выработанного пространства во всем мире признано эффективным средством для снижения риска возникновения водопроводящих каналов и предотвращения затопления подземных соляных рудников.

Главной особенностью природных минеральных солей, определяющих способ их разработки, является высокая растворимость в воде и неконцентрированных рассолах. При разработке калийных и магниевых месторождений солей подземным способом главным требованием является исключение попадания воды и рассолов в горные выработки, вследствие чего участки ведения горных работ должны быть изолированы от водоносных или рассольных горизонтов достаточной по мощности и устойчивости водоупорной защитной толщей [145]. При разработке Гремячинского месторождения минимальная мощность ВЗТ принята 60 метров [87].

Недропользователи вынуждены снижать коэффициент извлечения солей до обоснованных пределов (в ряде случаев до 30 %) и применять щадящую технологию разработки короткими забоями с оставлением рудных целиков для сохранения безопасных условий подработки водозащитной толщи [69].

Кроме того, одной из осложняющих проблем является нарушенность геолого-структурного строения подрабатываемых горных пород, наличие на подрабатываемых территориях охраняемых объектов [114].

Авторами [141] рассмотрена специфика разработки Непского месторождения, которое осложнено наличием более 10 водоносных горизонтов, часть из которых - напорные. На глубине 750-1000 м присутствует региональный водоупор, представленный ангидритами, формирующими водозащитную толщу. Отмечено, что в ходе отработки месторождения даже камерными системами, в соляной толще и междукамерных целиках могут возникать критические напряжения с последующим образованием трещин. На глубинах свыше 1000 метров каменная соль начинает проявлять повышенную текучесть. Несмотря на то, что по своему типу соли Калининградской области относятся больше к «Хартзальцам», результаты геомеханического моделирования в динамике развития деформаций показывают скорости смещения кровли одиночной выработки за 1 год – 97.23 мм; за 5 лет – 122 мм; за 10 лет – 155 мм; за 20 лет – 253 мм. Подобные деформации приводят к конвергенции стенок очистных камер, проседанию массива, а возможные трещины имеют свойства прогрессировать в направлении водозащитной толщи и представлять угрозу для ее целостности.

В исследованиях состава закладочной смеси [11, 28] было подробно изучено влияние различных способов ее приготовления, содержания гипса и соотношения жидкости к твердому на процесс твердения, а также на свойства смешанных гипсомагнезиальных вяжущих материалов, предназначенных для отработки с закладкой месторождений в соляных районах. Исследования показали, что оптимальное соотношение Ж:Т в составе закладочной смеси составляет 0,45:1, при этом достигается наилучшее сочетание ее пластичности и времени схватывания. При содержании гипса 20% от общей массы закладочной смеси происходило

увеличение начальной прочности вяжущего материала на 30% по сравнению с контрольными образцами. В ходе экспериментов было выявлено, что введение пластификаторов в состав смеси уменьшает время начала твердения на 15%, что критически важно для оперативной закладки выработанного пространства. Также было обнаружено, что добавление наполнителей, таких как мелкоизмельченный кварц и баритовая мука, увеличивает тиксотропные свойства смеси, обеспечивая более высокую устойчивость к сегрегации компонентов под действием вибрации и других динамических нагрузок в процессе гидротранспортирования смеси.

В мировой практике ведения горных работ в последнее время произошли изменения, сказавшиеся на проектировании и строительстве подземных рудников по добыче калийных солей. Как показывает статистика (таб.1.2), глубина разработки вновь вводимых в эксплуатацию калийных месторождений неуклонно растет и уже достигла 1200 метров. Это связано с тем, что лицензионные участки рудников с благоприятными геологическими условиями во многих случаях уже отработаны или введены в эксплуатацию. В связи с этим в разработку вовлекаются месторождения со сложными горно-геологическими условиями, располагающиеся на больших глубинах, что вызывает усложнение технологии ведения горных работ. В данный момент добыча калийных солей в России ведется подземным способом на уникальных сверхкрупных месторождениях – Верхнекамском и Гремячинском, Нивенском, планируется введение в эксплуатацию месторождений в Саратовской области и Ново-Гремячинского, расположенного в непосредственной близости от Гремячинского и залегающего на 200 м глубже.

В таблице 1.2 приведена информация о месторождениях калийно-магниевых солей России, распределение их по крупнейшим горным компаниям, глубине разработки и срокам введения в эксплуатацию. Часть месторождений в настоящее время не введены в эксплуатацию в связи с особо сложными условиями разработки и отсутствием эффективных технологий добычи минерального сырья в этих условиях.

Таблица 1.2 - Характеристика разрабатываемых калийных месторождений России

Участок	Компания владелец	Статус	Глубина разработки, м	Год начала разработки
Верхнекамское месторождение				
Ново-Соликамский	ОАО «Уралкалий»	Осваивается	450	1932, 2014
Соликамский	ОАО «Уралкалий»	Осваивается	349-385	1931
Дурыманский	ОАО «Уралкалий»	Осваивается	345	1970
Быгельско-Троицкий	ОАО «Уралкалий»	Осваивается	320	1987
Балахонцевский	ОАО «Уралкалий», АО МХК «ЕвроХим»	Осваивается	474-548	2011
Березниковский	ОАО «Уралкалий»	Осваивается	250-320	1954
Усть-Яйвинский	ОАО «Уралкалий»	Не осваивается (строится)	422-522	2023
Палашерский	АО МХК «ЕвроХим»	Осваивается	474-564	2011
Талицкий	ООО «Верхнекамская калийная компания»	Осваивается	364-416	2018
Половодовский	ОАО «Уралкалий»	Не осваивается	286	-
Гремячинское месторождение				
Гремячинский	АО МХК «ЕвроХим»	Осваивается	1150	2015
Новогремячинское месторождение				
Ново-Гремячинский	АО МХК «ЕвроХим»	Не осваивается	1200	-
Нивенское месторождение				
Нивенский-1	К-Поташ Сервис	Осваивается	1100	2021
Нивенский-2	К-Поташ Сервис	Осваивается	1100	2021
Поддубный	ООО «Калининградская калийная компания»	Не осваивается		-
Западно-Петриковское месторождения				
Западно-Перелюбский	АО МХК «ЕвроХим»	Не осваивается	1000	-
Восточно-Перелюбский	АО МХК «ЕвроХим»	Не осваивается	1000	-
Центрально-Иванихинский	АО МХК «ЕвроХим»	Не осваивается	1000	
Западно-Иванихинский	АО МХК «ЕвроХим»	Не осваивается	1000	-
Западно-Целинный	АО МХК «ЕвроХим»	Не осваивается	1000	-
Восточно-Целинный	АО МХК «ЕвроХим»	Не осваивается	1000	-

При увеличении глубины разработки специфика закладки выработанного пространства калийных месторождений расширяется рядом нетривиальных проблем. Недавно введённое в эксплуатацию глубокозалегающее Гремячинское месторождение калийных солей (ГМКС) осваивается одноимённым Гремячинским горно-обогатительным комбинатом (ГОКом). Условия освоения ГМКС принципиально отличаются от условий добычи солей на рудниках при разработке ВКМКС и Невинномысского месторождений рядом факторов. В работе [107, 108] отмечена взаимосвязь глубины и условий разработки ГМКС. Отмечено, что месторождение характеризуется достаточно сложными горно-геологическими, гидрогеологическими, геомеханическими, газодинамическими и горнотехническими условиями разработки, крайней неоднородностью структуры и

литологического состава продуктивного пласта, фильтрационных свойств пород, как по вертикали, так и по простиранию залежи. Более того, Гремячинское месторождение характеризуется сложной морфологией продуктивной толщи, пласты характеризуются большими тектоническими нарушениями в виде складчатости, выклинивания, флексурных нарушений. Другим осложняющим фактором ведения горных работ на Гремячинском руднике, рассмотренным в работах [51], является наличие под пластом сильвинита подстилающего слоя карналлита, характеризующегося при повышении влажности пучением, раскрытием пор, проявлением газодинамических явлений. Авторами работы [80] отмечается, что, качественным признаком глубокозалегающего месторождения калийных солей является, как глубина, так и прочностные характеристики соляных пород, сопоставимые со значением максимальных сжимающих напряжений в массиве горных пород.

Так, например, месторождение ВКМКС не считается глубокозалегающим, так как соотношение прочности солей на одноосное сжатие 2-2,5 выше, чем значения гравитационной составляющей напряжений. Прочность солей на одноосное сжатие составляет 32-37 МПа, в то время как максимальная компонента сжимающих напряжений в массиве горных пород на глубинах в 350-450 м находится на уровне 10-15 МПа [120].

Проведенные исследования [137, 87] указывают на аномально высокие температурные режимы, возникающие на горизонте добычных работ, превышающих 1000 м, где температура массива горных пород достигает 38 °С, в то время как влажность продуктивной толщи в окрестности контура выработок изменяется в диапазоне 0,07–0,15 %, что обусловлено большой глубиной залегания калийных солей.

Вместе с тем, в работе [33] отмечено, что изменение влажности рудничного воздуха при использовании гидравлической закладки выработанного пространства может привести к риску деградации целиков за счет контакта с пресным конденсатом, причем этот процесс прогрессирует со временем. Более того, расположение в почве корки сильвинита, оставляемой в ходе комбайновой выемки

над газоносным карналлитовым пластом, определяет необходимость оценки риска нарушения защитной пачки сильвинита и изменения свойств карналлита в результате воздействия рассолов.

Авторами доказано [139], что увлажнение соляных пород оказывает значительное влияние на их механические свойства, приводя к снижению прочностных и деформационных характеристик пород сильвинитового и карналлитового пластов при контакте с гидрозакладочными рассолами. При заполнении камер гидрозакладочной смесью происходит проникновение влаги в междукammerные целики, что вызывает развитие в них повышенных деформаций и снижение несущей способности. Это подчеркивает важность учета влажностного состояния соляных пород, закладочной смеси и формируемого массива при разработке технологии добычи и заложения выработанного пространства в калийных рудниках.

Дополнительной проблемой, возникающей при освоении Гремячинского месторождения, является высокое горное давление на глубине более 1000 м., что также определяет необходимость закладки выработанного пространства, причем, закладочный массив должен стать конструктивным элементом системы разработки, воспринимающим часть горного давления. Также дополнительные трудности связаны с пылеобразованием, температурой рудничного воздуха и переменной влажностью рудничной атмосферы, составляющей 30-35%, при влажности продуктивного пласта сильвинита менее 0,5. Таким образом, условия разработки таких месторождений, как Гремячинское (ГМКС), Верхнекамское (ВКМКС) и Непское существенно различаются по факторам состава горных пород и специфических параметров рудничной атмосферы [91]. Это разнообразие требует комплексного сопоставления лучших практик и теоретических исследований для возможной корреляции и интерполяции условий разработки между различными объектами. Кроме того, необходимо проведение индивидуальных исследований для подтверждения и уточнения данных особенностей, что поможет оптимизировать технологические процессы и увеличить безопасность и эффективность добычи на каждом из месторождений.

При выборе, обосновании и моделировании логистической системы рудника необходимо также учитывать доступность и экономичность компонентов закладочной смеси, обеспечивающей требования к особенностям формирования закладочного массива, его прочностным, деформационным и реологическим характеристикам.

Важно отметить большие вертикальные и горизонтальные расстояния при транспортировке сыпучих материалов по трубопроводу с перепускными и накопительными бункерами и конвейерным линиям, что усложняет сохранность консолидирующих свойств закладочного материала на всем технологическом пути логистической схемы закладки.

Другим важным аспектом управления качеством прямых и возвратных минерально-сырьевых потоков является оптимизация параметров логистических процессов и схемы транспортирования, включая рациональное планирование, своевременную корректировку и координацию перемещения рудничных потоков, оптимальное использование техники и оборудования, а также контроль за условиями хранения и перевозки сыпучего сырья, минимизирующих пыление и простои техники, а также риски возникновения аварийных ситуаций в ходе эксплуатации соляных месторождений.

Управление качеством минерально-сырьевых потоков является значимой проблемой разработки логистической системы глубокого рудника по добыче калийных солей. При этом, качество добываемого сильвинита и солеотходов для закладки выработанного пространства оказывает прямое влияние на эффективность процессов переработки калийных солей и характеристики возводимого закладочного массива [138].

1.3. Особенности и параметры логистических схем подземного рудника при разработке соляных месторождений с использованием закладочных смесей с требуемыми характеристиками влажности, прочности, реологии.

К настоящему времени в мировой практике накоплен значительный опыт применения сухой и гидравлической закладки при разработке калийных

месторождений. Закладка производится с целью уменьшения оседания земной поверхности под городской застройкой и промышленными объектами, а также для частичной утилизации отходов добычи и обогащения. Для получения закладочных смесей в горнодобывающей промышленности преимущественно используют побочные продукты, к которым относятся галитовые материалы, появляющиеся в процессе проходки подземных выработок, а также фракции, отделяемые при обогащении минеральных ресурсов методами флотации или галургии, причем в качестве дополнительного компонента нередко добавляются глинистые шламы, способствующие достижению необходимых прочностных и технологических характеристик готового закладочного материала.

Доказано, что в отличие от многих других отраслей горно-химической промышленности, калийная характеризуется большим количеством отходов, получаемых в результате добычи, переработки и обогащения калийных солей, складываемых в отвалах, которые оказывают негативное техногенное воздействие на окружающую среду. Так, например, по данным работ [66, 99, 81, 88] при получении 1 т продукта образуется 3,5–4,5 т галитовых отходов, а с учетом постоянного развития калийных производств, внедрения новых технологий интенсификации добычных работ и увеличения производственных мощностей, объем отходов неизбежно растет. Солеотходы обычно складывают на земной поверхности в солеотвалах или размещают в выработанном пространстве. Площади существующих солеотвалов и шламохранилищ ограничены, их расширение требует значительных капитальных вложений. К тому же размещение отходов на земной поверхности ведет к негативным экологическим последствиям, связанным с засолением земель.

Над проблемами возведения закладочных массивов и транспортирования закладочных смесей из соляных пород работали известные ученые Айнбиндер И.И., Аксенов Н.И., Байконуров О.А., Борзаковский Б.Н., Бронников Д.Н., Вескова М.И., Водопьянов В.Л., Гаркушин П.К., Габараев О.З., Голик В.И., Замесов Н.Ф., Зимин В.Н., Зотеев О.В., Казикаев Д.М., Калмыков В.Н., Кравченко В.П., Кравченко Г.И., Кравченко Ю.Г., Крупник Л.А., Кузьмин Е.В., Мирошник К.В.,

Монтянова А.Н., Папулов Л.М., Пермьяков Р.С., Радченко Д.Н., Руденко В.В., Русаков М.И., Рыльникова М.В., Савич И.Н., Сивоконь Е.П., Цыгалов М.Н., Шнайдер М.Ф. и др. Ими исследованы процессы формирования закладочных массивов, предложены методы расчета параметров систем разработки в зависимости от свойств закладочных материалов, разработаны направления изыскания новых вариантов систем разработки и создания добычных и закладочных комплексов, рассмотрены различные составы закладочных смесей на основе отходов добычи солей и производства калийных удобрений.

Анализ мирового опыта разработки месторождений калийных солей показал, что в настоящее время около 85% объемов транспортирования закладочных материалов осуществляют гидравлическим способом, а остальные 15% - механическим способом.

Многომиллионные массы вторичных отходов могут быть утилизированы только после создания инновационных составов закладочных смесей и технологий формирования и укладки закладочных массивов, направленных на полную утилизацию соляных отходов, возвращая их в производственный цикл. После изучения вещественного состава и свойств таких отходов возможно создание технологий транспортирования и, как следствие, единой соединенной общающейся логистической системы с утилизацией солеотходов, преимущественно в ранее пройденных и специально создаваемых выработанных пространствах [96].

Закладочные работы на отечественных калийных месторождениях ведутся свыше 60 лет [68]. За это время испытывались и применялись различные методы механизации закладочных работ: от скреперования до транспортирования с применением самоходных вагонов, трубопроводного транспорта и метательных устройств. Но, независимо от разнообразия технологий механизации, главным и объединяющим гидравлический и механический способы ведения закладочных работ является способ транспортирования закладочной смеси от земной поверхности до очистных горизонтов разрабатываемого месторождения – по скважинам, закладочному восстающему или стволу. В них размещается

вертикальный составной трубопровод, для которого чаще всего используют бесшовные стальные, реже чугунные и полиэтиленовые трубы [37].

Дополнительно в исследованиях рассмотрены перспективные материалы для изготовления и компоновки магистральных трубопроводов и рассолопроводов [105]. Отмечено, что полиэтиленовые трубы, не подверженные коррозии, значительно легче стальных, достаточно прочны и обладают меньшим удельным сопротивлением движению закладочной смеси, что позволяет значительно увеличить дальность ее транспортирования. Кроме того, стоимость полиэтиленовых труб на 20–30% ниже, чем стальных.

На транспортабельность материальных потоков по трубопроводу в условиях подземного рудника в значительной мере влияет не только материал для изготовления трубопроводов, но и геометрическая конфигурация выработок, что коррелирует с оптимальным трассированием распределительных трубопроводных систем. В работах [9, 10] отмечено влияние изменения уклона трубопровода на эффективность всей логистической системы подземного рудника, а также доказана необходимость снижения уклона трубопровода по направлению к конечным точкам распределительной сети. Более того, в работе [92] утверждается, что профиль камеры по продольной оси должен быть горизонтальным с допустимым уклоном в сторону перемычки. При большом уклоне повышается риск недозаклада, а превышение данного значения до 8–10 град и более значительно снижает эффективность закладки в целом. Заведомо неэффективно заполнение камер U-образной и S-образной формы гидравлической закладкой, а также ее применение в случае интенсивного изменения формы, мощности и направления падения продуктивного пласта, которые распространены повсеместно на глубокозалегающих калийных месторождениях. Изменение морфологии залежи требует корректировки трассы прокладки коммуникаций для гидрозакладочных работ. В ряде случаев это повлечет риск закупорки трубопроводов или невозможность транспортирования гидрозакладочной смеси.

Дополнительно, в работе [35] рассмотрена возможность применения буровых скважин для перепуска закладочных смесей с верхних горизонтов, тем самым

обеспечивается гравитационное транспортирование и минимизация энергопотребления. Это способствует не только экономической эффективности закладочного процесса, но и повышает его безопасность за счет снижения динамической нагрузки на трубопроводную инфраструктуру.

Логистические схемы гидрозакладочных работ объединены основными технологическими операциями: приготовление пульпы, ее транспортирование, закладка камер и возврат рассола. Закладочный массив возводят путем намыва пульпы. Пульпа в камеры подаётся непосредственно с выемочного или вентиляционного штрека закладываемого пласта, из камер или подготовительных выработок вышерасположенного отработанного горизонта.

Технологическая схема гидрозакладочной установки рудника СКРУ-2 представляет собой типовое решение, которое интегрирует сложную инфраструктуру для обработки и транспортирования рассолов и шламов. С применением гидротранспорта производится перемещение указанных материалов посредством специализированных конвейеров и трубопроводов. В состав закладочного комплекса входят участковые и центральные рассолосборники, оснащенные насосными агрегатами в кислотостойком исполнении, что позволяет эффективно перекачивать рассол (рис.1.5)

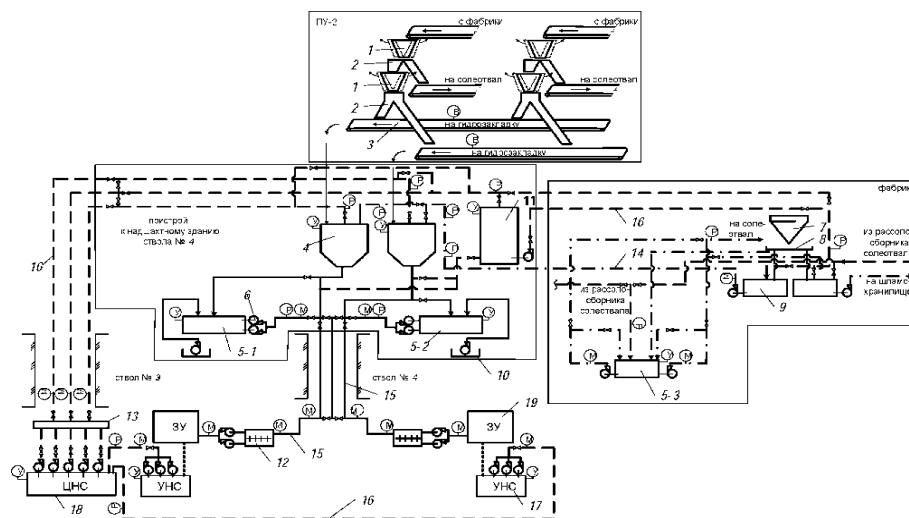


Рисунок 1.5 - Технологическая схема гидрозакладочного комплекса рудника СКРУ-2

Процесс разделения и определения направления потоков осуществляется с помощью разделителей потока типа «качающееся ведро», которые эффективно

делят потоки по направлениям закладки. Для смешивания и подготовки закладочной пульпы используются смесительные воронки, где шлам и рассол перемешиваются, а управление потоками осуществляется через ряд насосных установок с обеспечением точной подачи материалов. Система также включает аварийные маршруты для рассола и системы быстрого стока для защиты в нештатных ситуациях, обеспечивая высокий уровень безопасности технологических операций. Управление отходами осуществляется через систематическое разделение и фильтрацию, что минимизирует экологическое воздействие и повышает эффективность закладки, подчеркивая инновационные и безопасные подходы к управлению отходами и ресурсами в условиях подземной добычи.

Результаты анализа проектных решений по разработке отечественных и зарубежных месторождений водорастворимых полезных ископаемых показывают, что при горизонтально направленном транспортировании как прямых, так и возвратных ресурсных потоков, оптимальным решением при механизированном способе ведения закладочных работ является применение логистических систем транспортирования, чаще с использованием конвейерного транспорта [104].

Так, по типовому проекту разработки рудника СКРУ-2 [36], солеотходы после фабрики ленточным конвейером транспортируются к вентиляционному стволу и затем по трубам, диаметром 250 мм, перепускаются в рудник. Для доставки отходов в руднике от ствола до закладываемых камер предусмотрена сеть ленточных конвейеров. Размещение закладочной смеси в камерах предусмотрено производить при помощи скреперных установок и пневматических машин (рис 1.6). Далее транспортирование закладочной смеси непосредственно в выработанное пространство предусмотрено осуществлять самоходными вагонами, либо участковыми телескопическими конвейерами. Закладку производят в один или два слоя, при прямом и обратном ходе.

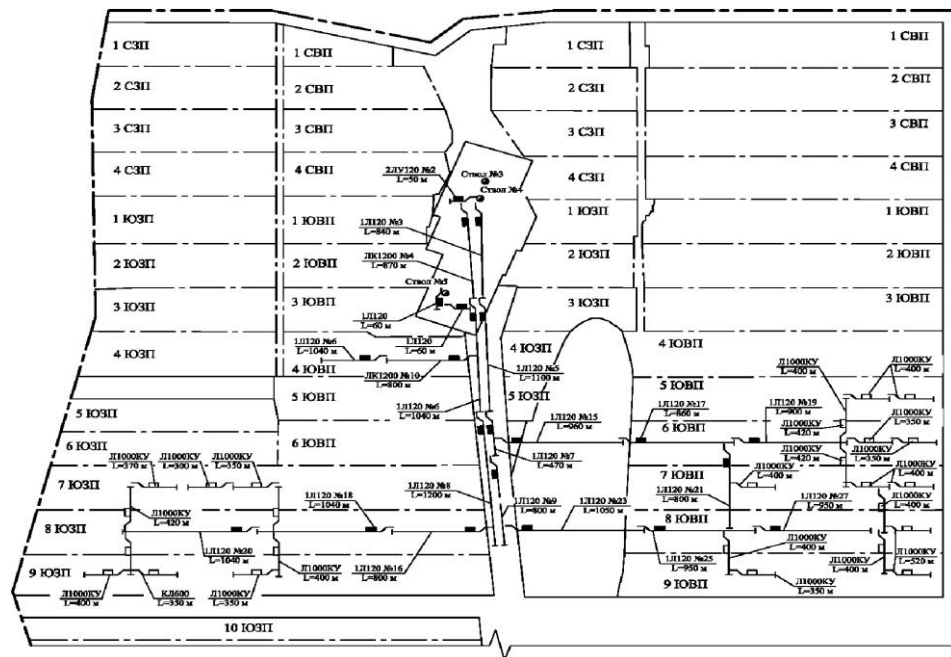


Рисунок 1.6 - Схема конвейерного транспорта рудника СКРУ-2. Условные обозначения: закрашенные - магистральные конвейеры; пустые - участковые конвейеры

В работах [45, 46, 117] отмечено, что применение сухой закладки при циклической технологии транспортирования материалов и формирования закладочного массива характеризуется низкой интенсивностью и высокой себестоимостью закладочных работ. При этом, ввиду низкой полноты заполнения выработанного пространства, закладочный массив не является конструктивным элементом системы разработки. Однако, качество боковых контактов и прочностные свойства закладочного массива, продолжительность закладочных работ при механическом способе, в ряде случаев, характеризуется лучшими технико-экономическими показателями, по сравнению с гидравлическим способом. Для совершенствования технологии сухой закладки подземных камер необходима оценка перспективы использования современных машин метательного действия и пневмотранспорта для формирования закладочного массива из обезвоженных солеотходов, успешно применяемых в мировой практике соледобычи.

В работах [1, 4, 12, 130] отмечена важность формирования логистических систем и способов транспортирования закладочных материалов для формирования закладочных массивов из отходов обогащения. Доказана необходимость

геомеханического и геофизического мониторинга состояния массива горных пород, в первую очередь, для выбора схемы механизации работ, а также обеспечения безопасной транспортировки техногенного сырья по поверхностной части маршрута и далее уже готового закладочного материала по подземному пути следования возвратного ресурсопотока при формировании закладочного массива.

Протяженность логистических схем закладки выработанного пространства в подземных рудниках может достигать 15 км. Месторождения, в свою очередь, характеризуются наличием сложных геологических условий, включая нестабильные участки с риском обрушения и зон с высоким содержанием пульпообразных масс, что создает определенные риски. Важным аспектом является непрерывный мониторинг состояния геологической среды и параметров технологических процессов, чтобы обеспечить безопасное продвижение и эффективное использование закладочных материалов. Однако, несмотря на значительные усилия по контролю и оптимизации параметров технологических процессов закладки, закономерности их развития в рамках единой логистической системы, а не только на ее отдельных участках, до настоящего времени не изучены в полной мере.

1.4. Методы обоснования параметров логистических схем закладки в подземных рудниках.

Система транспортирования закладочного материала в подземный рудник гидравлическим транспортом требует проведения специального комплекса работ, направленных на выбор и обоснование параметров трубопровода и оборудования, обеспечивающих наиболее эффективную закладку.

В зависимости от крупности транспортируемого в жидкой среде материала используются различные методики расчета параметров основных элементов гидроустановок и трубопроводов. Для расчетов установок гидротранспортирования продуктов обогащения (флотационные концентраты, отвальные хвосты, промежуточные продукты, крупностью 0,03–0,3 мм, применяется методика, разработанная институтом «Механобр» [102]. При

проектировании гидротранспортных систем золошлакоудаления ТЭС, крупностью 0,025–10 мм, используются «Рекомендации по гидравлическому расчету систем напорного гидротранспорта золошлаковых материалов» П61-77 [111]. При расчетах гидротранспортных систем для перемещения нерудного сырья из карьеров используется методика, изложенная в «Инструкции по расчету гидротранспорта песчаных и песчано-гравийных материалов», разработанная институтом «Проектгидромеханизация» [72].

Основными параметрами гидравлического транспорта закладочного материала в подземном руднике являются потери напора на трение и местные сопротивления, критическая скорость движения пульпы, диаметр пульпопровода и дальность транспортирования.

При транспортировании однородных закладочных материалов определяющее значение при расчете параметров комплекса играет годовая производительность, рассчитываемая по формуле:

$$V_{Т.Г.} = \frac{A_{Г}k_3}{\rho_{Т}k_{р}} k_{у} \cdot k_{в}, \quad (1.1)$$

где k_3 - коэффициент заполнения пустот закладочного материала, $k_3 = 0.95$; $k_{р}$ - коэффициент разрыхления материала, $k_{р}=1.4-1.6$; рекомендуемые значения $k_{у} = 1.08-1.12$, $k_{в}= 1.02-1.1$.

Отсюда рассчитывается требуемая часовая производительность ($Q_{Т}$), используемая в дальнейшем при расчете расхода пульпы, м³/ч:

$$Q_{П} = Q_{Т}[1 - m] + n, \quad (1.2)$$

где $Q_{П}$ - объемный расход пульпы, м³/ч, n - удельный расход воды на транспортирование 1 м³ твердого материала в массиве, м³, принимается по соответствующим нормам технологического проектирования, m - пористость твердого материала, определяемая по формуле:

$$m = (r_{Т} - r_{е})/r_{Т}, \quad (1.3)$$

где $r_{Т}$ - плотность материала (отношение плотной твердой основы скелета к объему этого скелета), т/м³; $r_{е}$ - плотность породы в естественном состоянии, т/м³.

Критическая скорость движения гидросмеси $v_{кр}$ м/с:

$$v_{кр} = 4,9S^{0,36}(\sqrt{g}D/\sqrt[4]{C_p}), \quad (1.4)$$

где s - объемная концентрация гидросмеси; g - ускорение свободного падения, м/с²; D - диаметр трубопровода, м; C_j - средний коэффициент лобового сопротивления (коэффициент сопротивления частиц разнородного грунта при свободном падении в воде).

Диаметр трубопровода назначается предварительно в соответствии с нормативными значениями, объемная концентрация S и плотность пульпы γ_{Π} определяются по формулам:

$$S = (r_{\Pi} - r_B)/(r_T - r_B) \quad (1.5)$$

$$r_{\Pi} = [nr_B + r_T(1 - m)]/[n + (1 - m)] \quad (1.6)$$

Далее определяется расчетная скорость движения пульпы v_p по формуле:

$$v_p = 4Q_{\Pi}/(pD^23600). \quad (1.7)$$

Проверяется отношение $v_p/v_{кр} = 1,1$; при значительных отклонениях полученной величины от 1,1 подбирается новый диаметр пульпопровода и перечисленные выше параметры рассчитываются заново.

Определяются потери напора $i_{пкр}$ при $v_{кр}$:

$$i_{\Pi} = i_E\{1 + 165S[v^2\sqrt{C_p/gD}]^{-1,4}\}, \quad (1.8)$$

где i_B - удельные потери напора для жидкости, м/м:

$$i_B = lv^2/(2gD), \quad (1.9)$$

где v - скорость движения жидкости, м/с; l - коэффициент сопротивления трения для гладких труб, определяемый по формуле:

$$l = 1/(1,81Re - 1,52)^2, \quad (1.10)$$

где Re - число Рейнольдса.

Следующим этапом рассчитываются потери напора пульпы i_{Π} при расчетной скорости v_p .

При $v_p > v_{кр}$ потери напора i_{Π} корректируются по формуле

$$i_{\Pi} = i_e(i_{пкр} - i_{екр})\sqrt{v_{кр}/v_p}, \quad (1.11)$$

где $i_{екр}$ - удельные потери напора на трение в пульпопроводе для жидкости при $v_p = v_{кр}$, м/м.

На основе полученных данных производится расчет давления, необходимого для движения пульпы, а также расстояния доставки закладочной смеси самотечным способом под воздействием вертикального давления столба налегающих материалов. Расстояние самотечного движения гидросмеси (или месторасположения рабочих пневмоврезок), в м, рассчитывается:

$$L_C = \frac{k \cdot P_B}{\Delta P}, \quad (1.12)$$

где k - коэффициент заполнения вертикального става. По рекомендации К. Ю. Репина $k = 0,87$.

Расстояние доставки твердеющей закладки самотечным способом ограничено высотой вертикального става. Поэтому на практике обычно применяют самотечно-пневматический способ доставки гидросмеси при расстояниях, больших максимально допустимого самотечного расстояния транспортирования смеси.

В рамках горного предприятия зачастую вопросы логистики связаны с транспортированием уже добытого минерального сырья для последующей реализации к конечному потребителю [101, 100, 55, 64, 6], в меньшей степени рассматривается вопрос ресурсной логистики при ведении добычных работ, еще в меньшей степени стоят вопросы ресурсной логистики при утилизации отходов производства и ведении закладочных работ.

На основе анализа существующих теоретических подходов к обоснованию и выбору логистической системы рудника при разработке месторождений в работе [140] предложена классификация, учитывающая технологические и экологические аспекты логистической системы ресурсной логистики. Классификация потоков основана на множестве критериев, таких как степень непрерывности (непрерывные или дискретные), регулярности (детерминированные или стохастические), стабильности, изменчивости (стационарные или нестационарные), а также учитывает характер перемещения элементов (равномерные или неравномерные). Также учитываются периодичность, соответствие заданному ритму, сложность и управляемость потоков. Технологии движения материальных потоков охватывают не только транспортировку и хранение материальных ресурсов, но и операции по

изменению запасов, размеров, форм и свойств элементов материального потока. Логистические операции, как неделимые части технологических или организационных процессов, выполняются с использованием горных машин и могут включать добычу, перепуск, погрузку, разгрузку, фасовку, упаковку, сортировку, хранение и другие действия.

В меньшей степени рассмотрена ресурсная логистика при ведении добычных работ. Очевидно, что в практике горных работ изыскание более рациональных технологических схем транспортирования минерально-сырьевых потоков при очистной выемке, в первую очередь, обусловлено целью повышения объёмов добычи минерального сырья.

С увеличением глубины горных работ возрастают требования к технологии возведения и свойствам закладочного массива. Однако уровень механизации, автоматизации и логистики остался прежним, делает процесс ведения закладочных работ ещё более отягощенным. В этой связи, требуется разработка высокопроизводительной логистической системы ведения закладочных работ, которая позволит не только снизить стоимость технологических процессов, но и увеличить извлечение полезных компонентов, оказывая одновременно экологический эффект за счет утилизации техногенного сырья и сокращения территорий, используемых для складирования солеотходов.

Основное внимание в известных трудах уделено разработке эффективных межцеховых логистических систем, которые позволяют оптимизировать внутренние потоки сырья и материалов, тем самым обеспечивая непрерывность производственных процессов.

Авторами [92] рассмотрена логистическая схема закладочных работ, работающая по принципу толкающей и тянущей системы управления материальными потоками при комбинированной разработке месторождений медно-колчеданных руд (рис. 1.7). Одним из наиболее эффективных подходов в логистике рудника является использование различных методов моделирования функционирования логистических операций. Это включает в себя построение и анализ моделей логистических систем и процессов, которые помогают

визуализировать и оптимизировать потоки ресурсов, как на уровне отдельных участков, так и в масштабе всего горного предприятия.

В работе [134] авторами предложена имитационная модель добычи минерального сырья в подземном калийном руднике. Поскольку, по мнению авторов, создание логистической системы рудника должно базироваться на достижении максимальной производительности при заданной последовательности выполнения производственных процессов и операций, в логистической системе должны имитироваться процессы извлечения минерального сырья из очистных камер комбайнами, с его транспортированием самоходными вагонами к рудоспускам, затем - по системе конвейеров до скипового подъемника, сопровождающиеся циклом горно-подготовительных работ и вспомогательных операций, ремонтом оборудования и прочими процессами.

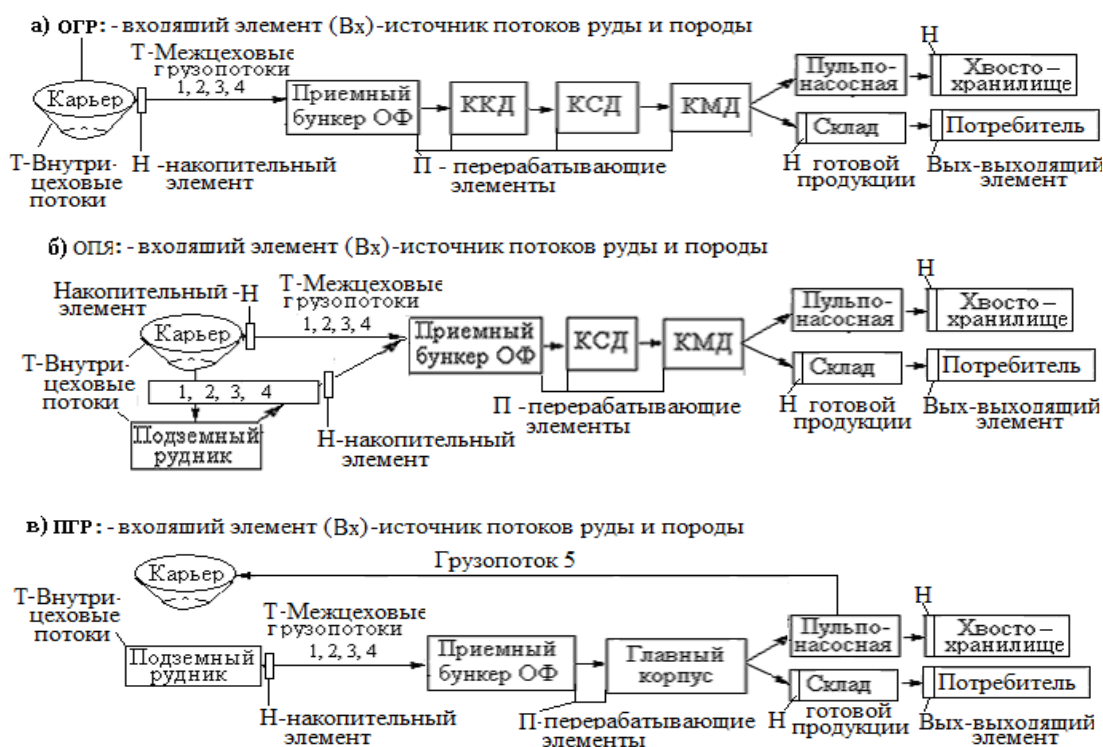


Рисунок 1.7 - Логистическая схема грузопотоков открытых горных работ (ОГР) (а), открыто-подземного яруса (ОПЯ) (б), подземных горных работ (ПГР) (в) и средства механизации: 1-карьерный железнодорожный или локомотивный подземный транспорт; 2-карьерные или подземные автосамосвалы; 3-карьерные или подземные ленточные конвейеры; 4-карьерные наклонные или шахтные подъемные машины; 5- гидротранспорт пульпы

Была описана логистическая система с использованием многоподходной среды имитационного моделирования AnyLogic с воспроизводством непрерывных процессов, только на базе дискретно-событийного подхода. В предложенной модели реализован процесс маршрутизации моделировался алгоритмически на взвешенных графах, а организационно-управленческие процессы имитировались в динамических событиях.

В исследовании [79], посвященном дискретно-событийному моделированию транспортных потоков в подземных рудниках, основанному на принципах распределения погрузочно-доставочных машин и шахтных автосамосвалов по пунктам погрузки, осуществлен учет стохастического характера погрузочно-транспортных процессов. За основу брались непрерывные и дискретные производственные параметры. В качестве объекта исследований был принят рудник «Комсомольский» в Красноярском крае. По данным исследования было установлено, что «количество вееров за стадию взрыва» значительно влияет на производительность внутришахтного транспорта. Определение минимально допустимых значений этого параметра, критично для снижения рисков невыполнения производственного плана. Авторами отмечено, что использование AnyLogic позволяет создавать детализированные имитационные модели, благодаря поддержке объектно-ориентированного языка Java. Это дает возможность эффективно моделировать сложные технологические процессы и системы, что способствует повышению точности планирования и оптимизации горных работ.

В работе [135] выполнена экспериментальная проверка результатов на транспортной схеме рудника БКПРУ-4, базирующаяся на детализации имитационной модели добычи и транспортирования сильвинита в подземной части калийных рудников. Модель основана на использовании комбайновых комплексов, конвейерного транспорта и перегрузочных пунктов для моделирования непрерывного грузопотока. На рисунке 1.8 представлены основные составляющие имитационной модели.

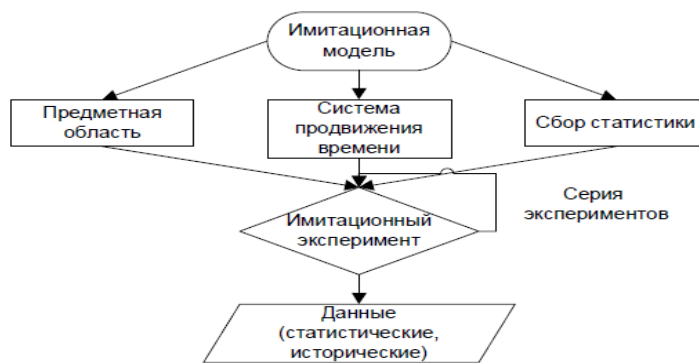


Рисунок 1.8 - Основные составляющие имитационной модели

Определяющим параметром для расчета имитационной модели принят подбор оптимального размера бункеров перегрузочных пунктов и мест их расположения, расчет параметров конвейеров, и определение транспортной схемы и технологии отработки пластов с закладкой выработанного пространства.

В работах [21, 26] специалистами из Китая рассмотрены теоретические аспекты и возможности применения системы CBTC (Communication-Based Train Control) в условиях подземных угольных шахт, основанной на стохастической природе транспортных процессов с вариативной адаптацией и модификацией системы CBTC для подземных условий, выраженной в математическом аппарате для расчета параметров транспортных средств в условиях подземных шахт.

Таким образом, моделирование и прочие методы системного анализа позволяют руднику не только адаптироваться к изменениям в условиях добычи, но и предвидеть потребности в материалах и оборудовании, а также управлять сложными логистическими цепями с высокой степенью точности и эффективности. Эти методы являются ключевыми для поддержания непрерывности производственных процессов и минимизации затрат на всех уровнях управления ресурсами рудника.

Анализ работ отечественных и зарубежных ученых показал, что внедрение современных технологий управления горнотранспортными системами позволяет значительно повысить производительность и эффективность добычи полезных ископаемых. Использование интеллектуальных систем и методов имитационного моделирования способствует оптимизации логистических процессов, снижению

эксплуатационных затрат и улучшению условий планирования их функционирования

На основании выполненного анализа мирового опыта исследований в таблице 1.3 приведены научные и практические подходы к совершенствованию логистических схем и имитационного моделирования в горнодобывающей отрасли.

Таблица 1.3 - Анализ научных исследований и разработанных технико-технологических решений в области горно-логистических систем, имитационного моделирования и обоснования параметров логистической схемы [13, 19, 22, 27, 48, 79, 84, 86, 92, 123, 118, 127, 134-136].

Авторы	Научные исследования	Полученные решения
1	2	3
Saurabh Parakh, Nicole Russell (США)	Симуляция операций по закладке пустот для подземной добычи. Изучение процесса закладки на подземных платиновых рудниках компании Sibanye-Stillwater	Разработана дискретно-событийная имитационная модель на базе AnyLogic для генерации расписания закладки пустот. Модель включает объекты, представляющие горные работы, закладку, измельчение и логистические операции.
Клебанов Д.А., Темкин Е.И.	Применение методов искусственного интеллекта в управлении горно-транспортными системами в карьерах	Разработаны и внедрены интеллектуальные системы управления горнотранспортными комплексами, включая использование агентных систем для повышения эффективности работы карьеров. Системы позволяют оптимизировать маршруты техники, контролировать производственные процессы в режиме реального времени, снижать эксплуатационные затраты и минимизировать участие человека в управлении.
Рыльникова М.В., Струков К.И., Бергер Р.В., Есина Е.Н.	Обоснование развития логистической системы Светлинского карьера с учетом перспектив перехода на комбинированную геотехнологию	Разработана экономико-математическая модель, определяющая оптимальные параметры логистической схемы. Модель позволяет минимизировать затраты на перевозку и повысить экономическую эффективность работы карьера при переходе на комбинированную геотехнологию
Yu, Li (Китай)	Проектирование системы СВТС для подземных шахтных транспортных систем	Предложена функциональная структура системы СВТС для улучшения безопасности, эффективности и мониторинга транспортных операций в подземных шахтах

1	2	3
Селиверстова Н.С., Сабитов Р.А., Смирнова Г.С.	Подходы к управлению логистическими процессами в условиях цифровой экономики	Определены основные направления и методы исследований цифровизации логистических процессов, выявлены перспективные направления развития моделей управления логистикой, предложены рекомендации по повышению эффективности логистических процессов в условиях роста электронной коммерции и внешних форс-мажоров.
Олизаренко В.В., Красавин А.В., Абдрахманов Р.И., Гольцов В.В.	Анализ логистической схемы горно-обогатительного предприятия при комбинированной разработке медно-колчеданных месторождений	Обоснованы параметры использования железнодорожного, автомобильного и ленточного конвейерного транспорта в зависимости от характера перемещаемых грузов. Определены управляемые параметры логистической системы, такие как виды и характеристики конечного продукта, объемы и масса товарных продуктов, сроки и места доставки, а также эксплуатационные затраты.
Козлова О.Ю.	Дискретно-событийное моделирование транспортных потоков рудника	Установлено, что параметр «Количество вееров за стадию взрыва» является узким местом. Оптимизация параметра позволяет повысить производительность внутришахтного транспорта
Черненко В.Е., Малыханов А.А.	Дискретно-событийное моделирование горной добычи в подземном калийном руднике	Разработана имитационная модель для оптимизации производительности добычи при заданной последовательности выполнения процессов
Лавенков В.С.	Моделирование потоков минеральных веществ в горнотехнических системах с учетом их миграции в окружающую среду	Определены методы моделирования миграции минерального вещества и предложены решения по снижению его экологического воздействия. (с использованием AnyLogic)
Чудинов Г.В.	Разработка системы имитационного моделирования по добыче и транспортированию рудной массы в подземной части калийных рудников	Разработана система имитационного моделирования ПК "РУДОПОТОК", включающая добычу солей комбайновыми комплексами, использование конвейерного транспорта и перегрузочных пунктов для моделирования непрерывных грузопотоков. Учтены длина конвейера, его ширина, максимальная скорость, угол наклона боковых роликов, а также состояние рудной массы на различных этапах транспортирования

1	2	3
Xu, Ye, Lu, Zhang (Китай)	Моделирование и симуляция транспортной системы подземной добычи в угольных шахтах Datun	Разработана имитационная модель транспортной системы, позволяющая оптимизировать параметры транспортирования минерально-сырьевых потоков
Шадрунов А.Г., Саблёв С.А., Пыталев И.А., Фридрихсон О.В.	Совершенствование логистической схемы Светлинского карьера при переходе на циклично-поточную технологию	Доказано, что внедрение циклично-поточной технологии позволяет увеличить производственную мощность карьеров и обогатительных фабрик, снизить себестоимость добычи на 25-35%, повысить производительность труда в 1,4-2 раза. Рекомендовано использовать ленточные конвейеры и дробильно-перегрузочные пункты для оптимизации транспортных потоков
Ваганов В.С., Гоффарт Т.В.	Обоснование инновационных решений по шахтной логистике	Разработан универсальный контроллер GAL, обеспечивающий полный контроль за перемещением грузов и транспорта в угольных шахтах.
Милкин Д.А.	Обоснование параметров минерально-сырьевых потоков при проектировании комплексного освоения медно-колчеданных месторождений	Разработаны классификация и методики для рационального формирования минерально-сырьевых потоков, что повышает качество и эффективность добычи и переработки медно-колчеданного сырья.

Анализ таблицы 1.3 свидетельствует, что применение имитационного моделирования и усовершенствование логистических схем при разработке глубокозалегающих калийных рудников в горнодобывающей отрасли способствует: повышению производственной мощности, снижению эксплуатационных затрат, улучшению планирования и диспетчеризации работ, а также позволяет минимизировать экологическое воздействие горных работ на состояние окружающей среды.

Таким образом, всё вышеизложенное указывает на актуальность и важность разработки и внедрения единых логистических интеллектуальных систем управления горнотранспортными комплексами. Современные и перспективные технологические решения позволяют не только оптимизировать параметры

технологических процессов, но и создавать условия для перехода к более эффективным и устойчивым горнодобывающим геотехнологиям.

1.5. Цель, задачи и методы исследования

Анализ современных технологических схем формирования монолитных закладочных массивов при подземной разработке соляных месторождений позволил выявить ключевые проблемы и перспективы в данной области. Выявлена крайне низкая изученность вопроса транспортирования закладочных материалов при формировании консолидированных закладочных массивов, а также влияние глубины залегания месторождений и протяженности транспортных маршрутов на эффективность закладочных работ.

В результате проведенного обзора установлено, что наиболее распространенные методы закладки, такие как льдопородная, твердеющая, бутобетонная, инъекционная и гидравлическая зачастую не применимы для условий освоения глубокозалегающих месторождений калийных солей ввиду специфики горно-геологических, горно-технических и геомеханических факторов. Риск нарушения целостности ВЗТ, влияние влажности на целостность целиков, высокие требования к прочностным характеристикам закладочного массива, пылеобразование и крайне неблагоприятный температурный режим, а также высокая стоимость, а также необходимость преодоления значительных трудностей, связанных с доставкой закладочных материалов на большие глубины, и их высокую себестоимость, что требует разработки специальных технологических решений для глубоких горизонтов месторождений и совершенствования как состава закладочных смесей, так и логистических схем их транспортировки.

Несмотря на достигнутые результаты, в исследованиях недостаточно проработаны вопросы обоснования параметров логистических схем ведения закладочных работ на больших глубинах, включая транспортирование закладочного материала на значительные расстояния, сохранение его реологических свойств и предотвращения изменений свойств в процессе

транспортировки, а также минимизации выхода и строя оборудования и подбора оптимального режима работы и выбора средств механизации.

В соответствии с вышеизложенным, целью работы является поиск и обоснование параметров логистической системы калийного рудника, обеспечивающей требуемую производительность закладочного комплекса, надежность и эффективность его функционирования, безопасность горных работ.

При этом, ключевыми задачами системы являются безаварийная эксплуатация, транспортного комплекса, комплексов приготовления и доставки закладочных материалов и смесей в выработанное пространство подземных камер, что способствует повышению полноты освоения недр и выполнению требований промышленной и экологической безопасности при ведении подземных горных работ.

Достижение поставленной цели и реализация идеи связаны с решением следующих научно-практических задач:

- анализ современных подходов к разработке и формированию логистической системы подземного рудника с учетом особенностей освоения глубокозалегающих месторождений калийных солей с применением систем с закладкой выработанного пространства;
- оценка факторов, определяющих параметры логистической схемы ведения закладочных работ при разработке глубокозалегающих калийных месторождений;
- анализ структуры логистической схемы с учетом требований к составу и свойствам закладочных смесей и прогрессивных методов обоснования параметров логистических схем;
- разработка математической модели функционирования логистической системы подземного рудника на основе исследования параметров технологических схем формирования закладочных массивов;
- исследование зависимостей между параметрами логистической схемы и эффективностью освоения глубокозалегающих месторождений калийных солей;

– сравнительный анализ схем транспортирования закладочных материалов при формировании монолитного твердеющего закладочного массива при разработке глубокозалегающего калийного месторождения;

– разработка алгоритма выбора приоритетного варианта логистической системы подземного рудника с учетом требований экономической эффективности, безопасности освоения месторождений калийных солей.

Решение поставленных задач в диссертационной работе базировалось на комплексировании методов исследования, включающих полевые, лабораторные, экспериментальные, аналитические, инструментальные и расчетные подходы. Параметры производственно-организационной структуры рудника анализировались с использованием проектной документации и инструментальных измерений. Оценка размеров выработок проводилась прямым методом с применением лазерного дальномера Leica DISTO D510, маркшейдерской рейки Invar в соответствии с требованиями ГОСТ 26433.2-94 «Контроль геодезических измерений». Для оценки условий труда в подземных выработках и возможного влияния пылевой обстановки на работу механизмов и оборудования проводилось измерение запыленности воздуха с помощью пылеуловителя ПКА-01, при этом данные о концентрации пыли фиксировались с учетом объемного расхода воздуха через пробоотборный зонд. Температура и влажность рудничной атмосферы измерялись портативными термометрами AR-360 и гигрометрами Benetech GM1362 в ключевых зонах рудника, включая рабочие участки и вентиляционные выходы.

Для оценки влияния геологических факторов на надежность транспортной схемы проводилась комплексная съемка геологических нарушений, включающая визуальную фиксацию разломов, обвалов и структурных деформаций пород, а также их документирование с применением лазерного сканирования.

Одним из ключевых этапов исследования являлось изучение физико-механических свойств солеотходов, включая определение реологических характеристик, влияющих на транспортирование по поверхности и подземным выработкам. Влажность закладочных смесей определялась с использованием

влажмера, работающего по методу высушивания истертой навески до постоянной массы, с предварительной сушкой в сушильном шкафу и последующим расчетным увлажнением до заданного уровня. Насыпная плотность измерялась в соответствии с ГОСТ 32721—2014, а фракционный состав закладочного материала анализировался методом мокрого ситового анализа на автоматической просеивающей машине EML 200 при непрерывной подаче оборотного рассола.

Для оценки влияния динамических нагрузок на транспортируемые солеотходы проводились исследования уплотнения закладочной смеси в условиях, имитирующих вертикальное транспортирование. Образцы солеотходов с различной влажностью подвергались статическому сжатию на гидравлическом прессе Instron-300DX с программным обеспечением Bluehill. Склонность солеотходов к образованию первичной консолидации при перепуске по трубопроводному транспорту оценивалась с использованием установки пенетрометрического анализа, разработанной по принципу измерения заглубления контрольной спицы в образец после его сжатия. Угол естественного откоса определялся с использованием специальной каретки УВТ-3 с регулируемым углом наклона по методике РСН 51-84. Абразивность солеотходов оценивалась по методике проф. Л.И. Барона и А.В. Кузнецова методом истирания эталонного стального стержня, где критерием абразивности служила потеря массы стержня после истирания.

К расчетным методам, использованным в диссертационной работе, относятся определение параметров логистической горнотехнической системы закладочных работ, расчет критических скоростей падения материала в вертикальном закладочном трубопроводе, прогнозирование степени уплотнения материала при перепуске через буферные устройства, а также расчет режимов работы горных машин и оборудования, включая скиповую подъемную установку, конвейеры, погрузочно-доставочные машины и трубопроводный транспорт. На основе полевых, лабораторных и расчетных исследований, а также анализа технической документации, был составлен алгоритм выбора логистической схемы закладочных работ в соответствии с ГОСТ 19.701-90 «Схемы алгоритмов, программ, данных и

систем». По итогам комплекса исследований проведено технико-экономическое сравнение предложенных логистических схем транспортирования закладочного материала на основе метода приведенных затрат. Рекомендательная календарно-сетевая модель реализации поточной логистической схемы транспортирования закладочного материала разработана в соответствии с ГОСТ Р 56716–2015 «Техника сетевого планирования» и международной методологией Numeric Schedule Levels.

Таким образом, в работе использован комплекс методов, обеспечивающих достоверность и обоснованность полученных результатов, а также их практическую применимость для решения задач, связанных с обоснованием параметров логистической системы подземного рудника при освоении глубокозалегающих месторождений калийных солей с монолитной закладкой выработанного пространства.

Глава 2. РАЗВИТИЕ НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ РУДНИКА ПРИ ПОДЗЕМНОЙ РАЗРАБОТКЕ СОЛЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С ЗАКЛАДКОЙ

2.1. Понятие логистической системы подземного рудника, ее структуры, функциональных особенностей и задач, классификация логистических схем ведения закладочных работ при разработке соляных месторождений.

Известно, что процесс формирования закладочного массива состоит из трех основных технологических операций: подготовка смеси, транспортировка компонентов и/или смеси к отработанным очистным камерам и заполнение выработанного пространства закладочной смесью. Однако, анализ отечественных и мировых научных исследований, представленных в разделах 1.1. и 1.2. настоящей диссертации, показал, что зачастую все элементы логистики и транспортирования рассматриваются как вспомогательные в контексте процессов подготовки смеси и заполнения ей выработанного пространства. В этой связи, требуется дополнительное пояснение понятийного аппарата, определений и терминов, а также уточнение структуры технологических процессов ведения закладочных работ применительно к калийным рудникам.

В структуре горнотехнической системы подземного рудника с закладкой выработанного пространства значимое место занимает логистическая система, которая представляет собой комплекс взаимосвязанных процессов и операций, направленных на обеспечение непрерывного и эффективного перемещения материалов, оборудования, людей и информации внутри рудника. Основной целью логистической системы является создание условий для непрерывной и эффективной эксплуатации рудника, минимизации временных и финансовых затрат, реализации всех производственных процессов, а также обеспечение устойчивого функционирования всех геотехнологических операций.

В логистическую систему входит логистическая схема, или технологическая схема транспортирования всех материально-сырьевых потоков. Её структура и содержание зависят от типа месторождения и глубины его залегания, а также от

применяемых технологий добычи, что требует учёта множества факторов, включая организационные особенности и производственную мощность рудника, его инфраструктуру и технологические процессы, схему механизации горно-транспортных работ. Логистическая схема – это детализированная технологическая модель движения материалов, ресурсов, машин и оборудования.

Логистические схемы калийного рудника по типу назначения делятся на схемы добычных, вспомогательных, закладочных работ и схемы управления людскими ресурсами. Добычные логистические схемы включают в себя операции по транспортированию полезных ископаемых и породы от забоев до околоствольного двора и поверхности шахты, а также доставку и транспортирование горной массы по поверхности до обогатительной фабрики - склада или до мест погрузки в вагоны железнодорожного транспорта и породы - в отвал. Вспомогательные логистические схемы включают в себя операции по транспортированию с поверхности шахты к очистным и подготовительным забоям и обратно в подземный рудник вспомогательных грузов различного назначения и оборудования, таких как инструменты и приспособления, горюче-смазочные материалы (ГСМ), запчасти и контрольно-измерительные приборы (КИП). Закладочные логистические схемы предусматривают транспортирование с поверхности шахты закладочных материалов и смеси к местам их укладки. Логистические схемы управления людскими ресурсами включают в себя перемещение оборудования и сотрудников к местам их работы и обратно. Центральными элементами в логистической схеме добычных и закладочных работ является минерально-сырьевые потоки. Добычный поток — это движение добытых полезных ископаемых в соответствии с технологическим процессом по определенной трассе и в определенном направлении в заданное время.

Прямые минерально-сырьевые потоки направлены на доставку материалов от их источников (например, от мест добычи) к местам их использования или переработки. Включают в себя перемещение минеральной массы от забоев до поверхностных складов или обогатительных фабрик. Возвратные минерально-сырьевые потоки связаны с перемещением материалов, не использованных в

производстве, отходов, а также с возвратом оборудования и инструментов на склады или места их хранения. Однако, такой подход является устаревшим и требует пересмотра. Необходимо включить возвратные потоки в производственный цикл, а также обеспечить их интеграцию с прямыми потоками для подбора оптимального способа транспортирования.

Возвратные минерально-сырьевые потоки должны быть включены в единую технологическую схему закладочных работ, которая охватывает производственно-технологические процессы, такие как приготовление закладочной смеси, её транспортировка и укладка в выработанное пространство (рис. 2.1).

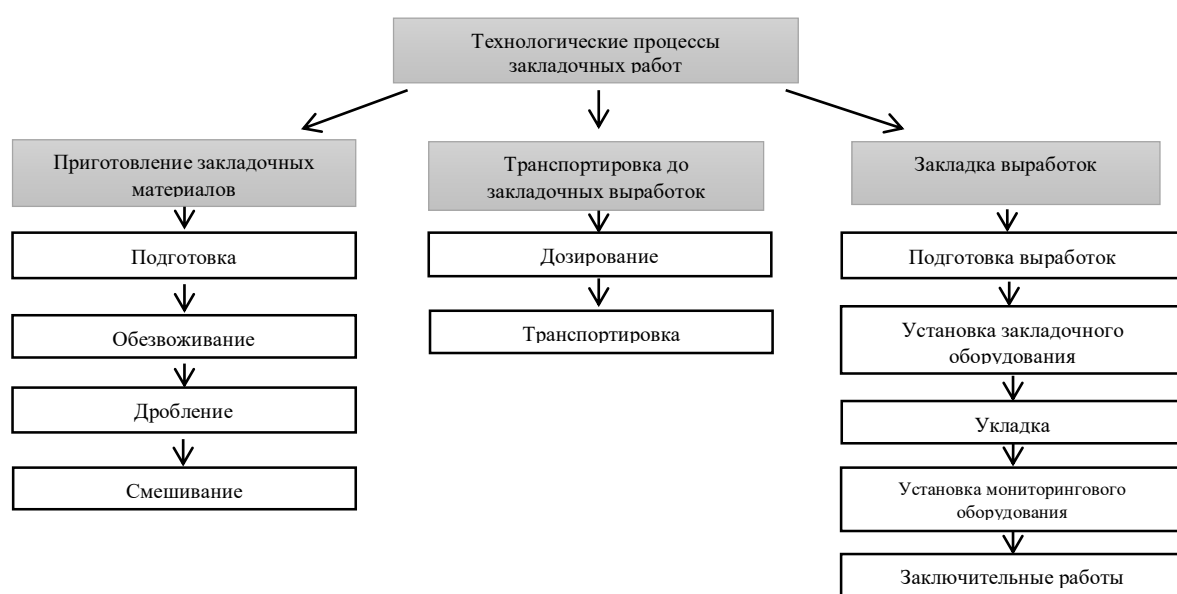


Рисунок. 2.1 - Технологические процессы закладки выработанного пространства на калийных рудниках

Логистическая схема закладочных работ при освоении месторождений калийных солей состоит из четырех базовых модулей, включающих: поверхностный, вертикальный, горизонтальный подземный и камерный (рис.2.2) [119]. Рассмотрим каждый из вышеперечисленных модулей.

Поверхностный логистический модуль (ПЛМ) – это комплекс оборудования и инфраструктуры, предназначенный для хранения, перемещения, обезвоживания и загрузки закладочных материалов. ПЛМ состоит из нескольких подмодулей, каждый из которых выполняет определенную функцию. Модуль хранения (МХ) – это модуль, предназначенный для хранения закладочных

материалов в бункерах, которые имеют заданную вместимость, обеспечивающую своевременную подачу закладочных материалов, создание и хранение их нормативного резерва.



Рисунок. 2.2 - Структура логистической схемы закладочных работ на калийных месторождениях

Модуль транспортирования (МТ) – это модуль, который позволяет перемещать закладочные материалы внутри ПЛМ при помощи транспортных средств непрерывного или циклического действия. Транспортирующие устройства могут быть разных типов, например, ленточные, цепные или винтовые, чаще всего они представлены ленточными конвейерами. Модуль дозирования (МД) – это модуль, который предназначен для точного дозирования закладочных материалов перед загрузкой в закладочный трубопровод или иные средства доставки. Оборудование для дозирования может быть непрерывного или циклического действия, автоматическим, механическим или ручным.

Модуль загрузки (МЗ) – это модуль, который позволяет разгружать закладочные материалы в средства их перемещения в выработанное пространство.

Контрольно-измерительный модуль (КИМ) – это модуль, который предназначен для контроля и измерения расхода закладочных материалов, а также физико-механических характеристик, таких как влажность и плотность.

Контрольно-измерительные приборы позволяют получать полную и точную информацию о закладочных материалах и регулировать процесс их загрузки и перемещения.

Модуль управления (МУ) – это модуль, который позволяет контролировать и управлять всеми узлами ПЛМ. Модуль управления может быть ручной, полуавтоматический или автоматический. Автоматический МУ, как правило, включает в себя компьютер и специальное программное обеспечение.

Вертикальный логистический модуль (ВЛМ) – это часть логистической системы, предназначенная для вертикального перепуска закладочных материалов или смеси с поверхности земли на магистральные подземные транспортные линии и состоящая из вертикального закладочного трубопровода (МЗТ), внутри которого расположен веер энергогасительных узлов, обеспечивающих стабильную и безопасную транспортировку материала, либо скипового или клетьевого подъемов. Это позволяет регулировать скорость перемещения смесей и избежать перегрузки или простоя на транспортных линиях. Одной из ключевых особенностей вертикального закладочного трубопровода является способность обеспечивать дозированную подачу закладочной смеси на транспортные горизонтальные пути, обеспечивая надежность, ритмичность, устойчивость и непрерывность заданного режима логистического процесса. Горизонтальные транспортные линии могут быть оснащены закладочными трубопроводами, часто сопровождаемыми пневматикой для ускорения потока движения смеси, а также конвейерами, самоходной техникой циклического действия.

Горизонтальный логистический подземный модуль – это часть логистической системы, используемая для доставки закладочного материала или смеси от околоствольного двора до выработанного пространства по транспортным выработкам, ранее применяемых для транспортирования добытых полезных ископаемых из очистных камер, либо параллельных им.

Горизонтальный логистический модуль предусматривает транспортировку обезвоженных закладочных материалов или смесей и разделен с технической точки зрения на две составляющие – магистральную и участковую.

Конвейерный модуль (КМ) включает наиболее часто применяемые на соляных рудниках транспортные средства, которые перемещают материалы по выработкам. В зависимости от угла простирания горных выработок они могут быть как горизонтальными, так и наклонными. Перегрузочный модуль (МП) – модуль, где происходит перегрузка материалов с одного конвейера на другой, либо на иные транспортные средства.

Модуль контроля (МК) – это оборудование, которое следит за процессом транспортирования материалов или смеси и контролирует их качество. К нему относятся датчики вибрации, уровня загрузки материала, системы сканирования и другие.

Модуль мониторинга безопасности (ММБ) – это модуль, который обеспечивает сбор данных, обработку, анализ, контроль безопасности персонала и логистической схемы в целом во время транспортирования, включая системы противопожарной защиты, автоматической пожарной сигнализации, аварийной остановки конвейеров и пр.

Камерный логистический модуль предусматривает подготовку закладочной смеси в соответствии с принятой рецептурой и режимом, доставку до точек подачи смеси в отработанные камеры, подачу и распределение смеси под давлением в выработанное пространство с обеспечением максимальной полноты заполнения камер и дозакладку после реализации процессов компрессионного сжатия и усадки закладочного массива. Таким образом, логистическая система подземного рудника представляет собой сложную и многоуровневую структуру, где каждый компонент системы взаимодействует с другими, формируя единую цепь технологических процессов. Все процессы в цепи направлены на достижение общей цели — обеспечение эффективной и непрерывной и безопасной эксплуатации месторождения, что является основой для создания цикличного и безотходного производства.

После установления единой и четкой терминологии логистической системы и схем, а также структуры технологических процессов, связанных с ведением

закладочных работ в условиях подземной разработки соляных месторождений, особенно важным становится систематизация наработанных понятийных рядов.

В этой связи предложена классификация логистических схем ведения закладочных работ при разработке соляных месторождений. В соответствии с представленной классификацией все логистические схемы делятся на три крупных класса, различающихся по способу транспортирования закладочных материалов и смесей. Классификация также учитывает специфику закладочных материалов, используемых средств механизации, глубину залегания месторождения, а также описание каждого класса с указанием максимально допустимого расстояния транспортирования [117]. Отличительной особенностью классификации логистических схем ведения закладочных работ при разработке водорастворимого минерального сырья является обязательное наличие модуля обезвоживания закладочной смеси, обусловленное высокими требованиями к стабильности свойств закладочного массива и его долговечности в условиях воздействия подземных вод, характерных для соляных месторождений, который, кроме того, напрямую влияет на транспортабельные характеристики возвратного минерально-сырьевого потока (табл. 2.1).

I класс предусматривает механизированный-циклический способ транспортирования. Этот класс характеризуется использованием механических средств для транспортирования закладочного материала. Модуль обезвоживания располагается на поверхности или в подземных камерах и предусматривает термическую обработку смеси. Термическая сушка позволяет добиться нужного уровня влажности перед транспортировкой материала к месту укладки, способствует активации вяжущих свойств солеотходов. Логистические схемы данного класса подразделяются на две группы – 1.1 и 1.2:

Группа 1.1 предусматривает циклическую схему транспортирования солеотходов, либо готовой закладочной смеси. В этом случае модуль обезвоживания располагается на поверхности, где используется термическая обработка. Данная схема применима для месторождений с глубиной залегания до 500 м, а максимальное расстояние транспортирования составляет до 3 км.

Группа 1.2 – циклично-поточная схема транспортирования. В этой схеме предварительно обезвоженные до требуемых по условиям перемещения значений солеотходы транспортируются по вертикальным трубопроводам с гасителями скорости до промежуточных бункеров. Затем смесь поступает на конвейеры и транспортируется до закладочных выработок с использованием погрузчиков и бульдозеров. Данная схема применима для месторождений с глубиной залегания до 1000 м и максимальным расстоянием транспортирования по подземным выработкам, как правило, до 5 км.

II класс – циклично-поточный способ транспортирования. Этот класс использует комбинацию гидравлических и механизированных средств для транспортирования закладочных материалов в виде пульпы с требуемым содержанием влаги. Обезвоживание закладочной смеси осуществляется непосредственно в подземных условиях с применением передвижных закладочных комплексов (ППЗК). В таких схемах может быть предусмотрена поточная и циклично-поточная технология. в границах влагоотдачи. Схемы данного класса подразделяются на две группы:

Группа 2.1 – поточная схема транспортирования. В этой схеме закладочный материал транспортируется в пульпе с использованием трубопроводов и пневмоврезок. Сбор излишних рассолов обеспечивается за счет гидроизоляции днища камер. Данная группа применима для месторождений с глубиной залегания до 1000 м и максимальным расстоянием транспортирования до 10 км. Группа 2.2 – циклично-поточная схема транспортирования. В этой схеме, помимо трубопроводов и пневмоврезок, используются метательные машины и пневмонасосы. Обезвоживание закладочного материала происходит на гидроциклоне. Эта схема применима для месторождений с глубиной залегания до 1200 м и максимальным расстоянием транспортирования до 15 км.

Таблица 2.1 - Классификация логистических схем ведения закладочных работ при разработке соляных месторождений и анализ средств механизации

Класс	Вид транспортирования	№ группы	Схема транспортирования	Способ транспортирования по стволу	Модуль обезвоживания	Условия обезвоживания закладочной смеси	Средства механизации, доставки и укладки смеси	Описание	Расстояние транспортирования
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	механизированный-циклический	1.1.	циклическая	принудительный	поверхностный	термический	скип, пдм, самоходные вагоны	транспортирование сухого закладочного материала в биг-бэгах с последующей транспортировкой ПДМ до закладываемых выработок	до 10 км
		1.2.	циклично-поточная	самотечный			трубопровод, гасители, конвейеры, погрузчики, бульдозеры	предварительно обезвоженные солеотходы перепускаются по трубопроводу с гасителями скорости в промежуточный бункер, с последующим перепуском на конвейер и далее транспортируются до закладочных выработок	до 10 км
II	циклично-поточный	2.1.	поточная	самотечный	подземный	гидроизоляция днища камеры	трубопровод, пневмоврезки	транспортирование закладочного материала в пульпе с минимальным соотношением влаги до выработанного пространства, отжим рассолов производится за счет гидроизоляции днища камер	до 10 км
		2.2.	циклично-поточная	самотечный		гидро-циклонированием	трубопровод, пневмоврезки, метательные машины, пневмонасосы	транспортирование закладочного материала в пульпе с минимальным соотношением влаги до выработанного пространства, дальность транспортирования обеспечивается пневмоврезками, отжим рассола производится на гидроциклоне	до 15 км
III	гидравлический-поточный	3.1.	поточная	самотечный		сбор рассолов	трубопровод, пневмоврезки	транспортирование закладочного материала производится по принципам движения воды, обезвоживание закладочной смеси производится за счет естественного обезвоживания и сбором рассолов в приямок	до 20 км

III класс – гидравлический-поточный способ транспортирования. В этом классе закладочный материал транспортируется по трубопроводам с использованием воды в качестве транспортной среды. Этот класс представлен группой 3.1:

Группа 3.1 – поточная схема транспортирования. Третий класс, представляющий гидравлический способ транспортирования, также включает обязательный модуль обезвоживания, но его функция реализуется посредством применения систем перемычек и экранизации естественное обезвоживание, сбора отжимных рассолов. Применима для месторождений с глубиной залегания до 1200 м и максимальным расстоянием транспортирования до 20 км.

В зависимости от специфики и условий каждого конкретного месторождения схемы могут трансформироваться с применением индивидуального подхода и использования современных методов механизации и автоматизации для повышения эффективности закладки. Исходя из вышеизложенного, требуется разработка методики определения параметров логистической схемы подземного рудника с закладкой.

2.2. Методика определения параметров логистической схемы подземного рудника с закладкой.

Как и любая система, логистическая система подвержена влиянию внешней среды, поэтому необходимо учитывать горно-геологические и производственно-организационные условия рудника. Особое внимание следует уделить физико-механическим характеристикам возвратных минерально-сырьевых потоков, которые учитываются при создании математической и имитационной модели, и определяются исключительно лабораторными методами, а также горно-геологическим условиям, которые исследуются в полевых условиях (рис 2.3).

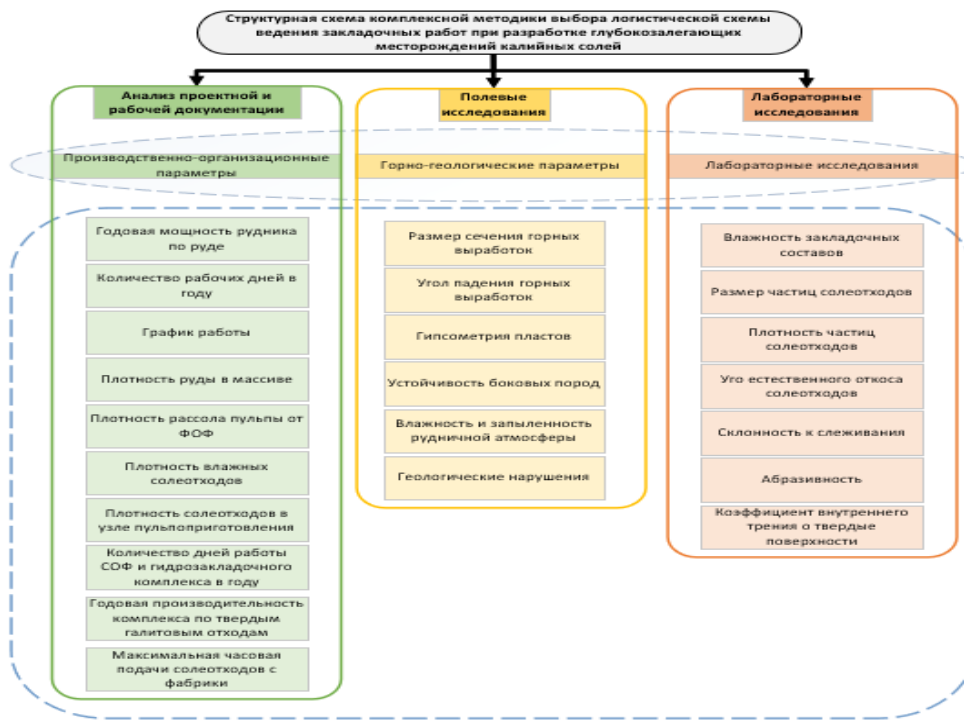


Рисунок 2.3 - Структурная схема методики выбора логистической схемы ведения закладочных работ

Для точного построения математической модели и корректной верификации составляющих имитационной модели был разработан комплекс программ и соответствующих методик включая:

- исследование физико-механических свойств компонентов закладочной смеси с целью оценки ее реологических характеристик при транспортировании по поверхности и подземным выработкам;
- исследование корреляции нагрузки и влажности на слеживаемость закладочной смеси, а также исследование показателей абразивности для обеспечения безаварийной работы средств механизации;
- анализ влияния производственно-организационных и горно-геологических факторов на параметры логистической схемы ведения закладочных работ при подземной разработке калийных месторождений.

Комплекс работ по оценке физико-механических свойств включает ряд лабораторных исследований: влажности закладочных смесей, фракционного состава, насыпной и истинной плотности, сцепления и угла естественного откоса, слеживаемости, абразивности, коэффициента внутреннего трения о твердые несущие поверхности.

В исследованиях влажность образцов кернов определялась сразу после вскрытия и обрезки кернов, на влагомере путем высушивания истертой навески, массой 30 г до постоянной массы. Для задания необходимой влажности солеотходам, они предварительно высушивались до условно воздушно-сухого состояния в сушильном шкафу при температуре до 105°C, чтобы удалить всю свободную влагу. После охлаждения в эксикаторе солеотходы взвешивают на аналитических весах, используя тарированную посуду, для определения базовой массы. Затем, расчетное количество дистиллированной воды равномерно распыляется над солеотходами с помощью тонкодисперсного распылителя. Необходимая масса добавления воды с целью получения требуемой для консолидации закладочной смеси рассчитывается по формуле:

$$m_{\text{вода}} = \frac{m_{\text{сухое вещество}} \times W}{100}, \text{ г} \quad (2.1)$$

где $m_{\text{вода}}$ — масса добавляемой воды или рассола, г; $m_{\text{сухое вещество}}$ — масса обезвоженных солеотходов, г; W — желаемая влажность, %.

После увлажнения солеотходы тщательно перемешиваются и повторно взвешиваются для контроля достигнутой влажности.

В настоящем исследовании основным условно сухим материалом, для использования в составе закладочной смеси обезвоженные до 0,05% солеотходы, а солеотходы Гремячинской обогатительной фабрики со средней влажностью 7,6 % при допустимой верхней границе - 9%. Поэтому, в случае принятия решения об использовании для производства закладочных смесей обезвоженных условно сухих солеотходов, так как при влажности 6% и выше резко ухудшаются транспортная характеристика солеотходов [113], необходимо определить способ их дополнительного обезвоживания до влажности 5% и менее [75].

Насыпная плотность смеси для прогнозирования поведения при перемещении и укладке и нагрузки на транспортные механизмы определялась согласно ГОСТ 32721—2014 [56]. Применялись: весы электронные поверенные, сито с ячейками размером 4 мм, сосуд металлический цилиндрической формы вместимостью 1 дм³, линейка металлическая, совок металлический (рис. 2.4).

Насыпная плотность определялась путем взвешивания солеотходов в мерном сосуде. Подготовленные обезвоженные солеотходы просеивались на сите. На электрических весах тарировался мерный сосуд. При помощи совка сосуд заполнялся солеотходами с высотой от верхнего ободка +3 см (рис. 2.4, в). С помощью металлической линейки аккуратно удалялся излишек солеотходов вровень с верхним ободком цилиндрического сосуда движением к себе (рис. 2.4, г). Удаление лишнего материала проводилось без уплотнения. После чего сосуд с солеотходами взвешивался (рис. 2.4, е). Насыпную плотность солеотходов определяли по формуле

$$\rho = m/V, \text{ г/см}^3 \quad (2.2)$$

где m – масса тарированного сосуда с пробой, г; V – объем сосуда, см^3 .

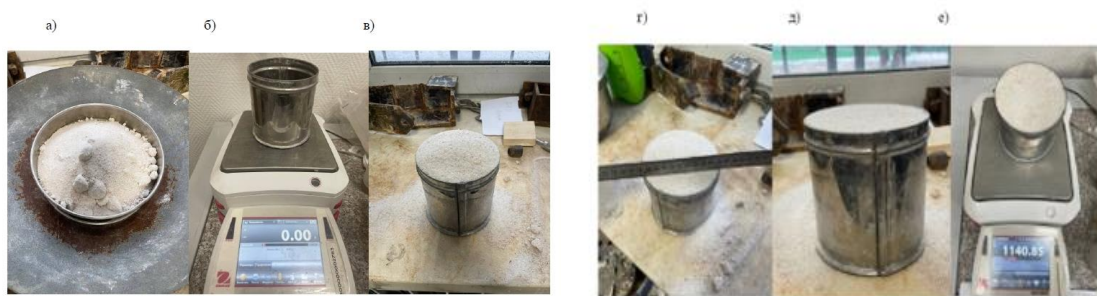


Рисунок 2.4 - Ход выполнения работы по определению насыпной плотности солеотходов: а) пропуск солеотходов через сито; б) тарирование мерного сосуда; в) заполнение сосуда на 3 сантиметра выше от верхнего обода сосуда; г) удаление излишка солеотходов; д) аккуратно без утрамбовки заиленный сосуд; е) взвешивание тарированного сосуда с солеотходами

Размер частиц определяет возможность их перемещения в различных видах транспорта, включая конвейеры, трубопроводы и другие средства механизации и определялся согласно ГОСТ 12536-2014.

В ходе начального этапа исследований гранулометрического состава солеотходов было установлено, что рассев их сухим способом не дает результативности, ввиду значительной агрегированности минеральных зерен. В этой связи гранулометрический состав солеотходов был изучен методом мокрого ситового анализа на автоматической просеивающей машине EML 200 при непрерывной подаче оборотного рассола обогатительной фабрики на верхнее сито. Отвод и сбор рассола после нижнего сита с размером ячеек 0,044 мм производился также непрерывно через специально предназначенное для проведения мокрого

анализа днище (рис.2.5). Остатки на ситах после полного дренирования высушивались в сушильном шкафу до достижения постоянной массы, затем взвешивались непосредственно на сите. Масса каждого класса крупности определялась путем оценки разницы массы сита с материалом и массы самого сита.

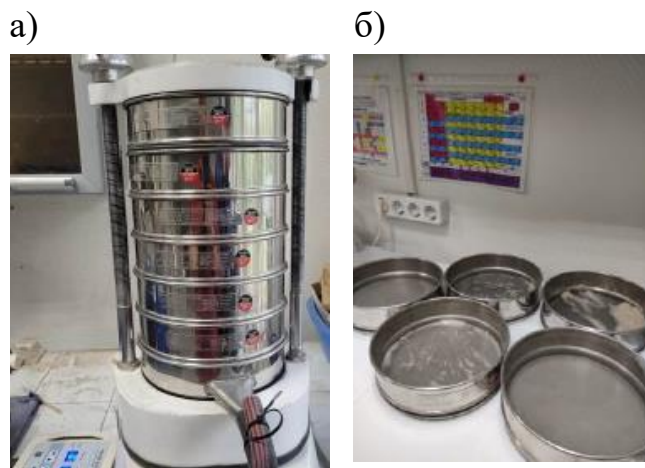


Рисунок 2.5 - Просеивающая машина EML 200 с возможностью непрерывного отвода рассола (а) и остатки на ситах после проведения отсева при мокром ситовом анализе (б)

Для оценки степени уплотнения сухого закладочного материала под воздействием нагрузок, полученных в ходе его спуска в трубопроводе в условиях глубин залегания соляных месторождений, превышающих 1000 м, были проведены экспериментальные исследования на смеси солеотходов с влажностью 8% (соответствует средней текущей влажности солеотходов Гремячинской обогатительной фабрики), 5% (в соответствии с оптимальными условиями пневматического транспортирования смеси и консолидации в закладываемых камерах) и 0,05% (условно сухая смесь). Методика испытаний заключалась в следующем:

- производилось равномерное заполнение стандартных форм, с размером граней 70×70×70 мм, подготовленным составом смеси требуемой влажности, массой 365 г. Верхняя открытая грань накрывалась металлической пластиной, размером 70x70x10 мм, которая в дальнейшем служила опорой для равномерной передачи нагрузки от гидравлического пресса на исследуемый образец смеси солеотходов;

– образцы устанавливались под гидравлический пресс Instron-300DX с программным обеспечением Bluehill (рис.2.6, а), которым задавалось перемещение опорной пластины с шагом 5, 10 и 15 мм. Схема нагружения образца представлена на рис. 2.6, б;

– далее производилась проверка степени уплотнения образца на специально созданной установке (рис.2.7), принцип работы которой базируется на принципах работы пенетрометра, где производилась фиксация степени заглубления в образец спицы, диаметром 3 мм, отпущенной с заданной высоты.

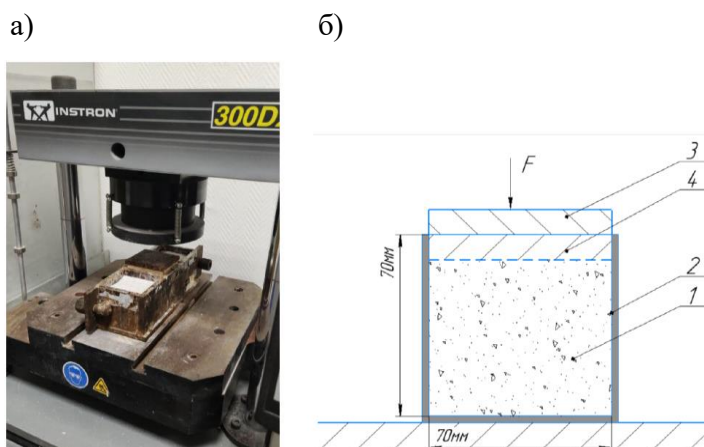


Рисунок 2.6 - Схема нагружения образца в испытательном комплексе Instron при заданном перемещении: 1 – образец сухой части закладочной смеси; 2 – кубическая форма; 3 – исходное положение опорной пластины; 4 – конечное положение пластины; F – вертикальная сила сдвливания

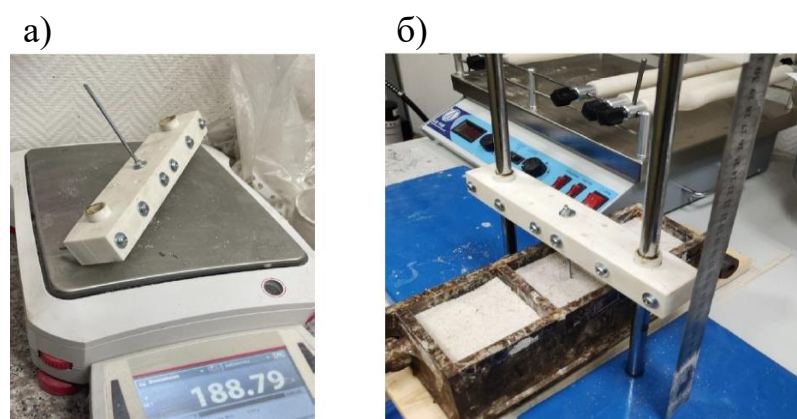


Рисунок 2.7 - Установка для определения степени уплотнения солеотходов в кубической форме: а – напечатанная на 3Д принтере горизонтальная траверса с установленной в нее спицей; б – установка на направляющих и с измерительной шкалой перемещения траверсы

Для сравнительной оценки степени уплотнения солеотходов различной влажности был проведен следующий этап испытаний, предусматривающий комплекс работ:

- подвижная платформа разработанного измерительного устройства выставлялась в горизонталь по уровню или отвесу. Вдоль направляющих устанавливалась линейка, фиксирующая перемещение платформы;

- измерялась начальная точка контакта спицы с испытуемым образцом, нагруженным под прессом. Результаты испытаний заносятся в сводную таблицу опыта как «нулевая точка». Для уменьшения значения коэффициента трения о стенки мерного сосуда при перемещении движущей части направляющие стержни смазывались.

Для оценки возможности перемещения материала на конвейерном транспорте и выбора максимально допустимого угла подъема или спуска конвейерного транспорта определялся угол естественного откоса солеотходов в условно воздушно-сухом состоянии в соответствии с методикой РСН 51-84.

Угол естественного откоса сыпучего материала в покое (ϕ_1) коррелирует с углом естественного откоса в движении (ϕ) формуле:

$$\phi = (0,35 \dots 0,7) \phi_1, ^\circ \quad (2.3)$$

Для определения угла естественного откоса солеотходов использовалась специальная установка каретка (рис.2.8), состоящая из лотка с регулируемым углом наклона, емкости для засыпки материала, линейки или транспортира для измерения угла естественного откоса испытуемого материала. Перед началом измерений смесь солеотходов предварительно обезвоживалась до влажности 0,05%.



Рисунок 2.8 - Каретка для определения угла естественного откоса

Затем материал медленно высыпался в горизонтально расположенный лоток, образуя равномерную насыпь без крутых скатов. Лоток постепенно наклонялся на угол 45, пока не начинается скольжение материала. В этот момент фиксировался угол наклона между поверхностью лотка и горизонтальной плоскостью, который определялся как угол естественного откоса материала. Процедура повторялась 3 раза с новыми порциями материала для обеспечения достоверности результатов эксперимента, а окончательное значение угла определялось как среднее из трех измерений.

Абразивность - это горно-технологическое свойство, характеризующее способность горной породы изнашивать контактирующие с ней поверхности, оно является необходимой характеристикой для оценки рисков применения горнотранспортных и горнопроходческих машин. Поскольку не существует государственного стандарта для определения абразивности горных пород, а проведение натурных экспериментов с горным оборудованием оказалось невозможным в рамках данного исследования, был применён метод определения абразивности по истиранию стального стержня, разработанный проф. Л.И. Бароном и А.В. Кузнецовым [89].

Суть метода заключается в следующем: торец цилиндрического стального стержня истирался о необработанную поверхность образца закладочного материала на основе слесотходов породы при вращении его вокруг продольной оси, после чего измерялся износ стержня. Испытание проводилось на специальной установке, оборудованной на базе обычного сверлильного станка с незначительными конструктивными изменениями. Истирание стержня производилось при осевой нагрузке 15 кг при скорости вращения образца 400 об/мин. В качестве образцов использовались штучные куски породы, весом 0,1-2 кг. Стержень взвешивался на аналитических весах с точностью до 0,1 мг, до и после испытания. Критерием абразивности горной породы служила потеря веса стержня, выраженная в миллиграммах, за стандартное время испытания — 10 минут.

Показатель абразивности горной породы вычислялся на основании результатов опытов по следующей формуле:

$$a = \frac{\sum_1^n q_1}{2n}, \text{ мг} \quad (2.4)$$

где, q_1 — потеря в весе эталонного стержня за каждый парный опыт (истирание сначала одного, а затем другого конца стержня), мг; n — число парных опытов.

Производственно-организационные параметры логистической схемы закладочных работ на калийном руднике определяются на основе комплексного анализа проектной документации и горно-геологических условий месторождения, в соответствии с разработанным перечнем характеристик, представленных в таблице 2.2 [93].

Таблица 2.2 - Основные производственно-организационные параметры калийного рудника, влияющие на выбор логистической схемы закладки.

№ п.п.	Параметр	Обозначение	Размерность
1	годовая мощность рудника по руде	$Q_{\text{руд}}$	млн т/год
2	количество рабочих дней в году	$T_{\text{д}}$	д
3	количество рабочих часов в сутки	$t_{\text{с}}$	ч
4	плотность минерального сырья в массиве	$\rho_{\text{м}}$	кг/м ³
5	плотность рассола в пульпе	$\rho_{\text{р}}$	кг/м ³
6	плотность влажных солеотходов	$\omega_{\text{х}}$	кг/м ³
7	плотность солеотходов в узле пульпоприготовления	$\rho_{\text{с}}$	кг/м ³
8	количество дней работы соф и гидрозакладочного комплекса в году	$n_{\text{дн}}$	дней
9	годовая производительность комплекса по твердым галитовым отходам	$Q_{\text{год т1}}$	млн т/год
10	максимальная часовая подача солеотходов с фабрики	$t_{\text{сс}}$	млн т/ч

К основным горно-геологическим факторам, оказывающим решающее значение на выбор логистической схемы ведения закладочных работ, относятся: размер и площадь сечения, длина горных выработок, уклон горных выработок, гипсометрия пластов, устойчивость боковых пород и наличие геологических нарушений (табл. 2.3).

Измерение размера сечения горных выработок проводилось в два этапа: подготовительный и полевой. На подготовительном этапе выполнялось изучение геологической документации участка. Полевой этап включал непосредственные измерения в горных выработках. Для проведения работ был выбран прямой метод измерения, поскольку имелся непосредственный доступ к выработкам. Измерения проводились с помощью комплекта оборудования, включающего рулетку,

лазерный дальномер и маркшейдерскую рейку. Первоначально зачищались кровля и почва пласта. Затем выполнялись замеры мощности в направлении перпендикулярно к кровле и почве пласта. Всего проводилось 3 измерения в трех выработках – транспортный штрек, конвейерный штрек и у призабойного пространства, по три измерения в каждой выработке.

Таблица 2.3 - Основные горно-геологические факторы Гремячинского ГОКа, влияющие на выбор логистической схемы закладочных работ.

№ п.п.	Фактор	Обозначение	Влияние на транспортную схему
1	размер сечения и длина горных выработок	M _п	влияет на вид, тип и типоразмер шахтного транспортного оборудования и производственной мощности рудника
2	угол падения горных выработок	α	ограничивает сферу применения транспортных средств; влияет на выбор типа конвейеров
3	гипсометрия пластов	G _п	влияет на криволинейность выработок и выбор числа конвейеров
4	устойчивость боковых пород	K _у	влияет на выбор конструктивного исполнения стационарных транспортных установок
5	влажность и запыленность, рудничной атмосферы	W, D	влияет на показатели надежности шахтного транспортного оборудования
6	геологические нарушения	F _г	могут вызвать сбои в работе транспортного оборудования и требуют особого подхода к планированию горных работ

Определение угла падения пластов проводилось с использованием высокоточных теодолита. С помощью нивелирных реек измерялись превышения высот между точками кровли и почвы пласта, а расстояние между ними определялось рулеткой или дальномером теодолита. Затем выполнялся расчет угла падения.

Измерение запыленности воздуха проводилось с использованием прибора ПКА-01 (рис.2.10). Точки измерения выбирались в узлах сосредоточения горнопроходческой техники и в конвейерных галереях прямых грузопотоков. В каждой выбранной точке выработки производился отбор пробы, время отбора пробы устанавливалось в зависимости от предполагаемой концентрации пыли и обычно составляло 2-5 минут, либо до остановки прибора из-за засорения фильтра, что свидетельствует о сверхвысокой запыленности. После каждого измерения фиксировались показания прибора, включая массу уловленной пыли и объем

прокачанного воздуха. Для повышения достоверности результатов измерений в каждой точке проводилось не менее трех последовательных замеров.



Рисунок 2.10 - Измерение запылённости воздуха прибором ПКА-01 в условиях Гремячинского ГОКа.

Для проведения исследований по определению температуры и влажности рудничного воздуха использовались портативные приборы: электронный термометр AR - 360 и гигрометр Benetech GM1362 (рис.2.11). С участием специалистов Гремячинского рудника были определены ключевые участки рудника для проведения измерений, включая рабочие зоны, тупики и вентиляционные выходы.

а)



б)



Рисунок 2.11 - Электронный термометр AR – 360 (а) и гигрометр Benetech GM1362 (б)

Для измерения температуры воздуха электронный термометр размещался на высоте 1,5–2 м от уровня почвы выработки в каждой точке замеров. После стабилизации показаний прибора продолжительностью 1–2 минуты, фиксировались показания температуры. Измерения проводились по всей сети выбранных участков. Аналогичный принцип измерения проводился для определения относительной влажности с помощью гигрометра Benetech GM1362.

Для определения геологических нарушений на наиболее опасных участках горных выработок, подверженных структурным нарушениям, таких как зоны разломов, концентрации тектонических напряжений и участков с активным обрушением пород, был проведен визуальный осмотр выработок. В ходе этого осмотра фиксировались видимые признаки геологических нарушений, включая трещины, смещения, обвалы пород, проседания и вздутия почвы, прогибы и изломы.

Таким образом, выбор рациональной логистической схемы закладочных работ должен производиться на основе разработанной методики с учетом влажности, а также оценки влияния динамических нагрузок при транспортировании на физико-механические свойства солеотходов с математическим моделированием процесса перепуска смеси по вертикальному закладочному трубопроводу для снижения риска консолидации солеотходов в перегрузочных узлах и их закупоривания. На основе выявленных ранее характеристик и условий эксплуатации рудника был разработан математический аппарат для моделирования процессов перемещения возвратного минерально-сырьевого потока.

2.3. Математический аппарат расчета рациональных параметров логистической схемы подземного рудника с закладкой

Математические модели газо-, гео- и гидродинамики широко используются в науке и технике и являются базой для исследования природных явлений и технологических процессов. Основой традиционных моделей вычислительной гидродинамики (CFD) являются законы сохранения массы, импульса и энергии сплошной среды. В случае вязкой среды эти законы записываются в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных, называемых уравнениями Навье — Стокса. Система включает в себя уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \rho v = 0, \quad (2.5)$$

где ρ – плотность среды, кг/м^3 , t – время, v – скорость среды; а также уравнение движения жидкости:

$$\rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v \right] = -\nabla p + \eta \Delta v + \rho f \quad (2.6)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; $v = (u, v, w)$ – вектор скорости потока; ∇p – градиент давления; η – динамическая вязкость, Па·с; f – внешние силы (например, сила тяжести ρg), Н.

Основой всех численных методов является математическая модель, состоящая из системы дифференциальных или интегро-дифференциальных уравнений в частных производных с учетом граничных условий и критериев оптимальности, описывающих конкретную задачу. В зависимости от уровня, на котором происходит описание моделей и задач, применяются различные вычислительные методы. Разделяют макроскопический, микроскопический и мезоскопический уровни моделирования. На макроскопическом уровне, как правило, среда рассматривается как сплошная. К уравнениям, описывающим подобные задачи, относятся упомянутые выше уравнения Навье — Стокса.

Параметры закладочных трубопроводов и расход закладочной смеси в уравнениях определяются, исходя из значения рабочей скорости перемещения смеси $v_{\text{раб}}$, м/с, которая зависит от значения ее критической скорости движения $v_{\text{кр}}$, м/с.

Критическая скорость закладочной пульпы – скорость, при которой содержащиеся в несущей жидкости взвешенные твердые частицы не выпадают из потока и не нарушается режим ламинарного движения смеси. Значение критической скорости движения смеси показывает, при какой скорости движения смеси будет происходить заиливание трубопровода ($v_{\text{раб}} < v_{\text{кр}}$) или иначе происходить потеря стабильного процесса движения пульпы ($v_{\text{раб}} > v_{\text{кр}}$). Поэтому рекомендуется подбирать трубопровод, а именно его условный проход (внутренний диаметр) так, чтобы его заполнение закладочной смесью было таким, чтобы обеспечивалось превышение рабочей скорости на уровне около 10 %:

$$v_{\text{раб}} = 1,1 \cdot v_{\text{кр}}, \text{ м/с} \quad (2.7)$$

Согласно «Пособию по проектированию гидравлического транспорта (к СнИП 2.05.07-85)» [102], критическая скорость движения смеси зависит от гранулометрического состава твердой фракции в перемещаемой массе, а также

плотности фракций в пульпе и внутреннего диаметра трубопровода. Для упрощения расчетов, параметры, описывающие физико-механические характеристики смеси сводятся к определению коэффициента k и тогда выражение для определения критической скорости имеет следующий вид:

$$v_{кр} = k \cdot D_{вн}, \text{ м/с} \quad (2.8)$$

где k - коэффициент, характеризующий физико-механические характеристики гидросмеси, для солевой пульпы $k_1=10,58$; $D_{вн}$ - максимальный внутренний диаметр участка пульпопровода, м

Для определения критической и соответствующей рабочей скорости движения закладочной смеси необходимо первоначально задаться внутренним диаметром трубопровода и определить расход смеси по формуле:

$$Q_{ч.п} = v_{раб} \cdot \frac{\pi \cdot D_{вн}^2}{4} \cdot 3600, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (2.9)$$

Затем проверяются значения полученных критической ($v_{кр}$) и рабочей ($v_{раб}$) скорости по формулам (2.8) и (2.7). В случае, если рабочая скорость будет меньше критической скорости в каждом из них, эти значения сравниваются с рассчитанной ранее рабочей скоростью. В случае несоответствия критической скорости выбирается другой диаметр трубопровода, и расчет производится на новых условиях.

Рабочая скорость по требуемому расходу закладочной смеси для обеспечения годовой производительности трубопроводного транспорта, $v_{раб}$, м³/ч, рассчитывается по преобразованной формуле (2.9) и описывается выражением:

$$v_{раб} = \frac{4Q_{ч.п}}{3600\pi \cdot D_{вн}^2}, \text{ м/с} \quad (2.10)$$

Для гидромеханизированного вида транспортирования закладочного материала по трубопроводам используются математические модели, которые учитывают основные физико-механические свойства материала и параметры транспортной системы, а также для оценки их эксплуатационных характеристик. Для определения пропускной способности трубопровода необходимо рассчитать площадь его поперечного сечения, что выполняется по формуле:

$$S = \pi R^2, \text{ м}^2 \quad (2.11)$$

где S — площадь поперечного сечения трубы, м²; R — радиус трубы, м.

Скорость движения материала по вертикальному трубопроводу зависит от силы тяжести и коэффициента трения и рассчитывается по формуле:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h}{1 + \mu}}, \text{ м/с} \quad (2.12)$$

где v — скорость движения, м/с; g — ускорение свободного падения, м/с²; h — высота трубопровода, м; μ — коэффициент трения материала о стенки трубы.

Для оценки нагрузки на трубопровод рассчитываются силы трения и силы тяжести на единицу длины трубы:

$$F_{\text{тр}} = \mu \times p \times g \times S, \text{ Н} \quad (2.13)$$

где $F_{\text{тр}}$ — сила трения, Н; p — насыпная плотность материала, кг/м³.

Расчёт производительности спуска материала через вертикальный трубопровод с коэффициентом заполнения 0,25 производится по формуле:

$$Q = v \cdot S \cdot \rho \cdot \psi, \text{ т/ч} \quad (2.14)$$

где Q — производительность, т/ч; v — скорость движения материала, м/с; ψ — коэффициент заполнения трубопровода.

Если движение частиц солеотходов не описывается свободным падением, то оно приобретает более сложный характер, связанный с множеством факторов, которые существенно влияют на кинетику системы. В таком случае движение сыпучего материала через вертикальный трубопровод становится процессом, подчиняющимся специфическим физическим закономерностям, отличным как от течения жидкостей, так и от движения газов. Для обеспечения стабильной работы системы выполнен расчёт производительности вертикального трубопровода, учитывающий ключевые факторы, влияющие на процесс транспортирования. Среди них: трение между стенками трубопровода и частицами материала; сопротивление воздуха в трубе, обусловленное невентилируемостью системы; потери напора, связанные с длиной трубопровода и характеристиками транспортируемого материала.

Для расчёта движения сыпучего материала в вертикальном трубопроводе можно использовать модели, учитывающие трение и свойства материала. Одним из подходов является использование теории псевдосжиженного слоя или методов расчёта массового расхода через вертикальные шахты и бункеры [41].

Метод расчёта с использованием уточнённой формулы массового расхода сыпучего материала в вертикальной трубе с учетом коэффициента трения и сопротивления воздуха. Диаметр трубоспуска зависит от необходимой производительности и определяется по формуле:

$$D_{\text{труб}} = \sqrt{\frac{Q_c}{2826 \cdot v_{\text{вх}} \cdot \rho_n \cdot \psi}}, \text{ м} \quad (2.15)$$

где $D_{\text{труб}}$ — диаметр трубоспуска, м; Q_c - подача солеотходов, т/ч; $v_{\text{вх}}$ - скорость солеотходов на входе в трубоспуск, м/с; ρ_n — насыпная плотность солеотходов, т/м³; ψ — коэффициент заполнения трубы.

Коэффициент ψ обычно принимают 0,9. Входную скорость на действующих трубоспусках принимают 1,5–2,0 м/с.

Теоретические основы движения сыпучего материала по вертикальным трубоспускам пока разработаны недостаточно. Согласно предложенной схеме, материал в трубоспуске разгоняется за счет разрежения, создаваемого в трубе, при этом сопротивление воздуха постепенно снижает его скорость. Для перехода от вертикального трубопровода к ленточному конвейеру необходимо обеспечить плавное падение обезвоженных солеотходов на транспортное средство. Это предотвращает повреждение ленты и проблемы с транспортировкой, особенно при высокой влажности материала, минимизируя риски уплотнения и закупоривания потока.

Для конвейеров длиной до 30–50 м скорость ленты должна быть не более 2 м/с, в противном случае при транспортировании ряда грузов возникает проблема уборки просыпи [78], так как при длине конвейеров более 50 метров, согласно формуле:

$$Q = v \cdot \rho_n \cdot k \cdot k\beta \cdot \left(\frac{B}{1,1} - 0,05 \right)^2, \text{ т/с} \quad (2.16)$$

где B — ширина ленты, м; Q — производительность конвейера, т/с; v — скорость ленты, м/с; ρ_n — насыпная плотность материала, т/м³; k — коэффициент, зависящий от угла естественного откоса материала; $k\beta$ — коэффициент, зависящий от угла наклона конвейера.

Формула объёма бункера, исходя из минимальной производительности конвейера и разницы с производительностью трубопровода выглядит следующим образом:

$$V_6 = (Q_T - Q_K) \cdot t_3, \text{ м}^3 \quad (2.17)$$

Бункер ограничен по высоте выработок околоствольного двора: $h \leq 5 \text{ м}$; верхний радиус (R_1): 5 м для устойчивой формы; Нижний радиус (R_2) 0.2 м. Угол наклона стенок нижней части бункера для предотвращения залипания материала относительно горизонтали должен быть больше угла естественного откоса материала φ_1 . При проектировании используют эмпирическое правило [65]:

$$(90^\circ - \varphi_1 + 1) \geq \varphi_{\text{стенки}} \quad (2.18)$$

где $\varphi_{\text{стенки}}$ - угол наклона стенок нижней части бункера, °.

Объём бункера:

$$V_{\text{геом}} = \frac{1}{3} \pi h (R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2), \text{ м}^3 \quad (2.19)$$

Для согласования объёма бункера с производительностью трубопровода решим уравнение 2.17 относительно Q_T :

$$V_6 \geq (Q_T - Q_K) \cdot t_3 \quad (2.20)$$

$$Q_T = Q_K + \frac{V_6}{t_3}, \text{ м}^3 \quad (2.21)$$

Объём бункера, необходимый для нового режима:

$$Q_T = V_6 \times t_3 + Q_K, \text{ м}^3 \quad (2.22)$$

Расчет рациональных параметров логистической схемы подземного рудника с применением механизированного оборудования циклического действия основывается на математическом моделировании согласованной работы средств механизации с обеспечением требуемой производительности.

Определение типа скиповой установки, обеспечивающей перемещение заданного объема солеотходов, производится в следующей последовательности:

1. Часовая производительность подъема:

$$Q_{\text{ч}} = \frac{K_H A_{\text{Г}}}{N t_{\text{П}}}, \text{ т/ч}, \quad (2.23)$$

где $K_H = 1,15 \div 1,25$ - коэффициент неравномерности работы подъема; $A_{\text{Г}}$ – годовая производственная мощность шахты, т/год; N - число рабочих дней в году; $t_{\text{П}}$ - продолжительность работы подъема в сутки, ч.

2. Максимальная скорость движения гружёного скипа по стволу:

$$V_{\max} \leq 0,4\sqrt{H}, \text{ м/с}, \quad (2.24)$$

$$H = H_{\text{ст}} + h_{\text{п}}, \text{ м}, \quad (2.25)$$

где H - высота подъема, м; $H_{\text{ст}}$ - глубина ствола шахты, м; $h_{\text{п}}$ - высота приемной площадки над устьем ствола, м.

3. Средняя скорость движения скипа:

$$V_{\text{ср}} = V_{\max}/1,4, \text{ м/с}, \quad (2.26)$$

4. Продолжительность движения скипа за один подъём по стволу с учетом ускорения и замедления:

$$t_{\text{ск}} = \frac{H}{V_{\text{ср}}} + 25, \text{ с}, \quad (2.27)$$

5. Продолжительность одного цикла подъёма:

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{ск}} + \Theta, \text{ с}, \quad (2.28)$$

где Θ – продолжительность паузы на загрузку и разгрузку скипа.

6. Число подъёмов в час:

$$n_{\text{ч}} = 3000 / t, \text{ шт.} \quad (2.29)$$

7. Грузоподъёмность скипа:

$$q_{\text{ск}} = Q_{\text{ч}} / n_{\text{ч}}, \text{ т.} \quad (2.30)$$

8. Вместимость скипа

$$V_{\text{ск}} = q_{\text{ск}} \cdot K_{\text{р}} / \rho, \text{ м}^3, \quad (2.31)$$

где $K_{\text{р}}$ - коэффициент разрыхления полезного ископаемого или породы; ρ - плотность породы, т/м³.

Расчет основных параметров самоходного оборудования, используемого для доставки фасованного закладочного материала от скипа до места его укладки производится в следующей последовательности: находится эксплуатационная сменная производительность (т) одной транспортной машины:

$$Q_{\text{с}} = 60 V_{\text{куз}} k_{\text{з.к}} \gamma T_{\text{см}} k_{\text{н}} / (t_{\text{р}} k_{\text{и}}) \quad (2.32)$$

где $T_{\text{см}}$ — длительность смены, ч; $V_{\text{куз}}$ — вместимость кузова, м³; $k_{\text{з.к}}$ — коэффициент заполнения кузова (для самоходных вагонов - $k_{\text{з.к}} = 0,8$); γ — насыпная плотность горной массы, т/м³; $k_{\text{н}}$ — коэффициент неравномерности грузопотока, равный 1,5 и 1,25, соответственно, при отсутствии и наличии аккумулялирующей емкости; $k_{\text{и}} = 0,7 \div 0,8$ — коэффициент использования машины; $t_{\text{р}}$ - продолжительность одного рейса транспортной машины, мин.

Продолжительность (мин) одного рейса транспортной машины:

$$t = t_{\text{погр}} + t_{\text{дв}} + t_{\text{раз}} + t_{\text{м.з}} + t_{\text{м.р}} + t_{\text{разм}} \quad (2.33)$$

Время $t_{\text{п}}$, затрачиваемое на погрузку машины, зависит от ее грузоподъемности и производительности средств погрузки.

При работе комплекса с погрузочной машиной непрерывного действия время погрузки (мин):

$$t_{\text{п}} = V_{\text{куз}} k_{\text{з.к}} / Q_{\text{н}}, \quad (2.34)$$

где $Q_{\text{н}}$ – производительность погрузочной машины непрерывного действия, м³/мин.

Время движения машины (мин):

$$t_{\text{дв}} = \frac{60L}{k_{\text{с.х}}} \left(\frac{1}{v_{\text{гр}}} + \frac{1}{v_{\text{пор}}} \right). \quad (2.35)$$

Средние скорости движения погрузо-доставочной машины $v_{\text{гр}}$ и $v_{\text{пор}}$ (км/ч) определяются по хронометражным наблюдениям или по тяговым характеристикам двигателя машины. Коэффициент среднеходовой скорости движения $k_{\text{с.х}}$ принимают равным 0,6 при длине транспортирования $L < 0,3$ км и 0,75 при $L > 0,3$ км.

Время разгрузки $t_{\text{раз}}$ для автосамосвалов с опрокидным кузовом составляет около 0,7 мин, для самоходных вагонов – 2-3 мин.

Время (мин) маневров в забое $t_{\text{м.з}}$ и у мест разгрузки $t_{\text{м.р}}$ определяют в конкретных условиях эксплуатации согласно данным хронометражных наблюдений.

При движении нескольких машин в однополосной выработке время ожидания на разминовках:

$$t_{\text{разм}} = n_{\text{разм}} t_1, \quad (2.36)$$

где $n_{\text{разм}}$ – число разминок; $t_1 = 3$ мин – время ожидания на разминке.

Возможное число рейсов машины за смену:

$$n_{\text{р}} = 60(T_{\text{см}} - T_{\text{п.з}}) / t_{\text{р}}, \quad (2.37)$$

где $T_{\text{см}}$ – длительность смены, ч; $T_{\text{п.з}} = 0,7 \div 0,8$ – время, затрачиваемое на прием и сдачу смены и профилактическое обслуживание, ч.

Потребное суммарное число рейсов в смену:

$$n_{\text{с}} = k_{\text{н}} Q_{\text{см}} / (V_{\text{куз}} k_{\text{з.к}} \gamma), \quad (2.38)$$

где $Q_{см}$ – сменная производительность подготовительных забоев по горной массе, т.

Потребное число одновременно работающих машин $z = n_c / n_p$.

Инвентарное число самоходных машин:

$$z_{ин} = k_p \sum Z, \quad (2.39)$$

где $\sum Z$ – общее число однотипных машин; $k_p = 1,25 \div 1,5$ – коэффициент, учитывающий нахождение машины в ремонте и резерве (меньшее значение принимают при двухсменном режиме работы, большее – при трехсменном).

Разработанная комплексная методика математического моделирования и расчета рациональных параметров логистической схемы подземного рудника с формированием монолитного закладочного массива включает разработку математической модели критической и рабочей скорости движения закладочной смеси, учитывающей гранулометрический состав, плотность фракций и внутренний диаметр трубопровода, а также интеграцию методов расчета производительности вертикального трубопровода с учетом сопротивления воздуха, трения материала о стенки и потерь напора, что позволяет минимизировать риски закупоривания и обосновать параметры логистической схемы транспортирования закладочного материала для условий глубокозалегающих калийных месторождений

2.4. Программа-методика опытно-промышленных исследований системы гидротранспортирования компонентов закладочной смеси в рудник Гремячинского ГОКа

Задача определения гидравлических сопротивлений трению при движении воды или другой однородной жидкости и твердых фаз не поддается точной теоретической схематизации и требует экспериментальных исследований с последующим аналитическим обобщением результатов, как экспериментального, так и теоретического подхода, что предопределило необходимость проведения опытно-промышленных исследований транспортирования компонентов закладочной смеси в условиях подземного рудника Гремячинского ГОКа [47]. Разработанная программа методика опытно-промышленных исследований

включает в себя комплексный перечень исследований, основанный на определении зависимых и независимых переменных:

- определение контролируемых характеристик и параметров смеси при изменении параметров трубопровода;
- исследование влияния соотношения жидкой и твердой фаз на характеристики транспортируемости закладочной пульпы по трубопроводу;
- исследование влияния геометрии трассы на горизонтальном закладочном модуле на потери напора смеси;

В рамках исследований на поверхности Гремячинского рудника с использованием двух специально сформированных для принятия смеси траншеи должны быть оценены параметры и показатели перемещения закладочного материала с применением трубопроводного транспорта, включая оценку: скорости движения смеси на основе солеотходов и рассолов различной концентрации по всей трассе трубопровода, давления в трубопроводе, энергозатрат, температуры смеси до и после транспортирования, изменения консистенции и состава смеси после транспортирования, изменения давления смеси при нелинейном трассировании трубопровода, производительности применяемой техники, фактического соотношения жидкого и твёрдого в составе смеси, характеристик плотности и вязкости смеси, а также времени и условий твердения смеси после транспортирования. Также должны быть определены контролируемые характеристики и параметры смеси при изменении параметров трубопровода: диаметра, длины транспортирования, радиуса. Определение контролируемых характеристик и параметров смеси должно производиться при изменении параметров трубопровода: кривизны трассы в вертикальной и горизонтальной плоскостях, разницы высотных отметок начала и конца трассы транспортирования. Контролируемые в ходе эксперимента характеристики представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 - Контролируемые характеристики и условия проведения опытно-промышленных испытаний технологии транспортирования закладочной смеси по трубопроводам при моделировании линейных и нелинейных трассировок трубопроводов при освоении Гремячинского месторождения

Виды процессов	Варьируемые характеристики	Контролируемые показатели	Размерность	Оцениваемые параметры	Контрольно-измерительные приборы
Геотехнологические	Регулирование режима потока	Скорость транспортирования смеси	м ³ /с	Скорость движения смеси	Измеритель скорости потока, манометры
		Давление в трубопроводе	Па	Давление в трубопроводе на входе	Манометры, датчики давления
	Температура смеси	Температура смеси	°С	Температура смеси до и после транспортирования	Термометры, тепловизоры
		Грансостав смеси	Мм	Средний размер частиц	Сито
Реологические	Консистенция смеси	Консистенция, влажность смеси	Па·с	Вязкость смеси	Вискозиметры
		Плотность	кг/м ³	Плотность смеси	Плотномеры
	Изменение гран состава при транспортировании по трубопроводу	Объем или масса твердых частиц, содержащихся в пульпе	Па·с	Состав твердого	Реометры
		Мощность осажденного слоя солейотходов	мм	Сокращение толщины диаметра трубопровода	Толщиномер
Гидродинамические	Линейные потери напора в пульпопроводе	Изменение давления в зависимости от геометрии трассы трубопровода	Па, мм	Давление и производительность трубопровода	Датчики давления
	Давление пульпы внутри системы	Влияние диаметра трубопровода на давление	Па, мм		Манометры, мерные емкости, секундомер
	Скорость потока пульпы в трубопроводе	Динамика изменения скорости потока при разных соотношениях компонентов	Па		Манометры, датчики давления
	Влияние диаметра трубопровода на скорость потока	Влияние диаметра трубопровода на скорость потока	м/с	Скорость движения смеси	Измерители скорости потока
Условия твердения смеси	Время и условия фильтрации и твердения смеси после транспортирования	Время твердения смеси	ч	Время схватывания	Секундомеры
		Динамика фильтрации смеси	м ³ /ч	Параметры фильтрации	Емкостнометры, игла вика
		Условия твердения смеси	%; °С	Влажность и температура смеси	Термометры, анализаторы влажности
Общие параметры	Производительность и энергоэффективность	Производительность применяемой техники	м ³ /ч	Производительность и энергозатраты	Расходомеры
Абразивные свойства	Изменение толщины трубопровода после транспортирования пульпы	Износ трубопровода	мм	Изменение толщины трубопровода	Толщиномер
Условия кольматации трубопровода	Наращение мощности налипающих солейотходов	Трубопровод, насосы	мм	Толщина соляного отложения на стенках трубопровода	Ультразвуковой толщиномер, толщиномер

При исследовании влияния соотношения жидкой и твердой фаз на транспортируемость закладочной смеси по трубопроводу в ходе опытно-промышленных исследований оценивается влияние соотношения жидкой и твёрдой фаз на показатели транспортируемости закладочной смеси в трубопроводе. Для эксперимента готовятся составы с различным соотношением жидкой и твёрдой фаз (Ж:Т): №1 = 3:1; №2 = 2:1; №3 = 1.6:1; №4 = 1.3:1.

Соотношение Ж:Т в смеси № 2 представляет собой рабочие характеристики закладочной смеси, используемые на рудниках Верхнекамья при гидрозакладке. В условиях Гремячинского месторождения, где необходимо минимизировать содержание жидкой компоненты в пульпе, сохраняя при этом её способность к эффективному транспортированию, снижение соотношения Ж:Т в транспортируемой смеси относительно принятого в проекте состава №2, влечет существенное снижение объёма оборотного рассола, который необходимо поднимать наверх первоначально через приемную емкость в околоствольный двор и затем - на поверхность для повторного использования на обогатительной фабрике. Согласно данным отчёта [94], в проектном варианте соотношения Ж:Т, суточный расход рассолов для приготовления закладочной смеси составляет порядка 13000 м³.

Уменьшение жидкого компонента в составе смеси № 4 было определено на основе теоретических расчётов, выполненных ООО «ПроТех Инжиниринг» путем варьирования соотношения Ж:Т. При этом результаты исследований доказали, что скорость движения смеси в трубопроводе при выборе состава №4 была значительно ниже по сравнению с составом №3 – в несколько раз. Например, для смеси №4 скорость течения смеси составила 5,2 м/с, в то время как для состава №3 она была чуть выше (5,23 м/с соответственно).

Это было связано с увеличением содержания твёрдой фазы, что повлияло на снижение реологических свойств пульпы. Однако уменьшение содержания жидкой фазы вызвало повышение критической скорости движения смеси, что важно для предотвращения оседания твёрдых частиц.

Компенсация снижения скорости движения пульпы может быть обеспечена за счет инициации ее роста воздействием пневмоврезок. Для оценки влияния геометрии трассы на потери напора на горизонтальных участках трубопроводного става предусмотрено варьирование длины трассы трубопровода путем ее изменения с 10 до 20 м с шагом по 5 м. При этом экспериментально производится оценка давления на входе и на выходе трубопроводной трассы.

Для исследования технологии транспортирования закладочной смеси и отходов должны быть построены тестовые трубопроводы на поверхности рудника, которые позволят измерить и проанализировать основные параметры движения пульпы, а также оценить влияние параметров трубопровода - диаметра, длины, высоты подачи пульпы, кривизны (линии трубопровода в плане и в профиле) и консистенции смеси на показатели работы трубопроводного транспорта.

Для проведения эксперимента на территории промплощадки монтируется система трубопроводов с переменными диаметрами и изменяющимися конфигурацией. В качестве тестового участка будут выбраны три металлических трубопровода с толщиной стенок 27 мм с диаметрами 273 мм, 311 мм, 168 мм. Принципиальная схема размещения оборудования для проведения опытно-промышленных испытаний приведена на рисунке 2.12.

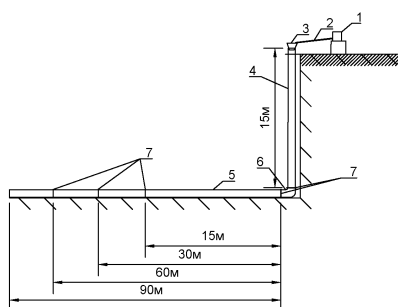


Рисунок 2.12 - Принципиальная схема размещения оборудования для проведения ОПИ: 1- смеситель; 2- питатель; 3- воронка; 4- вертикальный трубопровод; 5- горизонтальный трубопровод; 6- соединительное колено; 7- фланец

Диаметры 273 мм и 311 мм соответствуют внутреннему диаметру солеспуска и рассолопровода по проекту модернизации канала пульпопровода в канал подачи солеотходов и рассолов, разрабатываемому ООО «ПроТехИнжиниринг». Варьирование диаметра в значениях - 168, 273, 311 мм позволит установить закономерности влияния диаметра трубопроводного транспорта на характеристики

транспортируемой закладочной смеси. Приняты основные параметры эксперимента: общая длина каждого трубопровода составляет 30 м. Трубы должны быть изготовлены из металла с маркировкой стали X27, обеспечивающей достаточную прочность стенок при проведении эксперимента. Конструктивная схема установки включает: прямолинейный вертикальный участок высотой 18, 15 и 12 м; прямолинейный горизонтальный участок длиной 15 м, для оценки критической скорости осаждения частиц и изменения напора пульпы по длине трубопровода прямолинейного горизонтального участка длиной 30, 60, 90 м и криволинейных участков, соответствующие схеме транспортирования гидросмеси на руднике.

Для реализации данной схемы выбрано место на промышленной площадке Гремячинского ГОКа, которое соответствует требованиям Программы-методики ОПИ, таких как высота уступа: 12, 15, 18 м (рис 2.13), вертикальный трубопровод должен размещаться под углом, близким к 90° . Для изучения изменения напора закладочной смеси было предложено установить вертикальный трубопровод на разной высоте: от 12 до 18 м. После получения результатов строится график зависимости потери скорости смеси при перепуске на разную высоту.

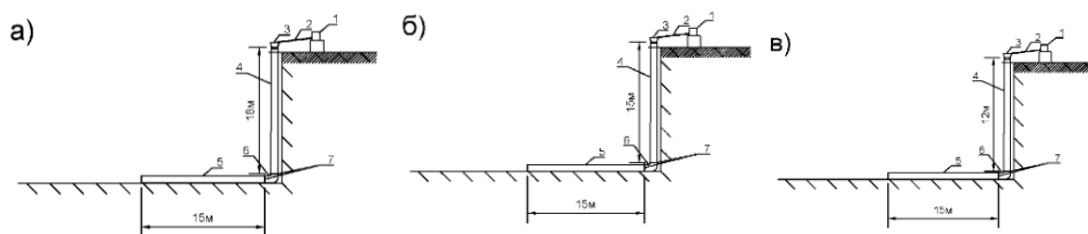


Рисунок 2.13 - Схема вертикального участка трубопровода для изучения скоростных характеристик закладочной смеси при изменении высоты транспортирования: вертикальный трубопровод а - 18 м; б - 15 м; в - 12 м, где: 1- смеситель; 2- питатель; 3- воронка; 4- вертикальный трубопровод; 5- горизонтальный трубопровод; 6- соединительное колено; 7- фланец

Длина горизонтального трубопровода предусмотрена переменной: 15, 30, 60, 90 м. Смена длины позволяет определить реальный коэффициент сопротивления движения смеси, потерю напора смеси при перемещении по горизонтальному участку переменной длины, количество оседания твердых частиц на стенках гидропровода, что в совокупности позволит рассчитать критическую скорость

движения смеси в турбулентном режиме перед началом осаждения твердых соляных частиц.

Переход от вертикального участка к горизонтальному осуществляется посредством соединительного колена, принципиальная схема которого показана на рисунке 2.14, соединение вертикального и горизонтального участков трубопровода производится посредством фланцев.

Для оценки характеристик движения и осаждения закладочной смеси на участках, где происходит изменение направления ее движения, представляется целесообразным рассмотреть три возможных угла поворота трассы, принятых в соответствии с геометрией трассы гидропровода.

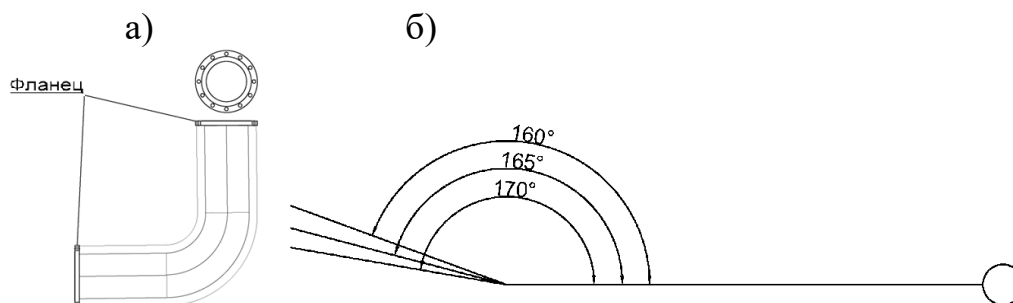


Рисунок 2.14 - Принципиальная схема размещения второго соединительного колена: а) вид сбоку, б) вид сверху

Соединение трубопровода при смене угла производится также посредством фланцев. Разбор фланцевых соединений позволяет оценить характер движения смеси и интенсивность осаждения твердых частиц.

Разработанная программа-методика опытно-промышленных исследований параметров транспортирования компонентов закладочной смеси позволяет оценить показатели транспортируемости в промышленных условиях, включая исследование характеристики скорости движения смеси, потери напора и влияние соотношения жидкой и твердой фаз с целью оптимизации параметров процесса перемещения возвратных минерально-сырьевых потоков.

Выводы по главе 2

1. Анализ терминологического аппарата логистических систем подземного рудника, в частности логистической схемы закладочных работ, позволил

определить ее ключевые элементы: поверхностный логистический модуль, вертикальный логистический подземный модуль, горизонтальный логистический подземный модуль, камерный логистический подземный модуль, предполагающие интеграцию и синхронизацию прямых и возвратных минерально-сырьевых потоков в единую логистическую систему подземного рудника. Разработана классификация логистических схем ведения закладочных работ при освоении соляных месторождений, базирующаяся на способах транспортирования закладочных материалов и смесей, отличительной особенностью которой является учет специфики солеотходов в составе закладочной смеси, глубины залегания месторождения, расстояния транспортирования, а также расположения и типа модуля обезвоживания, что позволяет выбрать средства, доставки и укладки смеси для формирования консолидированного закладочного массива в зависимости от горнотехнических условий разработки месторождений водорастворимого минерального сырья.

2. Выбор рациональной логистической схемы закладочных работ должен производиться на основе разработанной методики определения параметров логистической схемы рудника с учетом влажности закладочной материалов и смеси, влияния динамических нагрузок при транспортировании на физико-механические свойства солеотходов с математическим моделированием процесса перепуска смеси по вертикальному закладочному трубопроводу для снижения риска консолидации солеотходов в перегрузочных узлах и их закупоривания.

3. Доказано, что основным требованием для эффективного функционирования логистической схемы закладочных работ, при разработке глубокозалегающего месторождения водорастворимого сырья является определение места размещения модуля обезвоживания солеотходов, который обеспечивает заданную степень влажности закладочных смесей, необходимую для их транспортирования и укладки в выработанное пространство, а также консолидации смесей на основе солеотходов с формированием необходимой прочности и деформационных характеристик.

4. Разработана комплексная методика математического моделирования и расчета рациональных параметров логистической схемы подземного рудника с монолитной закладкой выработанного пространства, которая включает разработку математической модели оценки критической и рабочей скоростей движения закладочной пульпы, учитывающей гранулометрический состав, плотность фракций, внутренний диаметр трубопровода, трение материала о стенки и потери напора, а также интеграцию методов расчета производительности вертикального трубопровода, что позволяет минимизировать риски закупоривания транспортной системы.

5. Разработана программа-методика опытно-промышленных исследований процессов транспортирования компонентов закладочной смеси, которая позволяет оценить показатели транспортируемости закладочных материалов и смеси в промышленных условиях, включая исследования характеристик скорости движения, потери напора и влияние соотношения жидкой и твердой фаз с целью оптимизации параметров процесса перемещения возвратных минерально-сырьевых потоков.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЗАКЛАДКИ НА ПОДЗЕМНОМ ГРЕМЯЧИНСКОМ РУДНИКЕ.

3.1. Концептуальные требования к логистической схеме закладочных работ рудника

Анализ мирового опыта применения гидравлического и механического способов транспортирования закладочных материалов при разработке глубокозалегающих месторождений минерального сырья, представленный в предыдущих главах, свидетельствует о необходимости совершенствования технологий транспортирования и логистической схемы подземного рудника на базе применения адаптивных систем, способных учитывать особенности геологических условий, требования по снижению экологической нагрузки и повышению экономической эффективности горных работ и полноты извлечения полезных ископаемых из недр. Однако, прецедентов по системному анализу параметров взаимодействия различных схем транспортирования, в частности, для глубокозалегающих месторождений калийных солей до настоящего времени выявлено недостаточно [76].

Крупнейшим месторождением калийных солей в России является Гремячинское месторождение (ГМКС), разрабатываемое компанией «ЕвроХим Волга-Калий» подземным способом на глубине более 1100 метров. Сеть коммуникаций до наиболее удаленной панели на западном направлении составляет 11 250 м, а до наиболее удаленной панели на восточном направлении — 9 800 м. В настоящий момент рудник испытывает значительную потребность в разработке и внедрении эффективной схемы закладочных работ ввиду специфики геологических и технико-экономических факторов [121].

В соответствии с разработанной классификацией логистических схем ведения закладочных работ при разработке глубокозалегающих месторождений калийных солей выделяются три наиболее приемлемые схемы ведения закладочных работ: цикличная, циклично-поточная и поточная.

Цикличная схема предусматривает применение механизированных средств циклического действия при транспортировании закладочного материала до места его

укладки. В качестве закладочного материала используются осушенные естественным способом на солеотвале галитовые отходы.

Технологический процесс цикличной схемы начинается с разработки галитовых отходов на солеотвале с использованием бульдозера-рыхлителя. Производительность и количество бульдозеров должны быть согласованы с объёмом материала, необходимого для обеспечения непрерывности последующих операций закладки. Полученный материал перемещается погрузочным оборудованием цикличного действия в перегружатель, после чего подаётся на конвейерную линию для транспортирования к надшахтному комплексу. На этом этапе учитывается крупность материала: при превышении допустимых значений (обычно 50–70 мм) требуется операция дробления для обеспечения равномерного заполнения мягких контейнеров (биг-бэгов) и повышения транспортпригодности материала. Далее биг-бэги временно складываются у скипового ствола, где их накопление определяется грузоподъёмностью скиповой подъёмной установки и вместимостью приёмного бункера. Вместимость склада рассчитывается с учётом 5–7 циклов работы скипового спуска-подъёма, что позволяет избежать простоев.

После доставки биг-бэгов на подземный горизонт, их разгружают с использованием специализированного оборудования. Этот процесс включает перемещение контейнеров из скипа в приёмный бункер, вместимость которого ограничена коэффициентом запаса, рассчитанного на обеспечение нескольких циклов работы скипа. Из приёмного бункера биг-бэги поступают на самоходные транспортные средства.

Производительность транспортирования и укладки биг-бэгов зависит от синхронизации цикла работы скиповой подъёмной установки, времени загрузки и разгрузки ПДМ, а также характеристик закладочного материала.

Циклично-поточная включает вышеописанные поверхностный, стволовой, горизонтальный и камерный модули, каждый из которых выполняет свою ключевую функцию в рамках единой логистической системы.

На начальном этапе, солеотходы, поступающие с флотационной обогатительной фабрики, а также подготовленные, при необходимости, породы от

проходки горных выработок конвейером подаются к месту складирования на солеотвале. В условиях открытого хранения галитовые отходы частично обезвоживаются, но их остаточная влажность (9%) превышает допустимый для транспортировки уровень (5–6%), что требует контроля скорости обезвоживания и условий хранения для предотвращения слёживания и снижения пропускной способности системы. После складирования галитовые отходы подвергаются механической обработке с использованием бульдозера-рыхлителя, обеспечивающего рыхление уплотнённого массива и подачу материала к перегружателю. Конвейерная линия, соединяющая солеотвал с надшахтным зданием, перемещает предварительно подготовленные отходы к пункту дробления и грохочения. Затем материал подается на инерционный грохот, где осуществляется отделение некондиционных фракций. После подготовки материал направляется в загрузочный питатель, который дозированно подаёт его в закладочный трубопровод. Диаметр трубопровода должен быть определён в зависимости от требуемой производительности системы и объёма подачи материала с учётом пропускной способности трубопровода, плотности материала и скорости его потока.

В подземном пространстве материал аккумулируется в приёмном бункере, который служит для равномерной подачи на магистральные конвейеры. Вместимость бункера рассчитывается исходя из требуемой производительности закладочных работ и должна обеспечивать непрерывность подачи смеси.

Заключительное звено предусматривает укладку материала в закладочные камеры с использованием передвижного пневмокамерного закладочный комплекс, обеспечивающего подготовку и перемешивание смеси, ее распределение в выработанном пространстве и уплотнение в соответствии с заданными проектными параметрами. При необходимости смесь орошается рассолом для достижения заданной консистенции и предотвращения пылеобразования.

Для подачи рассолов в зону закладочных работ используется отдельный трубопровод, который обеспечивает подачу затворителя из поверхностного комплекса к передвижным закладочным комплексам.

Поточная схема. Для реализации поточной схемы закладочных работ при разработке глубокозалегающих месторождениях калийных солей разработана технологическая схема, основанная на перемещении закладочного материала и рассолов через трубопроводы с применением гравитационного или пневматического воздействия.

Процесс начинается на поверхности, где галитовые отходы из обогатительной фабрики поступают без предварительного обезвоживания. Рассолы забираются из резервуаров фабрики, их химический состав, вязкость и плотность предварительно анализируются для обеспечения совместимости с галитовыми отходами.

После подготовки компонентов смесь формируется в модуле пульпоприготовления, где галитовые отходы и рассолы смешиваются в заданных пропорциях. Плотность смеси и её реологические свойства определяются в зависимости от длины и геометрии маршрута транспортирования и диаметра трубопровода. Трубопровод должен обеспечить пропускную способность, достаточную для проектной производительности закладочных работ, без создания гидравлических засоров или избыточных потерь давления. Из корпуса пульпоприготовления смесь направляется в вертикальный трубопровод (солеспуск), по которому она транспортируется на горизонт ведения очистных работ. После достижения очистного горизонта смесь поступает в распределительную систему. Магистральные трубопроводы направляют её к участковым линиям, откуда смесь подаётся в блоки для закладки. Контроль равномерности потока, давления и скорости смеси на данном этапе критически важен, чтобы исключить нарушение структуры материала и расслоение смеси.

В закладочном блоке смесь поступает в смесительную камеру, где производится её финальная подготовка. Камера формируется с уклоном, чтобы обеспечить стекание излишков жидкости в накопительный резервуар. Гидроизоляционный слой, уложенный на днище камеры, предотвращает проникновение жидкости в массив подстилающих пород. Рассолы из резервуара откачиваются на поверхность и включаются в оборотный цикл.

Для всех трёх логистических схем закладочных работ – поточной, цикличной и циклично-поточной – обеспечение заданной производительности является ключевым аспектом планирования. Этот процесс предполагает постепенное достижение проектной мощности закладочного комплекса на каждом этапе эксплуатации, начиная с минимальных показателей, обеспечивающих тестирование и настройку оборудования, и заканчивая выходом на полную производственную мощность рудника.

В цикличной схеме закладочных работ набор производительности сопровождается увеличением количества циклов загрузки и разгрузки. На первом этапе система тестируется при минимальной загрузке. По мере увеличения производительности корректируются количество единовременно работающих станция затаривания МКР и ПДМ, а также степень загрузки скипа.

В циклично-поточной схеме стадии набора производительности зависят от синхронизации циклических и поточных процессов. На первом этапе проводится оптимизация взаимодействия конвейеров и трубопроводов, чтобы исключить неравномерное распределение нагрузки. По мере увеличения производительности возрастает потребность в подаче материалов, что обеспечивается увеличением скорости транспортирования на конвейерах, давления в трубопроводах и объемов смешивания компонентов. Для достижения максимальной эффективности на завершающем этапе требуется комплексные пуско-наладочные работы всех элементов системы и их синхронизация с общим ритмом закладочных работ.

Выбор рационального способа требует детализации проектных расчетов каждого варианта с учетом специфики месторождения, объемов извлекаемых и утилизируемых отходов, а также технических характеристик применяемого оборудования. Формирование концептуальных требований к логистической системе закладки должно базироваться не только на учёте технологических параметров, но также на всестороннем анализе горно-геологических условий и эксплуатационных характеристик горных машин.

Важным аспектом при выборе рациональной логистической схемы является учет уровня запыленности рудничной атмосферы, который напрямую влияет на

условия труда и на эксплуатационные характеристики оборудования. Предельно допустимые концентрации (ПДК) пыли в рудничной атмосфере составляют 6 мг/м³ для конвейеров и ПДМ, и 2 мг/м³ для трубопроводов и установлен в соответствии с СанПиНом 1.2.3685–21 [122].

Для оценки условий работы вблизи транспортного оборудования и расхода подачи свежего воздуха были проведены замеры концентрации пыли (C , мг/м³) и объема воздуха (V , дм³) на расстояниях 5, 10 и 30 метров от конвейера и погрузо-доставочной машины (ПДМ). Результаты представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Результаты измерения концентрации пыли C , мг/м³ и объема воздуха V , дм³ вблизи доставочного оборудования

	№ замера	C , мг/м ³	V , дм ³	C , мг/м ³	V , дм ³	C , мг/м ³	V , дм ³
Расстояние от оборудования, м	-	5	5	10	10	30	30
Конвейер	1	24,5	20,4	20,1	18	14,1	22,6
	2	23,1	20,7	19,2	18,2	13,2	22,8
	3	22,3	21	18,7	18,5	12,5	23,1
ПДМ	1	849,1	3,31	158,5	9,05	72,2	17,1
	2	861,5	3,1	224,1	8,39	79	17,31
	3	820,3	3,45	284,9	7,03	87,7	13,93

Измерения показали умеренное пылеобразование вокруг конвейера. На расстоянии 5 м от конвейера концентрация пыли варьируется в пределах 22,3–24,5 мг/м³, постепенно уменьшаясь до 12,5–14,1 мг/м³ на расстоянии 30 м. При этом объем воздуха (V , дм³) пропущенного через измерительный прибор ПКА-01 остается относительно стабильным и колеблется от 20,4 до 23,1 дм³, независимо от расстояния. Высокий уровень пылеобразования и стабильный объем воздуха создают опасные условия труда, требующих принятия мер для пылеподавления с максимальным повышением в 2 раза.

Работа ПДМ, напротив, сопровождается значительно более интенсивным пылеобразованием. На расстоянии 5 м концентрация пыли составляет 820,3–861,5 мг/м³, что на порядок выше показателей, зафиксированных у конвейера. Объем воздуха при этом значительно ниже — всего 3,1–3,45 дм³, что указывает на недостаточную вентиляцию. На расстоянии 10 м концентрация пыли снижается в 6 раз, достигая 158,5–284,9 мг/м³, а объем воздуха возрастает до 7,03–9,05 дм³. На расстоянии 30 м пылеобразование снижается еще больше, до 72,2–87,7 мг/м³, при увеличении объема воздуха до 13,93–17,31 дм³.

Проведенные исследования микроклимата подземного рудника были направлены на создание оптимальных условий для выбора и проектирования устойчивых транспортных систем, а также для обеспечения безопасности и эффективности их работы, результаты измерений температуры и влажности воздуха в различных зонах подземного рудника сведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2 - Результаты измерений температуры и влажности воздуха в различных зонах подземного рудника.

Место измерения	Номер замера	Температура (°C)	Влажность (%)
Призобойное пространство УРАЛ-20	1	50,1	25,5
	2	46,8	27,3
	3	47,5	26,8
Тупик	1	29,2	29,5
	2	29,5	28,9
	3	29,4	29,2
Сопряжение горных выработок	1	28,3	28,8
	2	29	29
	3	24,2	30
Участок с ПДМ	1	33,1	27,5
	2	36,3	26
	3	38,2	25
Конвейерная галерея	1	31	27,8
	2	28,5	28,5
	3	27,2	29

Изучение температуры и влажности воздуха в различных зонах рудника позволяет адаптировать вентиляционные системы и методы транспортирования компонентов и закладочной смеси к специфическим условиям эксплуатации в калийном руднике. Максимальная температура в призобойном пространстве составила 50,1°C при минимальной влажности 25,5%, что связано с интенсивной тепловой нагрузкой от работы комбайнов.

В конвейерной галерее, где температурные колебания составили 27,2–31 °C, а влажность достигла 27,8–29%, оптимальными остаются конвейеры с герметичными укрытиями, которые предотвращают пылеобразование и снижают затраты на вентиляцию. Условия в зоне работы погрузо-доставочных машин (ПДМ), где температура достигла 38,2°C при влажности воздуха 25%, требуется усиленная вентиляция и использование увлажняющих систем для снижения уровня пылеобразования.

Определение оптимальной технологии транспортирования закладочных материалов требует учёта горно-геологических условий Гремячинского месторождения, которые могут существенно влиять на устойчивость выработок и эффективность работы транспортных систем, в связи с чем в выработках рудника проведены исследования геологических и гидрогеологических факторов.

Основной фактор, влияющий на устойчивость выработок, заключается в наличии карналлитовых и карналлит-галитовых пород, которые подвержены размыванию насыщенными рассолами NaCl и KCl , а также насыщению по MgCl_2 . Такие породы характеризуются высокой чувствительностью к даже незначительным утечкам рассолов из трубопроводов, что может привести к разрушению массива пород и потере эксплуатационной пригодности выработок. Последствия таких размывов представлены на рисунке 3.1.

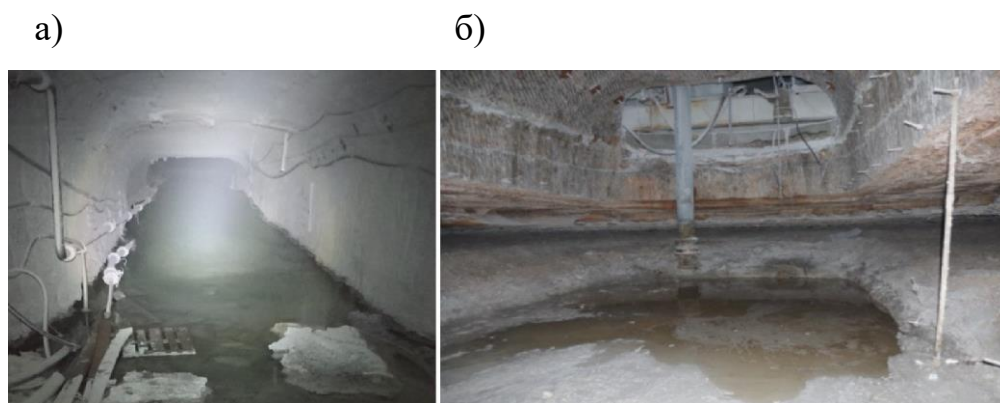


Рисунок 3.1 - Последствия прорыва трубопроводов и размещений водопритоков (технологическое водоснабжение) на ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий» при диаметрах труб: а – 100 мм, б – 108 мм

Кроме того, помимо искусственного воздействия рассолов и пульпы на состояние выработок при разрыве трубопроводов (что представляет значительный риск из-за большой глубины и высокого давления в трубах), дополнительным фактором, способствующим ухудшению состояния горных выработок, является деформация их контура (рис. 3.2).

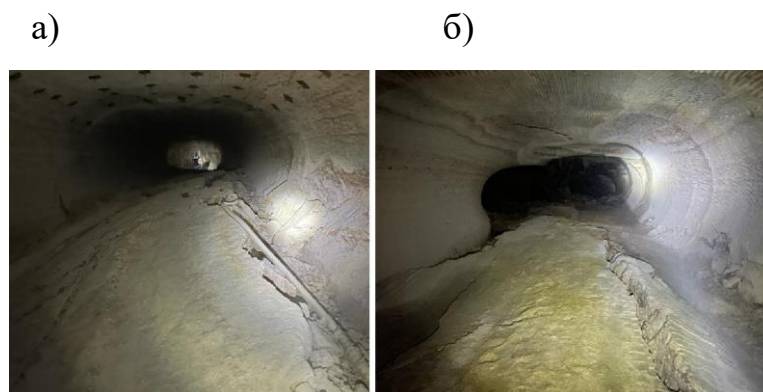


Рисунок 3.2 - Условия поддержания на руднике ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий» и выработок: а – главных выработок, б – панельных выработок.

Пучение почвы выработок создаёт высокие риски функционирования транспортных технологий. При использовании конвейерного транспорта закладочный материал подаётся в обезвоженном виде, что снижает вероятность размывания пород, однако существует риск повреждения конвейерных линий при деформации почвы. Это может повлечь остановку работ, демонтаж и обустройство новых конвейеров, что вызывает существенный рост затрат.

В отличие от конвейерного транспорта, трубопроводный транспорт не подвержен воздействию пучения, так как его конструкция крепится в кровле. Однако закладочные рассолы, транспортируемые по трубопроводам, при утечке могут проникать в трещины пород, что влечет нарушение целостной структуры массива.

Альтернативным подходом может стать использование погрузочно-доставочных машин (ПДМ) для транспортирования закладочного материала. Такой способ позволяет не только обеспечить мобильность в перемещении материала, но и создать пригруз почвы в выработках, что способствует снижению риска пучения почвы и повышению устойчивости выработок.

Таким образом, выбор оптимальной технологии транспортирования должен основываться на комплексной оценке механической устойчивости пород при их взаимодействии с рассолами и учитывать эксплуатационные требования рудника. Представляется возможной также комбинированная схема, где трубопроводы применяются в устойчивых массивах, конвейеры — для участков с минимальным риском пучения почв, а ПДМ — для зон с высокой деформационной активностью.

Однако эта схема является многозвеневой и наиболее сложной в эксплуатации. Для успешной реализации любого вида логистической схемы необходимо детально изучить физико-механические свойства закладочной смеси, которые определяют её поведение при транспортировании и укладке. Это позволяет оценить реологические характеристики смеси при гидравлическом и конвейерном транспортировании, а также разработать методику определения параметров логистической схемы, адаптированной к условиям подземных горных выработок.

3.2. Результаты исследования физико-механических свойств закладочной смеси с целью оценки её реологических характеристик при гидравлическом и конвейерном транспортировании в условиях подземных горных выработок.

Разработанная комплексная методика определения параметров логистической схемы подземного рудника с закладкой, учитывающая совокупное влияние горно-геологических и производственно-организационных факторов, а также физико-механические свойства транспортируемого закладочного материала, предусматривала проведение серии лабораторных и полевых исследований, направленных на выявление параметров, влияющих на выбор логистической схемы ведения закладочных работ при освоении глубокозалегающих месторождений минеральных солей.

Полученные результаты оценки влажности закладочных смесей позволили установить, что средняя влажность природного сильвинита в массиве составляет 0,1-0,15%, а пород, преимущественно галитового состава – 0,07%. Учитывая, что и сильвинит, и галит являются достаточно гигроскопичными материалами, определенную в лаборатории влажность можно лишь условно назвать естественной.

Проведенные исследования гранулометрического состава солеотходов, отобранных на обогатительной фабрике Гремячинского ГОКа, показали, что основная масса материала сосредоточена в диапазоне крупности от 0,5 до 1 мм, который составляет 30% общей массы, а совокупная доля частиц, превышающих 0,25 мм, достигает 77,93%. Низкое содержание тонкодисперсных фракций (менее

0,1 мм) — 8,73% — указывает на минимальную склонность материала к образованию пыли, что имеет значительное значение для производственной экологии и безопасности горных работ (табл. 3.3).

Таблица 3.3 - Результаты гранулометрического анализа солеотходов Гремячинской обогатительной фабрики

Класс крупности, мм	Выход класса, г	Выход класса, %	Суммарная характеристика, %
+1	17,19	17,19	17,19
-1+0,5	30	30,00	47,19
-0,5+0,25	30,74	30,74	77,93
-0,25+0,1	13,33	13,33	91,26
-0,1+0,071	3,11	3,11	94,37
-0,071+0,044	2,53	2,53	96,9
-0,044-0	3,1	3,10	100
Итого	100	100	

Гранулометрический состав солеотходов прямо влияет на выбор транспортного оборудования. Низкая доля пылевидных частиц снижает необходимость дополнительных мер пылеподавления, что уменьшает энергозатраты на вентиляцию и обеспечивает безопасные условия работы вблизи транспортных линий. Высокая доля крупнозернистых частиц (77,93% доли фракции крупностью более 0,25 мм) способствует высокой сыпучести материала, что упрощает процессы загрузки и разгрузки, в частности, при использовании ПДМ.

Гидротранспортирование также может быть успешно реализовано для солеотходов данного гранулометрического состава. Материал, с долей фракций крупнее 1 мм - 17,19 %, а частиц менее 0,25 мм — 22,07 %, соответствует требованиям для поддержания ламинарного течения в трубопроводах.

Проведённые измерения насыпной плотности солеотходов, высушенных до постоянной массы при температуре 1050 °С, показали диапазон значений от 1133,22 до 1178,11 кг/м³, что указывает на стабильные физико-механические свойства материала. Средняя насыпная плотность составила 1150 кг/м³, что характерно для среднеплотных сыпучих масс. Исследования были проведены для оценки технологической пригодности материала к различным методам транспортирования и обеспечения стабильной работы оборудования (табл. 3.4).

Таблица 3.4 - Результаты измерений насыпной плотности солеотходов

Номер образца	Плотность, кг/м ³	Средняя, кг/м ³
Партия от 02.06.2022		
1	1140,85	1154,27
2	1178,11	
3	1171,6	
4	1140,01	
5	1140,80	
Партия от 04.10.2022		
6	1133,22	1147,27
7	1139,56	
8	1148,01	
9	1157,8	
10	1157,8	

Измерения насыпной плотности, варьирующейся в пределах 1140–1150 кг/м³, показали однородность материала, необходимую для прогнозирования его поведения при транспортировке. Для транспортирования материалов конвейерами, насыпная плотность в диапазоне 1133–1178 кг/м³ обеспечивает соответствие стандартным требованиям к нагрузкам на ленту и устойчивость потока материала.

Для оценки допустимой высоты перепуска компонентов закладочной смеси по вертикальному трубопроводу с целью транспортирования материалов с поверхности до околоствольного двора без риска слёживания и чрезмерного уплотнения на базе в лаборатории ЭКОН РАН было проведено исследование зависимости относительных вертикальных деформаций сыпучих материалов от удельной компрессионной нагрузки при влажности солеотходов 0,05 %, 4 % и 8 % (рис. 3.3) [74]. Состав обезвоженных солеотходов в опытной навеске закладочной смеси представлен в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Состав обезвоженных солеотходов в опытной навеске закладочной смеси

Компоненты	Количество, гр.
Солеотходы	1550
Шламы	250

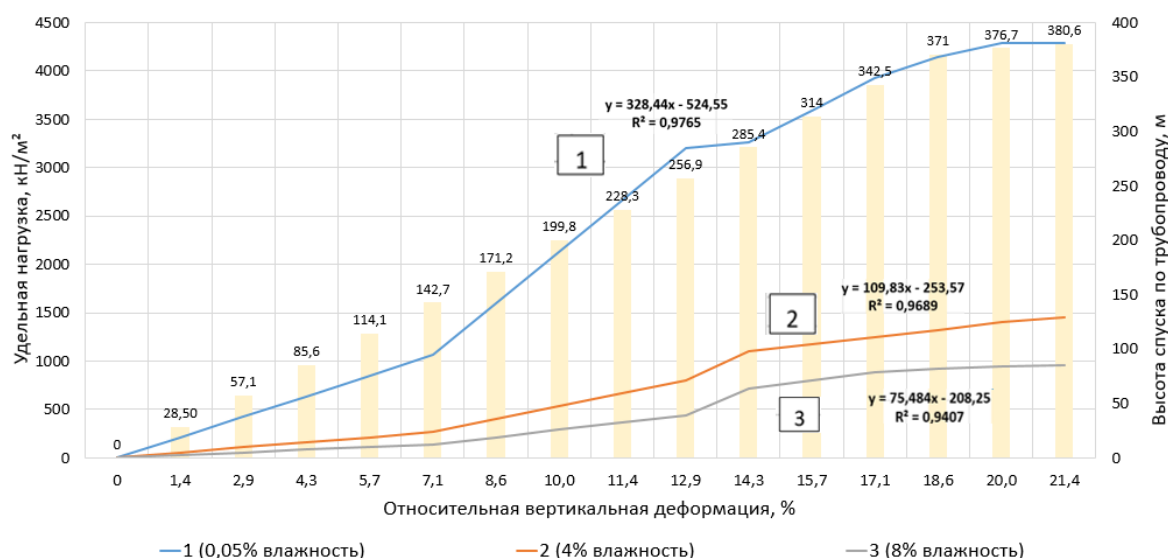


Рисунок 3.3 - Зависимость удельной нагрузки компрессионного сжатия и высоты перепуска по трубопроводу от относительной вертикальной деформации сыпучих солеотходов при различной влажности (0,05% – 1, 4% – 2, 8% – 3)

Результаты исследований показали, что для материала с влажностью 8% при абсолютной вертикальной деформации 5 мм требуется удельная нагрузка всего 138,78 кН/м², что соответствует высоте перепуска порядка 14,2 метра. В то же время, для материала с влажностью 0,05 %, тот же показатель удельной нагрузки достигает 1061,22 кН/м², что соответствует высоте перепуска в 102,3 метра — в 7 раза выше.

С увеличением абсолютной вертикальной деформации до 10 мм аналогичная тенденция сохраняется: для материала с влажностью 8 % высота перепуска составляет 62,1 метра, в то время как для условно сухого материала (0,05 %) данный показатель достигает 302 метров, что в 4,8 раза выше. При максимальной исследованной вертикальной деформации в 15 мм материал с влажностью 8 % допускает высоту перепуска 92,2 метра, а материал с влажностью 4 % — 142 метра. Для условно сухого материала с влажностью 0,05 % высота перепуска, обеспечивающая аналогичную деформацию, составляет 399,6 метра.

Абсолютная деформация в условиях бункера в размере 15 мм (относительная 21,4 %) является критической, так как при превышении этого значения деформация передаётся на нижележащие слои, что приводит к их значительному уплотнению, уменьшению пористости, увеличению слёживания и, как следствие, затруднению выгрузки материала [7]. Это вызывает повышенные динамические нагрузки на

конструкцию бункера и снижает эффективность транспортирования материала [44]. В проведенном исследовании, на основе теории классической физики, скорость солеотходов при перепуске на глубину 1135 метров по вертикальному трубопроводу составляет 149,03 м/с при динамической удельной нагрузке 12,8 МПа. На основе этих данных была составлена таблица 3.6, определяющая допустимую высоту перепуска солеотходов с различной влажностью до экспериментальной удельной нагрузки при абсолютной деформации 21%.

Таблица 3.6 - Допустимая высота перепуска при теоретической удельной нагрузке без образования первичной консолидации солеотходов в зависимости от влажности солеотходов

Влажность солеотходов, %	Удельная нагрузка (σ), кН/м ²	Скорость удара (v), м/с	Допустимая высота перепуска (H), м	Минимальное кол-во демпферных устройств $N_{\min}$, шт
0,05%	4285,714	86,3	380,2	3
4%	1448,98	50,2	128,6	9
8%	959,184	40,8	85,0	14

Так, для перепуска условно сухого материала (с влажностью до 0,05 %) с высоты 1150 метров достаточно применить 3 буферных устройства по высоте ствола, расположенных через 380 метров друг от друга. Увеличение влажности солеотходов до 4 % снижает допустимую высоту перепуска до 86 метров, что требует увеличения количества буферных устройств минимум в 3 раза до 9 шт. При влажности 8 %, потребность в буферных устройствах возрастает в 5 раз до 14 шт. На основе экспериментальных данных, полученных в лаборатории ЭКОН РАН, была построена зависимость допустимой высоты перепуска от влажности солеотходов (W) при критической относительной деформации $\varepsilon=21,4$ %. Для аппроксимации данных использован полином второй степени (метод наименьших квадратов), отражающий нелинейное снижение допустимой высоты с ростом влажности:

$$N(W) = \frac{H_{\text{общ}}}{6,64 \cdot W^2 - 90,58 \cdot W + 384,71} \cdot k_{\text{запас}}, \text{ шт} \quad (3.1)$$

где $N(w)$ – количество гасителей для предотвращения консолидации солеотходов, шт; W – влажность солеотходов; $a=6,64$; $b=-90,58$; $c=384,71$ – коэффициенты, полученные методом регрессии; $k_{\text{запас}}(W)$ - коэффициент запаса, учитывающий динамические нагрузки и погрешности.

Формула позволяет рассчитать $N_{\text{доп}}$ для любой влажности в диапазоне $0,05\% \leq W \leq 8\%$. Для значений $W > 8\%$ требуется дополнительное исследование. В расчётах введён коэффициент запаса, учитывающий возможные погрешности и дополнительные динамические нагрузки, возникающие при перепуске. Однако уточнение данного коэффициента возможно только по результатам натурных испытаний перепуска по вертикальному закладочному трубопроводу.

При накоплении материала в бункере после перепуска по вертикальному трубопроводу возможно значительное увеличение его насыпной плотности. Согласно рабочей инструкции "Методы лабораторной пенетрации РИ 06-2015", плотность (ρ) сыпучих монофракционных грунтов прямо пропорциональна удельному сопротивлению пенетрации (R). Для изучения данной зависимости были проведены исследования, выполненные в соответствии с требованиями РИ 06-2015 «Грунты. Методы лабораторной пенетрации» [58]. Полученные результаты представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 - Результаты эксперимента по определению удельного сопротивления и глубины проникновения конуса в солеотходы при различной влажности и нагрузке.

Нагрузка, Н	Удельное сопротивление пенетрации при влажности, кПа			Глубина проникновения при влажности, см		
	0,05%	4%	8%	0,05%	4%	8%
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	15,09	25,64	138,89	0,36	0,28	0,12
40	19,93	37,87	138,41	0,45	0,33	0,17
60	20,73	40,31	123,97	0,54	0,39	0,22
80	18,82	40,58	128,00	0,65	0,44	0,25
Среднее	18,64	36,10	132,32			

По результатам исследований установлено, что с увеличением влажности солеотходов значительно уменьшается глубина проникновения конуса в насыпную массу, что свидетельствует о повышении сопротивляемости материала при воздействии нагрузки (рис. 3.4). Для материала с влажностью 8% удельное сопротивление достигает максимальных значений (138,89 кПа при нагрузке 20 Н), что указывает на формирование плотных межчастичных связей, препятствующих дальнейшему заглублению конуса.

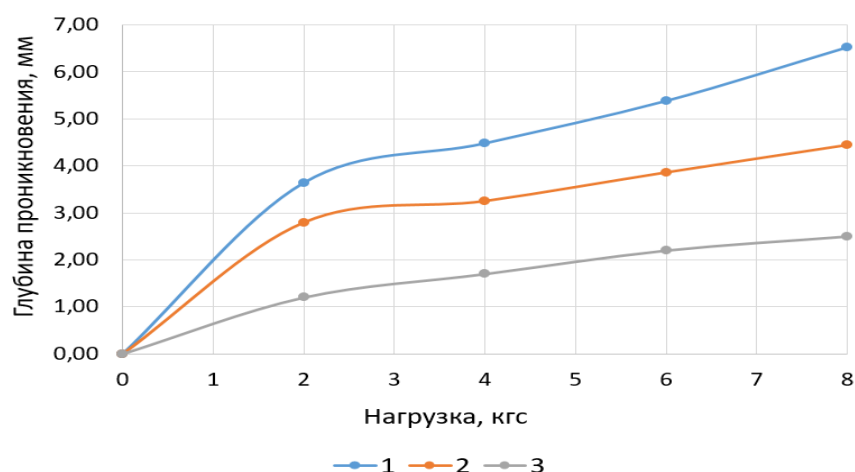


Рисунок 3.4 - Зависимость глубины проникновения конуса в солеотходы от нагрузки при влажности: 1 - 0,05 %; 2 – 4 %, 3 – 8 %

В то же время, материал с минимальной влажностью (0,05 %) демонстрирует относительно низкое удельное сопротивление, так, при нагрузке 80 Н глубина заглубления составляет 0,652 см, в то время как для материала с влажностью 8 % аналогичный показатель равен 0,250 см, что указывает на увеличение межфазной связи частиц в более влажном материале.

После перепуска солеотходов по вертикальному трубопроводу насыпная плотность материала существенно увеличивается. Данный процесс обусловлен уплотнением материала под воздействием собственной силы тяжести и динамических нагрузок во время перепуска [73]. В результате насыпная плотность для материала с влажностью 0,05 % достигла 1650 кг/м³, при этом коэффициент уплотнения составил 1,43. Повышение насыпной плотности и склонность материала к консолидации определяют необходимость оснащения бункеров специализированными системами вибрационного рыхления, активаторами материала или скребковыми механизмами. На основании данных экспериментов и анализа значений удельного сопротивления пенетрации (138,89 кПа) установлено, что оптимальная частота вибрации для разрушения межчастичных связей находится в диапазоне 25–35 Гц. Этот диапазон частот подтверждается исследованиями Блехмана И.И. [43] и рассчитан на основе эффекта разрушения кристаллических структур материала.

Для уточнения степени воздействия состава закладочного материала на оборудование были проведены лабораторные испытания абразивности

солеотходов. Потери массы стержня вследствие истирания о поверхность солеотходов в серии испытаний составили: 2,4 мг; 2,5 мг; 2,3 мг; 2,6 мг; 2,5 мг. Среднее значение, рассчитанное по итогам испытаний, составило 2,46 мг. Это соответствует I классу абразивности, что характеризует солеотходы как малоабразивные породы.

Результаты исследования демонстрируют, что солеотходы оказывают минимальное воздействие на износ элементов транспортных систем. Данные характеристики позволяют эффективно применять механизированный, гидравлический и гидромеханизированный виды транспорта без необходимости применения усиленного износостойкого оборудования.

Для оценки устойчивости солеотходов как в покое, так и в движении, а также для определения возможности их транспортирования с использованием конвейерных систем без вывалов по ранее описанной методике были проведены замеры угла естественного откоса смеси солеотходов влажностью до 0,05%. Среднее значение угла естественного откоса в покое (φ_1) составило: 39° .

Максимальный и минимальный угол естественного откоса в движении (φ_i):

$$\varphi_{min} = 0,35 \times 39 = 13,65^\circ \approx 14^\circ$$

$$\varphi_{max} = 0,7 \times 39 = 27,3^\circ \approx 27^\circ$$

Согласно рекомендациям для предотвращения самопроизвольного скольжения материала, угол наклона конвейера должен быть меньше максимального значения угла естественного откоса в движении $\varphi_{max} = 27^\circ$ с учетом запаса. На практике этот запас составляет $2-3^\circ$, что определяет предельный угол наклона для транспортирования солеотходов равным $24-25^\circ$. Угол наклона в движении для конвейеров типа КЛ-1200, КЛ-1000, эксплуатирующихся в настоящее время на Гремячинском ГОКе, составляет 30° , и возможность их применения для транспортирования солеотходов с углом естественного откоса в движении требуется снизить до 27° .

Полученные данные свидетельствуют о необходимости оснащения бункеров системами вибрационного рыхления с частотой 25–35 Гц для разрушения кристаллических связей и предотвращения консолидации материала, что обеспечивает стабильность транспортирования закладочной смеси и минимизацию

динамических нагрузок на конструкцию бункера, а также повышает эффективность закладочных работ на Гремячинском месторождении. Для эффективного планирования закладочных работ необходимо провести всесторонний анализ циклично-поточной, поточной и циклической схем транспортирования закладочного материала.

3.3. Исследование технологических параметров транспортирования закладочных материалов при циклической логистической схеме

Предлагаемая циклическая логистическая схема предусматривает использование в качестве закладочного материала солеотходов, размещаемых в солеотвале и осушаемых естественным путем. Добыча солеотходов осуществляется с использованием бульдозера типа ЧЕТРА Т20 с рыхлителем, погрузчика SDLG L975F для транспортирования материала в приемный бункер мобильной дробильно-сортировочной установки (МДСУ), а также экскаватора SDLG E6500F для обеспечения постоянной загрузки.

МДСУ предназначена для измельчения солеотходов до фракции 1–5 мм и подачи материала на конвейеры Ксс-6 или Ксс-7 с производительностью 600 т/ч. Далее материал перегружается на конвейер Ксс-8 и транспортируется на магистральный конвейер (поз. 384.CV01.1.A) в конвейерной галерее (об. 383). Общая схема процесса представлена на рисунке 3.5.

Для условий Гремячинского ГОКа требуемая производительность закладочного комплекса определяется объемом выхода галитовых отходов с обогатительной фабрики, который составляет в соответствии с проектом 3,431 млн тонн в год, средняя влажность солеотходов – 7,6 %.

Режим работы закладочного комплекса при циклической схеме транспортирования ограничивается режимом работы скиповой подъемной установки и составляет на Гремячинском ГОКе 340 дней в году, 20 часов в сутки. Таким образом, часовая производительность закладочного комплекса составит:
 $Q_{\text{ч}} = 3431000 : 340 : 20 = 504,56 \text{ т/ч.}$

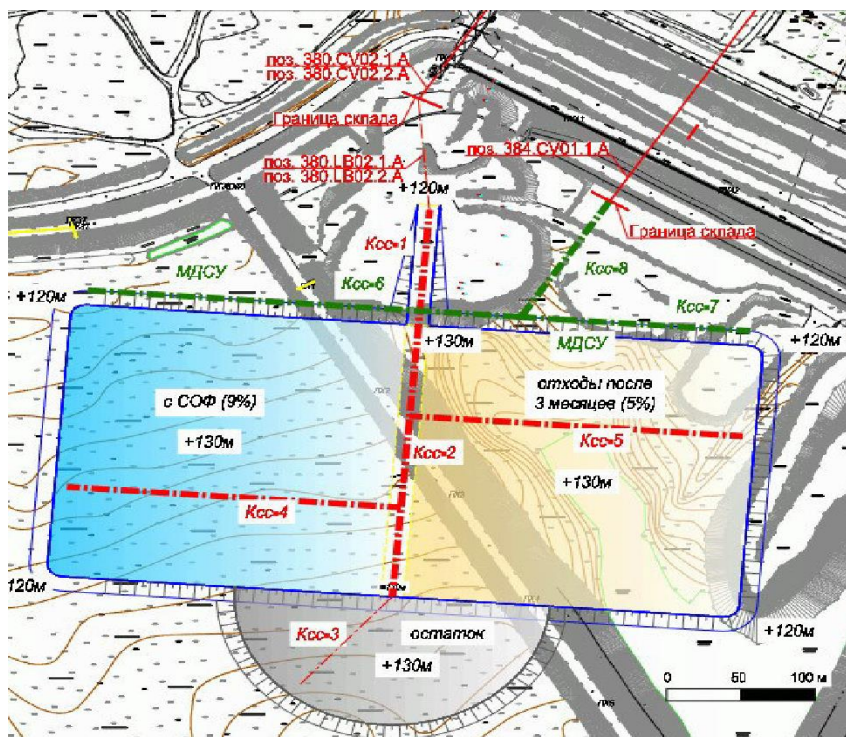


Рисунок 3.5 - Схема склада солеотходов на промплощадке Гремячинского ГОКа

Максимально допустимая масса груза для типовых биг-бэгов составляет 1,5 т. При насыпной плотности солеотходов с влажностью 5% в среднем 1680 кг/м^3 , объем одного контейнера составляет: $V_k = 1500 : 1680 = 0,89 \text{ м}^3$ при размерах $100 \times 100 \times 90 \text{ см}$. Тогда производительность закладочного комплекса по биг-бэгам составит $504,56 / 1,5 = 337$ контейнеров в час.

Анализ технических характеристик существующего оборудования по фасовке мягких контейнеров (МКР) показал, что существуют решения, способные обеспечить номинальную производительность 120 МКР/ч. Для обеспечения требуемой производительности по закладочному материалу необходимо размещение на поверхности трех станций затаривания МКР. Транспортирование солеотходов с места складирования производится конвейером с производительностью 505 т/ч. С конвейера с помощью делителя потока материал поступает в бункер (3 шт). Из бункеров солеотходы перегружаются на скребковые конвейеры, номинальная производительность каждого из которых составляет 169 т/ч. Скребковые конвейеры, доставляют материал на станции затаривания, откуда МКР транспортируются до места складирования ленточными конвейерами производительностью 169 т/ч или 113 МКР/ч.

Технические характеристики скиповой подъемной установки, посредством которой предусмотрено транспортирование закладочного материала в мягких контейнерах, выбираются в соответствии с годовой производительностью рудника. Для условий подземного рудника Гремячинского ГОКа годовая мощность по руде проектом принята 7,3 млн т/год. Проектом предусмотрено применение скиповой установки, характеристики которой представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 - Технические характеристики скиповой подъемной установки № 1 Гремячинского ГОКа

Наименование характеристики	Проектное значение
Скорость подъема	16,5 м/с
Режим работы	340 дней в году 20 ч/сут
Масса груза	59 т
Емкость	44 м ³
Высота подъема	1129 м

В соответствии с проектными характеристиками скиповой установки, общее время движения скипа при проектной скорости 16,5 м/с составляет $T_{\text{дв}} = 104,69$ с, а время цикла с паузой на загрузку равно $T_{\text{ц}} = 134,69$ с. В связи с тем, что транспортирование биг-бэгов с солеотходами в подземный рудник при данном способе производится с помощью скипа, неизбежно увеличение времени нахождения скипа в верхней и нижней точке. Тогда с учетом увеличения паузы на загрузку и разгрузку время одного цикла работы скиповой установки составит $T_{\text{ц}} = 164,69$ с.

Таким образом, число подъемов в час составит $N_{\text{ц, час}} = 3600 \div 164,69 = 21,8$ – скипов в час.

Для обеспечения требуемой по условию полной утилизации солеотходов производительности - 505 т/ч, масса фасованного закладочного материала, транспортируемого в рамках одного цикла спуска-подъема, составит: $m_c = 505 \cdot 21,8 = 23,2$ т, что соответствует массе 16 контейнеров по 1,5 т. Требуемый для перемещения указанной массы фасованных солеотходов объем скипа составит $V_c = \frac{23,2 \cdot 1,3}{1,68} = 18 \text{ м}^3$.

Таким образом, технические характеристики скиповой подъемной установки, предусмотренной разработанными проектными решениями на

Гремячинском ГОКе, в полной мере удовлетворяют требованиям при перемещении в ней фасованных солеотходов для последующей закладки выработанного пространства.

Разгрузка скипа производится в приемный бункер, откуда мягкие контейнеры с помощью перегружателя грузятся в самоходные вагоны.

На рисунке 3.6 приведены схемы предполагаемых маршрутов движения самоходных вагонов от околоствольного двора до наиболее отдаленных панелей главных направлений: для главного западного направления (ГЗН) дальность перевозки до панели 9 ЗП составляет 11,5 км, дальность возврата порожнего транспорта - 12,2 км; для главного восточного направления (ГВН) дальность перевозки до панелей 9 ВП и 13 ВП – 9,8 км, дальность возврата порожнего транспорта - 12,1 км.

Выполненные в соответствии с методикой, представленной в главе 2, расчеты потребного числа самоходных пневмоколесных вагонов типа 10ВС-30М, обеспечивающих транспортирование фасованного закладочного материала до наиболее удаленных панелей, приведены в таблице 3.9.

Таким образом, число самоходных вагонов, обеспечивающих доставку фасованного закладочного материала от места разгрузки из скипа до наиболее отдаленных панелей восточного и западного главных направлений при проектной производительности рудника 7,3 млн т/год, составит 27 шт.

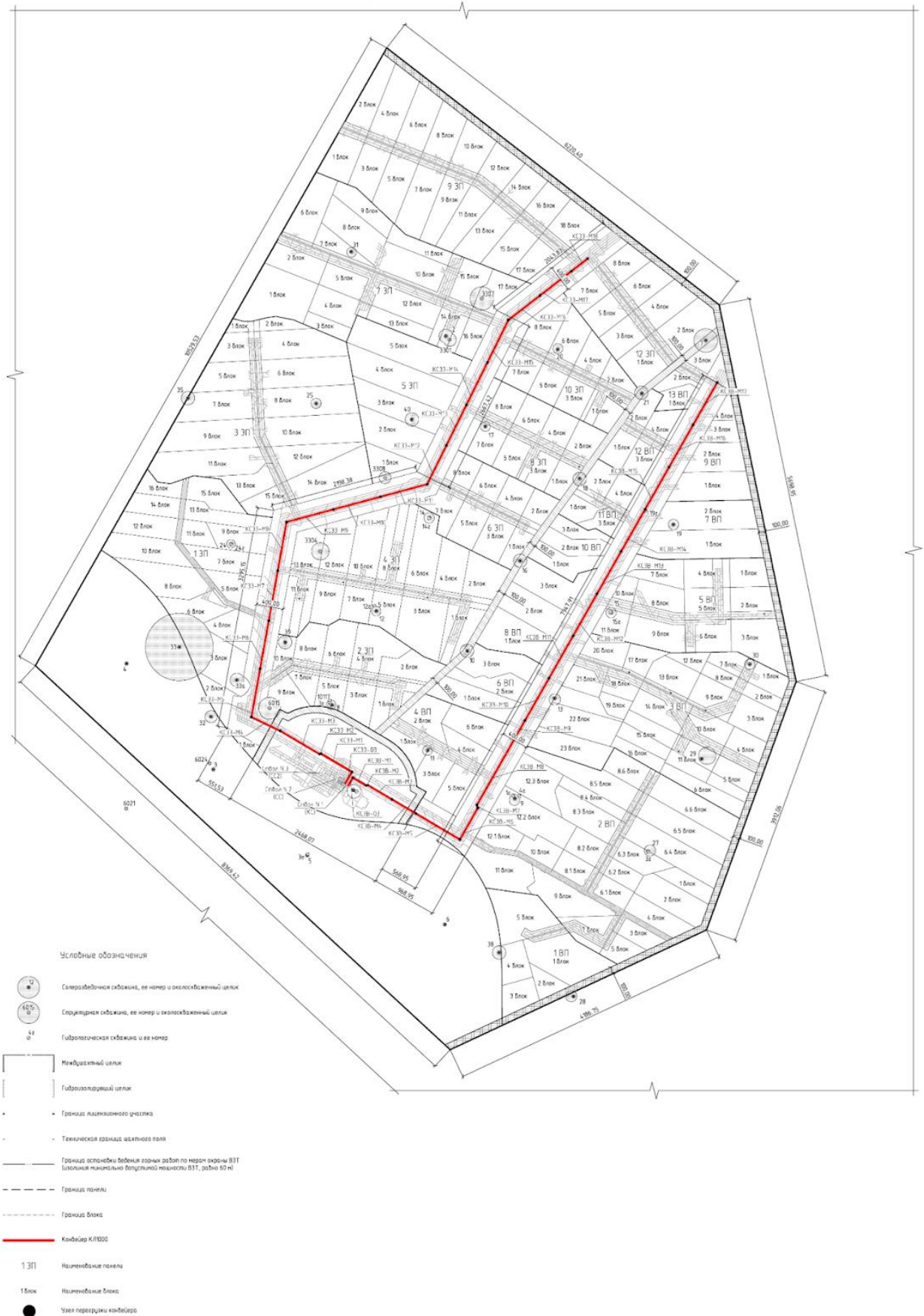


Рисунок 3.6 - Схема маршрутов самоходных вагонов для перевозки МКР

Таблица 3.9 - Расчет количества самоходных вагонов для доставки закладочного материала в МКР

Показатель	Ед. изм.	Обозначение, формула расчета	Значение	
			ГЗН	ГВН
1	2	3	4	5
Часовая производительность закладочного комплекса	т	Q	505	505
Длительность смены	Ч	$T_{см}$	7	7
Сменная производительность закладочного комплекса	т	Q_1	3535	3535
Вместимость кузова самоходного вагона	м ³	$V_{куз}$	23	23
Производительность погрузочной машины непрерывного действия	м ³ /мин	Q_n	19,3	19,3
Скорость движения порожнего вагона	км/ч	$v_{пор}$	7	7
Скорость движения груженого вагона	км/ч	$v_{гр}$	7	7
Коэффициент среднеходовой скорости движения		$k_{с.х}$	0,8	0,8
Коэффициент заполнения кузова		$k_{з.к}$	0,8	0,8
Коэффициент неравномерности грузопотока		k_n	1,3	1,3
Коэффициент использования машины		k_u	0,7	0,7
Эксплуатационная сменная производительность одного вагона	т	$Q_э = 60V_{куз}k_{з.к}\gamma T_{см}k_u / (t_p k_n)$	36,3	38,8
Продолжительность одного рейса транспортной машины	мин	$t = t_{ногр} + t_{дв} + t_{раз} + t_{м.з} + t_{м.р} + t_{разм}$	313,3	292,7
Время погрузки	мин	$t_n = V_{куз} k_{з.к} / Q_n$	1	1
Время движения машины	мин	$t_{дв} = \frac{60L}{k_{с.х}} \left(\frac{1}{v_{гр}} + \frac{1}{v_{пор}} \right)$	270,9	250,3
Время разгрузки	мин	$t_{раз}$	1,5	1,5
Время маневров в забое	мин	$t_{м.з}$	5	5
Время маневров у мест разгрузки	мин	$t_{м.р}$	5	5
Время ожидания на разминовках	мин	$t_{разм} = n_{разм} t_1$	30	30
Число разминок	шт	$n_{разм}$	10	10
Время ожидания на разминовке	мин	t_1	3	3
Возможное число рейсов машины за смену	шт	$n_p = 60(T_{см} - T_{н.з})/t_p$	1,2	1,3
Потребное суммарное число рейсов в смену	шт	$n_c = k_n Q_{см} / (V_{куз} k_{з.к} \gamma)$	20,4	20,4
Потребное число одновременно работающих машин	шт	$z = n_c / n_p$	21	21
Инвентарное число самоходных машин	шт	$z_{ин} = k_p \sum Z$	27	27
Коэффициент, учитывающий нахождение машины в ремонте и резерве		k_p	1,3	1,3
Насыпная плотность	кг/м ³	p	1,68	1,68
Длина транспортирования	км	L	23,7	21,7

Вместе с тем, следует отметить, что увеличение времени цикла работы скиповой установки, связанное с необходимостью загрузки и разгрузки МКР с солеотходами влечет за собой снижение производительности установки по выдаче полезного компонента на поверхность.

Тогда общее время движения скипа при проектной скорости 16,5 м/с составляет $T_{\text{дв}} = 104,69$ с, а время цикла с паузой $t = 30$ с равно $T_{\text{ц}} = 134,69$ с. Количество скипов в час составит:

$$N_{\text{ц.час}} = \frac{3600}{T_{\text{ц}}} = \frac{3600}{134,69} = 26,73 - \text{скипов в час}$$

При этом часовая производительность подъема:

$$A_{\text{час}} = N_{\text{ц.час}} \times Q_{\text{гр.}} \quad (3.2)$$

$$A_{\text{час}} = 26,73 \times 55 = 1470 \text{ т/ч}$$

Количество циклов подъема (скипов) в сутки при бесперебойной работе (без простоев):

$$N_{\text{ц.}} = N_{\text{ц.час}} \times T_{\text{сут.}} \quad (3.3)$$

$$N_{\text{ц.}} = 26,73 \times 20,0 = 534 - \text{скипов в сутки,}$$

где: $T_{\text{сут.}} = T_{\text{I}} + T_{\text{II}} + T_{\text{III}} = 7,5 + 5,0 + 7,5 = 20,0$ час. – нормативное время работы скипового подъема в сутки в соответствии с принятыми проектными решениями.

При этих условиях годовая производительность скипового подъема составит:

$$A_{\text{год.}} = \frac{N_{\text{ц.}} n_{\text{год}} Q}{k_{\text{н}}}; \quad (3.4)$$

$$A_{\text{год.}} = \frac{534 \times 340 \times 55}{1,35} = 7\,396\,890 \text{ т/год,}$$

где: $n_{\text{год.}} = 340$ – число рабочих дней в году с учетом регламентных работ и технического обслуживания; $k_{\text{н}} = 1,35$ – коэффициент неравномерности подъема; $Q_{\text{гр.}} = 55$ т – вес груза с учетом коэффициента наполнения скипа.

Таким образом, расчетная проектная годовая производительность скипового подъема обеспечивает подъем на поверхность до 7,3 млн.т руды в год. При увеличении времени цикла скиповой установки на 30 секунд количество скипов в час составит:

$$N_{\text{ц.час}} = \frac{3600}{T_{\text{ц}}} \quad (3.5)$$

$$N_{\text{ц.час}} = \frac{3600}{164,69} = 21,86 \text{ скипов в час или } 437,2 \text{ скипов в сутки.}$$

Тогда годовая производительность скипового подъема составит:

$$A'_{\text{год}} = \frac{437,234055}{1,35} = 6\,056\,030 \text{ т/год}$$

Повышение времени цикла работы скиповой установки за счет увеличения времени загрузки и разгрузки закладочного материала влечет за собой снижение объемов выдаваемого на поверхность полезного компонента на 18%. Для компенсации этих потерь требуется изменение принятых параметров спуска-подъема. Так как максимальная скорость существующих на сегодняшний день скиповых установок ограничивается их техническими характеристиками и составляет 20 м/с, то общее время движения скипа составляет $T'_{\text{дв}} = 112,9 \text{ с}$, а время цикла с паузой $t = 60 \text{ с}$ равно $T'_{\text{ц}} = 172,9 \text{ с}$.

Количество скипов в час составит:

$$N'_{\text{ц, час}} = \frac{3600}{172,9} = 20,8 \text{ – скипов в час}$$

Грузоподъемность скипа для достижения требуемой производительности должна составлять:

$$q'_{\text{ск}} = \frac{1449,3}{20,8} = 69,7 \text{ т}$$

Объем скипа с учетом плотности и коэффициента заполнения:

$$V'_c = \frac{69,7}{1,68 \cdot 0,9} = 46,1 \text{ м}^3$$

Для обеспечения производительности 1449,3 т/ч при скорости 20 м/с необходим объем скипа не менее 46,1 м³, что весьма затруднительно в условиях действующего скипового подъема рудника Гремячинского ГОКа. Следовательно, требуется корректировка других параметров, например, сокращение времени загрузки/разгрузки.

При известной требуемой производительности и заданном проектом объеме скипа, рассчитывается время цикла:

$$\begin{aligned} T''_{\text{ц}} &= \frac{360066,5}{1449,3} = 165,2 \\ T''_{\text{дв}} &= \frac{2H}{v} = \frac{2 \cdot 1129}{20} = 112,9 \text{ с} \\ T'' &= T''_{\text{ц}} - T''_{\text{дв}} = 165,2 - 112,9 = 52,3 \text{ с} \end{aligned}$$

Для достижения производительности 1449,3 т/ч при скорости 20 м/с и объеме скипа 44 м³ суммарное время загрузки и разгрузки должно составлять $\approx 52,3$ секунды, вместо исходных 60 секунд, что означает необходимость сокращения

времени на 7,7 секунд (на 12,8%). Цикличная схема транспортирования представлена на (рис. 3.7).

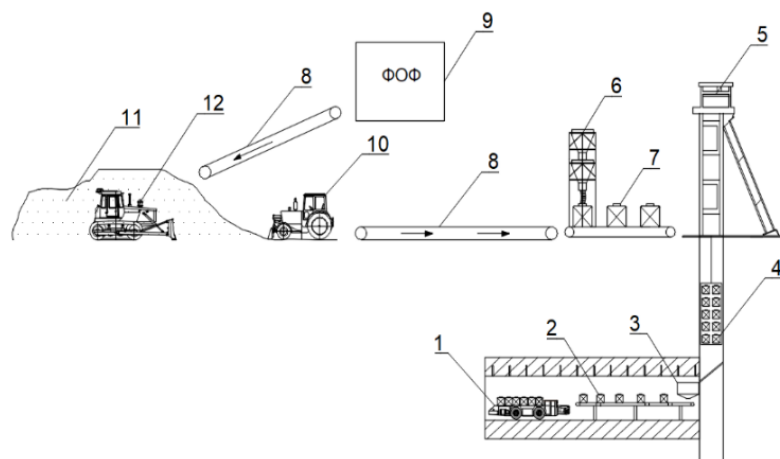


Рисунок 3.7 – Цикличная логистическая схема движения закладочных материалов и смеси: 1 - самоходный вагон; 2 - перегружатель; 3 - бункер; 4 - скип; 5 - копер; 6 - станция затаривания мягких контейнеров; 7 - мягкий контейнер; 8 - магистральная конвейерная линия; 9 - флотационная обогатительная фабрика; 10 - фронтальный погрузчик; 11 - бульдозер-рыхлитель; 12 - солеотвал.

Таким образом, при цикличной логистической схеме транспортирования закладочных материалов достижение требуемой часовой производительности подъемной установки в 1449,3 т/ч или 690,13 м³/ч, обеспечивающей годовую производственную мощность рудника Гремячинского ГОКа в 7,3 млн тонн, достигается модернизацией скипового подъема, включающей оптимизацию и варьирование ключевых технологических параметров режима работы скиповой установки: скорости движения, времени загрузки-разгрузки и объема скипа, что требует комплексного анализа с учетом эксплуатационных рисков и требований безопасности.

3.4. Исследование технологических параметров транспортирования закладочных материалов при циклично-поточной логистической схеме

Реализация циклично-поточной схемы закладочных работ на глубокозалегающих месторождениях калийных солей с отдельной транспортировкой солеотходов в условно сухом состоянии и соляных растворов предусматривает использование одного закладочного комплекса, который будет обеспечивать весь объем закладочных работ на руднике. Для закладки

рекомендовано использовать солеотходы из солеотвала и солеобогащительной фабрики (СОФ) [144]. Весь закладочный комплекс разделен на 4 модуля: поверхностный, стволовой, горизонтальный подземный и камерный. Название комплексов соответствуют их функциональному назначению (рис. 3.8).

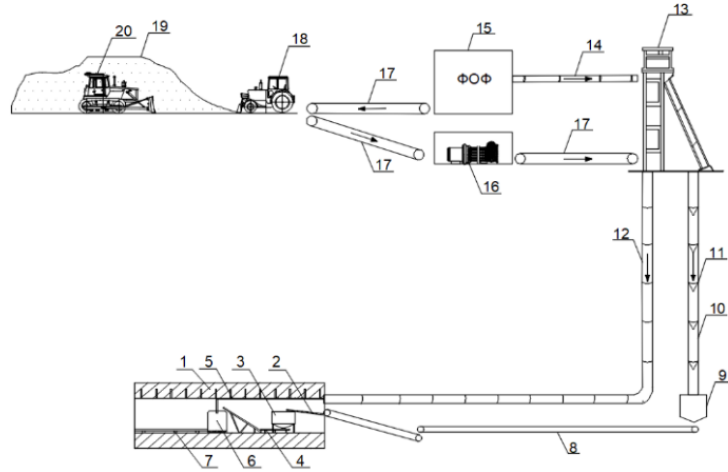


Рисунок 3.8 – Циклично-поточная логистическая схема движения закладочных материалов и смеси: 1 — техническая камера; 2 — конвейер для подачи солеотходов; 3 — бункер-питатель; 4 — питающий конвейер; 5 — участковый трубопровод с рассолом; 6 — смеситель; 7 — участковый закладочный конвейер; 8 — магистральная конвейерная линия; 9 — приемный бункер; 10 — солеспуск; 11 — буферный гаситель; 12 — подземный рассолопровод; 13 — стволовой комплекс подачи солеотходов; 14 — поверхностная часть рассолопровода; 15 — обогащительная фабрика; 16 — модуль обезвоживания отходов обогащения; 17 — конвейер; 18 — фронтальный погрузчик; 19 — солеотвал; 20 — бульдозер-рыхлитель

Поступление материала на поверхности организовано из двух источников. Первым источником служит солеотвал (19), где бульдозер-рыхлитель (20) разрабатывает откос и формирует штабеля, а фронтальный погрузчик (18) перегружает солеотходы на прием узла конвейера (17), после чего поток направляется на модуль обезвоживания (16) для доведения влажности до требуемых значений. Далее объединенный поток транспортируется конвейерами (17) в надшахтную галерею стволового комплекса (13) и передается в стволовой модуль. Вторым источником является рассол с фабрики (15), который транспортируется по трубопроводу к стволу (14).

Спуск сухих солеотходов выполняется по солеспуску (10) стволового комплекса (13). На потоке установлены буферные гасители (11), что стабилизирует

скорость и снижает ударные нагрузки при перепуске в околоствольное пространство. Параллельно подается рассол по линии (14) и затем по подземному рассолопроводу (12) он направляется к месту приготовления смеси.

В стволовом модуле солеотходы после гашения скорости аккумулируются в приемном бункере (9). Из бункера дозированные порции поступают на магистральную конвейерную линию (8), которая обеспечивает транспортирование в район ведения закладочных работ. На участке работ материал передается на участковые конвейеры (2) и (7) через питающий конвейер (4), после чего подается в смеситель (6). В смеситель подается и рассол по участковому трубопроводу (5). В результате формируется закладочная смесь требуемой подвижности и концентрации твердой фазы. Готовая смесь в зоне закладочных работ направляется в техническую камеру (1) для укладки.

В процессе укладки закладочного материала используется блочный конвейер короткой длины, обеспечивающий подачу солеотходов в пневмозакладочный питатель. Одновременно с этим осуществляется подача рассолов в смеситель для получения закладочной смеси требуемой консистенции. Транспортировка материала производится посредством пневмонасосов через трубопроводную систему, предпочтительность которой подтверждена опытно-промышленными испытаниями [91].

Исходные данные для расчета конструктивных параметров схемы перепуска, обезвоженных солеотходов сведены в таблицу 3.10.

Таблица 3.10 - Исходные данные для расчета транспортирования обезвоженных солеотходов по закладочному трубопроводу.

Параметр	Обозначение	Значение
Глубина трубопровода	$h, \text{ м}^3$	1110,3
Ускорение свободного падения	$g, \text{ м/с}^2$	9,81
Коэффициент трения для стали Ст3	φ	0,03
Диаметр трубопровода	$D, \text{ м}$	0,273
Насыпная плотность материала	$\rho, \text{ кг/м}^3$	1150
Истинная плотность материала	$\rho, \text{ кг/м}^3$	2100
Начальная скорость движения материала	$V, \text{ м/с}$	2

Расчет конструктивных параметров схемы спуска солеотходов по стволу выполнен в соответствии с методикой, описанной в главе 2 настоящей диссертации.

1. Расчёт поперечного сечения трубы:

$$S = 3,1416 \times (0,1365)^2 = 0,0585 \text{ м}^2 \quad (3.6)$$

2. Определение предельной скорости падения с учётом действия сил трения:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 1110,3}{1 + 0,03}} = 145,46 \text{ м/с} \quad (3.7)$$

3. Сила трения:

$$F_{\text{тр}} = 0,03 \cdot 1150 \cdot 9,81 \cdot 0,0585 = 19,75 \text{ Н}$$

Сила тяжести на единицу длины:

$$F_{\text{тр}} = 1150 \cdot 9,81 \cdot 0,0585 = 658,26 \text{ Н}$$

Влияние трения минимально (около 3%).

4. Расчёт производительности схемы спуска материала по вертикальному трубопроводу:

$$Q = 7 \cdot 0,0585 \cdot 1,150 \cdot 0,3 = 508 \text{ т/ч}$$

По результатам исследований слеживаемости обезвоженных солеотходов и анализа условий пылеобразования в рудничной среде Гремячинского ГОКа подтверждена необходимость разработки конструкции бункера с включением демпферных элементов. Примером такого устройства является пружинный демпфер, который способен уменьшить энергию падения высокоскоростных частиц закладочного материала и, тем самым, исключить разрушения и измельчение солеотходов и снизить воздействие на бункер-накопитель, обеспечив безопасную и эффективную транспортировку частиц закладочного материала с поверхности в подземный рудник.

На основе анализа существующих решений выделен демпфер конического типа. Такого рода устройство для гашения энергии состоит из демпферного и ограничительного механизма (рис. 3.9). Демпферный механизм включает в себя конический гаситель скорости 2, демпферное основание 5 и амортизирующие пружины 6, а также ограничительный механизм, содержащий верхнюю ограничительную гайку 4, нижнюю ограничительную гайку 7 и направляющие 3. Конический гаситель 2 закреплен на демпферном основании 5, которое соединено с направляющими 3 посредством переходных колец. Верхняя и нижняя ограничительные гайки крепятся к буферному основанию и направляющим. Направляющие крепятся к наружной стенке трубопровода - 1 или к иной неподвижной поверхности посредством жесткой фиксации.

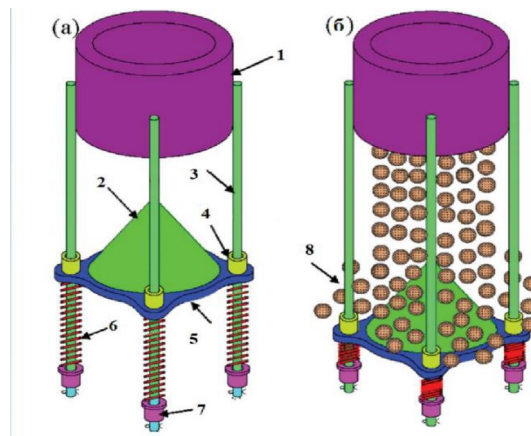


Рисунок 3.9 - Основные конструктивные элементы демпферного устройства: 1 – транспортный трубопровод; 2 – конический гаситель; 3 – направляющие; 4 – верхний ограничитель; 5 – демпферная база; 6 – амортизирующие пружины; 7 – нижний ограничитель; 8 – транспортируемый материал

Как показано на рисунке 3.9, частицы закладочного материала поступают на демпферное устройство по трубопроводу, где часть ударных и вибрационных колебаний поглощается колебательными нагрузками, создаваемыми коническим гасителем скорости, который с уменьшенной скоростью движения закладочного материала до 7 м/с далее подает его в накопительный бункер. Демпферный механизм обеспечивает многократное гашение и восстановление под действием амортизирующей пружины. Стоит отметить, что рассматриваемая конструкция требует опытно-промышленной апробации в рудничных условиях, но реализует принцип строения демпферного устройства в приемном бункере.

Конический гаситель (рис. 3.10) со своей стороны является составной частью демпфера, находящегося в непосредственном контакте с частицами транспортируемого материала. Следует отметить, что частицы перепускаемых солеотходов являются агрессивной средой и при контакте с коническим гасителем изнашивают его, поэтому он должен обладать высокой износостойкостью и прочностными характеристиками. Но, при этом, возникают противоречивые требования к материалу, где повышение износостойкости влечет за собой увеличение прочности, а повышенная прочность, в свою очередь, усложняет сварку конического защитного покрытия. Поэтому, конический гаситель имеет смысл рассчитывать в двухслойном исполнении. Внутренний слой – сталь, а внешний слой 2– износостойкий материал. При этом, оптимальный угол конуса, согласно

исследованиям [23], составляет 60° , но так как требование технологической работоспособности состоит в превышении угла естественного откоса материала, по результатам лабораторных испытаний для солеотходов получено $\varphi = 39^\circ$; следовательно, угол конуса для самотечного скольжения без закупоривания и сводообразования равен $\varphi_{\text{гас}} = 100^\circ$. Геометрические параметры конического гасителя указаны на рисунке 3.10.

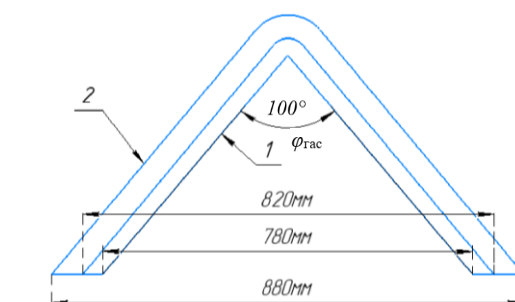


Рисунок 3.10 - Геометрические параметры конического гасителя: 1 – внутренний слой; 2 – внешний слой

Применительно к подземным условиям представляет интерес буферное устройство, конструкция которого приведена на рисунке 3.11. Устройство представляет собой ударопрочную поверхность, закрепленную на неподвижной траверсе через демпфирующее приспособление, которое необходимо для гашения сил падения, которые сыпучие солеотходы набирают при перепуске по трубопроводу (рис. 3.11).

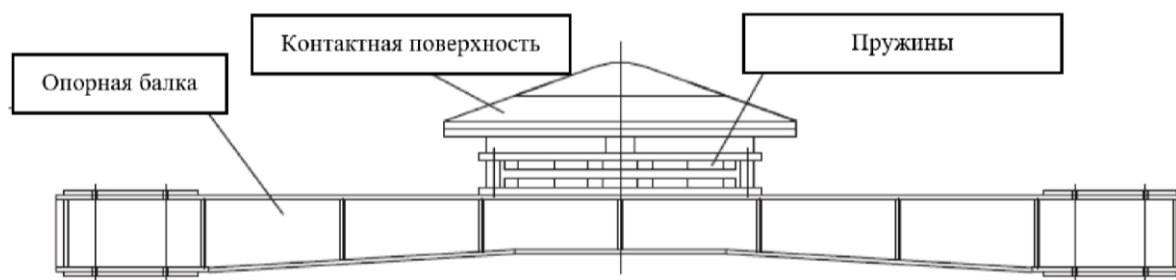


Рисунок 3.11 - Принципиальная схема конструкции буферного устройства

После процесса перепуска и демпферного гашения энергии падения и удара сыпучей смеси солеотходов необходимо ее аккумулировать, прежде чем подавать на следующую ступень транспортирования. Такой функционал выполняет бункер-накопитель, который в разрезе представляет собой капитальное сооружение конусообразной формы, оборудованное дозатором для выпуска сыпучей смеси,

системой сжатого воздуха для предотвращения закупоривания бункера, демпферным устройством для гашения энергии смеси (рис. 3.12).

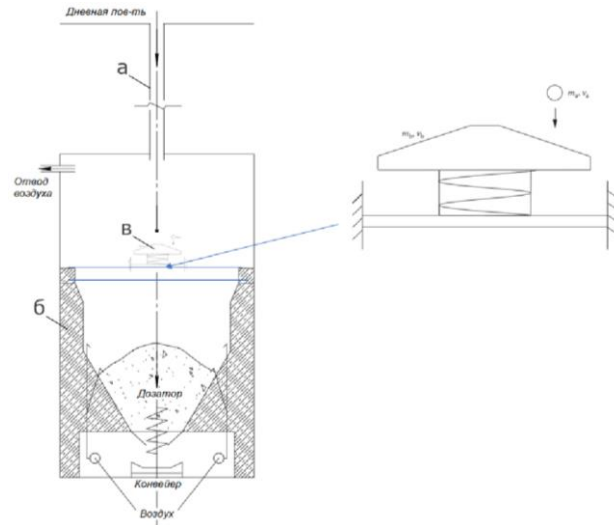


Рисунок 3.12 - Предлагаемая конструкция подземного бункера-накопителя с демпфирующим устройством: а – перепускной трубопровод, б – корпус бункера-накопителя, в – демпфер для гашения энергии сыпучей смеси

Для предотвращения превышения этой критической высоты смеси в бункере-накопителе необходимо предусмотреть установку уровнемеров, которые в режиме реального времени производят замер уровня солеотходов и передают сигнал на поверхность для прекращения подачи материала в солепровод. Следует отметить, что, уплотнение смеси является неизбежной проблемой при транспортировке солеотходов «сухим» способом, поэтому необходимо предусмотреть систему разрыхления закупоренной массы в дозаторной зоне. С этой целью в полости бункера необходимо предусмотреть порты для продувки (рис. 3.13), представляющие собой трубчатые проводники сжатого воздуха, поступающего из пневматических резервуаров под высоким давлением. Для эффективно удаления избыточного давления воздуха в системе необходимо предусмотреть систему сброса воздуха в верхней части бункера накопителя.

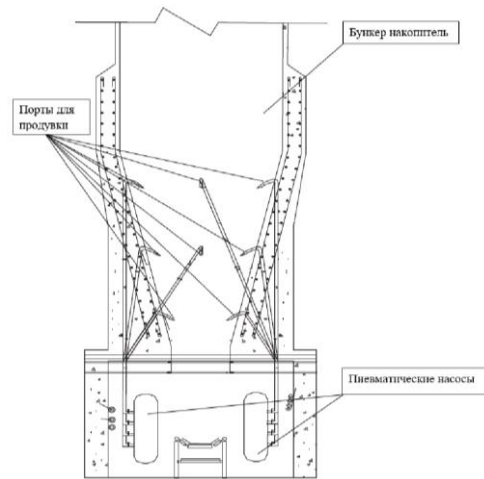


Рисунок 3.13 - Система ликвидации десегрегации солеотходов в дозаторной части бункера-накопителя

Описанная технология предварительного гашения энергии сыпучей смеси нуждается в промышленных испытаниях, поскольку избыточное давление внутри бункера может негативно сказаться на уплотнении материала, а также на целостности конструктивных элементов самого бункера.

Далее материал из бункера поступает на конвейер. Расчет производительности и режима работы конвейера производится по формуле 2.21 при заданном скоростном диапазоне ленты от 0,8 м/с до 3,15 м/с.

Для минимальной скорости $v=0,8$ м/с:

$$Q = 0,8 \cdot 1150 \cdot 0,85 \cdot 1,0 \cdot \left(\frac{1,0}{1,1} - 0,05 \right)^2 = 684,9 \text{ т/ч}$$

Для максимальной скорости $v=2$ м/с:

$$Q = 2 \cdot 1150 \cdot 0,85 \cdot 1,0 \cdot \left(\frac{1,0}{1,1} - 0,05 \right)^2 = 1442,5 \text{ т/ч}$$

Производительность конвейера максимальная: $Q_k = 1442,5$ т/ч, запас времени для бункера $t_z = 1$ ч. Бункер ограничен высотой выработок околоствольного двора: $h \leq 5$ м – соответственно для устойчивой формы верхний радиус (R_1) должен быть равен 5 м, а нижний радиус (R_2) – 0,2 м. Угол наклона стенок нижней части бункера для предотвращения залипания материала относительно горизонтали определялся по формуле 2.18 и равен

$$\varphi_{\text{стенки}} = 50^\circ$$

В соответствии с этим определим проектный объем бункера:

$$V_{\text{геом}} = \frac{1}{3} \times 3,1416 \times 5 \times (5^2 + 5 \times 0,2 + 0,2^2) = 139,36 \text{ м}^3$$

И пропускную способность:

$$Q_T = 1442,5 + 136,39 = 1578,89 \text{ т/ч}$$

где Q_6 – грузоподъемность бункера:

$$Q_6 = V_6 \times p; \quad (3.8)$$

$$Q_6 = 136,38 \cdot 1150 = 156837 \text{ кг} = 156,8 \text{ т}$$

С учетом обоснованной производительности трубопровода пропускная способность бункера составит:

$$Q_T = V_6 \times t_3 + Q_K, \quad (3.9)$$

$$Q_T = 1735,69 \text{ т/ч}$$

На основе проведенных расчетов и анализа технологических параметров системы транспортирования обезвоженных солеотходов в условиях Гремячинского ГОКа были определены ключевые характеристики, обеспечивающие эффективность и ритмичность процесса эксплуатации (табл. 3.11).

Таблица 3.11 - Технологические параметры системы транспортирования обезвоженных солеотходов при циклично-поточной схеме

Параметр	Обозначение	Значение
1	2	3
Вертикальный трубопровод		
Диаметр трубопровода	D, м	0,273
Площадь поперечного сечения	S, м ²	0,0585
Предельная скорость падения материала	V, м/с	145,46
Скорость материала на выходе из трубопровода	V, м/с	7
Сила трения на единицу длины	Fтр, Н	19,75
Производительность	Q, т/ч	508,5
Бункер-накопитель		
Геометрический объем	Vгеом, м ³	139,36
Масса аккумулируемого материала	V6, т	156,8
Угол наклона стенок	φ, °	50 °
Конвейерная система		
Производительность (минимальная)	Qмин, т/ч	450,9
Производительность (максимальная)	Qмакс, т/ч	1442,5
Ширина ленты	B, м	1,0
Демпферные устройства		
Угол конусного гасителя	a, °	100
Общая производительность системы		
Согласованная производительность	Qобщ, т/ч	506,9

Таким образом, реализация циклично-поточной схемы транспортирования закладочных материалов на Гремячинском ГОКе, интегрирующей модульную структуру (поверхностный, стволовой, горизонтальный, камерный модули) с

использованием обезвоженных солеотходов и соляных растворов, обеспечивает производительность до 684,9 т/ч за счет оптимизации диаметра трубопровода 273 мм, бункеров-накопителей геометрическим объемом 139,36 м³ и системой пневматической продувки, что позволяет минимизировать слеживание материала, снизить износ оборудования и обеспечить безопасность при транспортировке на глубине 1110,3 м, соответствующей проектным параметрам рудника.

3.5. Исследование технологических параметров транспортирования закладочных материалов при поточной логистической схеме транспортирования

Для соблюдения параметров технологии закладки на базе формирования консолидированных закладочных массивов требуется поиск решений по высокопроизводительной подаче солеотходов и рассола в единой логистической системе прямых и возвратных грузопотоков рудника.

При реализации поточной схемы транспортирования полученная на поверхностном комплексе гидрозакладки пульпа транспортируется в клетевой ствол, откуда направляется в выработанное пространство рудника (рис. 3.14). Поступление закладочного материала организовано из двух источников. Поток с солеотвала (14) формируется бульдозером-рыхлителем 15, после чего фронтальный погрузчик (13) подает солеотходы на магистральную конвейерную линию (12) в сторону корпуса пульпоприготовления. Параллельно из флотационной обогатительной фабрики (11) по рассолопроводу (10) поступают шламы и оборотный рассол. В корпусе пульпоприготовления материал смешивается с рассолом до регламентируемой плотности пульпы, а две емкости-аккумуляторы обеспечивают непрерывность работы и сглаживание колебаний подачи. Готовая пульпа направляется в надшахтную часть стволового комплекса у копра (9) и далее по пульпопроводу (8) перепускается по вертикальному модулю.

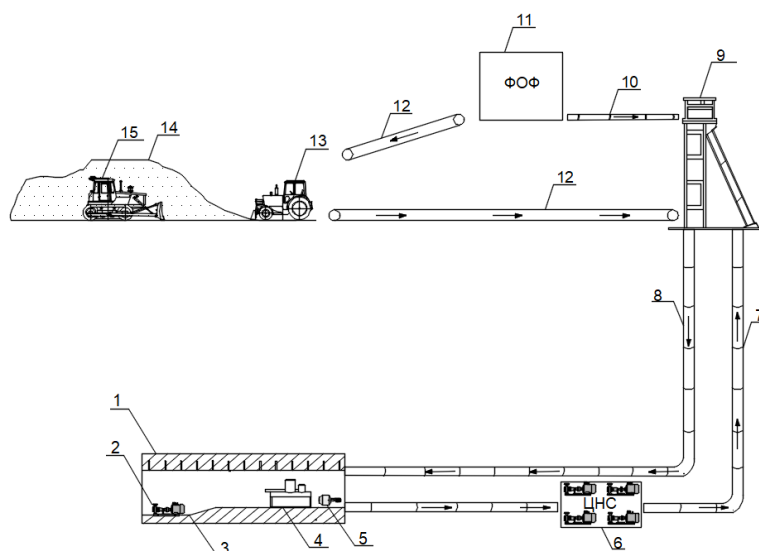


Рисунок 3.14 – Поточная логистическая схема движения закладочных материалов и смеси: 1 - техническая камера; 2 - погружной насос для откачки избыточных рассолов; 3 - приямок; 4 - метатель; 5 - гидроциклон; 6 - центральная насосная станция; 7 - рассолопровод; 8 - пульпопровод; 9 - копер; 10 - рассолопровод; 11 - флотационная обогатительная фабрика; 12 - магистральная конвейерная линия; 13 - фронтальный погрузчик; 14 - солеотвал; 15 - бульдозер-рыхлитель.

На подземном горизонте поток пульпы распределяется по горизонтальным коммуникациям к районам ведения работ, при этом центральная насосная станция (6) поддерживает требуемые расходы и напоры, а также обеспечивает возврат избыточного рассола. В камерном модуле используются гидроциклон (5) для корректировки грансостава и обезвоживания до требуемой влажности, метатель (4) для распределения потока по фронту укладки, приямок (3) для сбора жидкости и погружной насос (2) для ее откачки. Укладка ведется в технической камере 1 с контролем уровня и скорости поступления, отвод излишков рассола возвращается в оборот через систему рассолопроводов (7) [16, 143].

Исходя из проектной производительности Гремячинского ГОКа мощность гидрозакладочного комплекса установлена в объеме $Q_{\text{гал}}$ 3, 431 млн. тонн (по твердому) галитовых отходов и $Q_{\text{шлам}}$ 0, 340 млн. тонн (по твердому) шламов в год. Годовой фонд работы гидрозакладочного комплекса принят согласно режиму работы обогатительной фабрики и составляет 340 дней (8160 часов).

Годовой фонд закладочных работ Тп.п., соответствующий времени подачи пульпы, с учетом обязательных технологических промывок пульпопроводов, определяется по следующей формуле:

$$T_{\text{п.п.}} = n_2 \cdot (T_{\text{з.сут}} - n_{\text{пр}} \cdot T_{\text{пр}}) \text{ ч}, \quad (3.10)$$

где: n_2 — количество дней работы фабрики в году (340 дней);
 $T_{\text{з.сут}}$ — продолжительность работы гидрозакладочной установки в сутки, ч;
 $n_{\text{пр}}$ — количество промывок в сутки; $T_{\text{пр}}$ — продолжительность одной промывки пульпопровода, ч.

Промывка пульпопроводов производится один раз в сутки в течение 2 часов.

$$T_{\text{п.п.}} = 340 \cdot (24 - 1 \cdot 2) = 7480 \text{ ч.}$$

В соответствии с режимом работы подземного закладочного комплекса предполагается выполнение закладочных работ одновременно на трех участках шахтного поля. При этом на двух участках осуществляется закладка солеотходов, а на третьем ведутся подготовительные работы.

Часовая производительность гидрозакладочного комплекса Q_c , т/ч, по солеотходам определяется по формуле:

$$Q_c = \frac{Q_e}{T_{\text{п.п.}}} \text{ т/ч}, \quad (3.11)$$

$$Q_c = \frac{3771000}{7480} = 504,14 \text{ т/ч},$$

где Q_e — годовая мощность гидрозакладочного комплекса по солеотходам и шламам, т; $T_{\text{п.п.}}$ — годовой фонд работы гидрозакладочного комплекса, ч.

Мощность комплекса в м³/год для галитовых отходов:

$$V_{\text{гал}} = \frac{3,431 \cdot 10^9 \text{ кг/год}}{2100 \text{ кг/м}^3} \approx 1633 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{год}$$

Мощность комплекса в м³/год для шламовых отходов:

$$V_{\text{гал}} = \frac{0,340 \cdot 10^9 \text{ кг/год}}{1577 \text{ кг/м}^3} \approx 215,633 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{год}$$

Часовая производительность закладочного комплекса по солеотходам и шламам должна соответствовать = 247 м³/ч при работе 340 дней в году по 22 часа.

Плотность обратного рассола с обогатительной фабрики составляет 1230 кг/м³. При стандартном отношении Ж:Т в 2:1 расход рассола Ж - 494 м³/ч, расход твёрдой фазы Т - 247 м³/ч, суммарный объёмный расход установки равен 741 м³/ч, массовый расход рассола составит 607,62 т/час

При подаче пульпы на два участка закладки производительность одной установки пульпоприготовления составляет 252,07 т/час. Производительность гидротранспортной системы подачи шламов, поступающих в виде пульпы, рассчитывается на основе исходных данных и составляет объем подачи пульпы от 70 до 85 м³/ч. Основными параметрами трубопроводного транспорта являются производительность, диаметр трубопровода, длина транспортирования и др. В качестве начального значения диаметра трубопровода задан $D_{\text{вн}}=250$ мм, что соответствует практике, применяемой на месторождениях ВКМКС.

Данные для расчета показателей гидрозакладочного комплекса сведены в таблицу 3.12.

Таблица 3.12 - Исходные данные для расчета транспортирования солеотходов по закладочному трубопроводу.

Параметр	Обозначение	Значение
Глубина трубопровода	h , м ³	1110,3
Ускорение свободного падения	g , м/с ²	9,81
Коэффициент трения для стали Ст3	ψ	0,03
Насыпная плотность материала	P , кг/м ³	1150
Плотность твердой фазы	ρ_c , кг/м ³	2100
Плотность суспензии шламов (разгрузка сгустителя ФОФ)	$\rho_{\text{ш.п}}$, кг/м ³	1577
Плотность оборотного рассола	ρ_p , кг/м ³	1230
Начальная скорость движения материала	V , м/с	1

Критическая скорость пульпы ($v_{\text{кр}}$), при которой твердые частицы не выпадают из потока, рассчитывается по формуле 2.13:

$$V_{\text{кр}} = 10,58 \cdot 0,25 \approx 2,65 \text{ м/с, тогда}$$

$$V_{\text{раб}} = 2,65 \cdot 1,1 \approx 2,92 \text{ м/с,}$$

Проверка расхода пульпы м³/ч,

$$Q_{\text{п}} = 3600 \cdot \frac{\pi \cdot 0,25^2}{4} \cdot 2,92 \approx 515 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Расчетный расход пульпы (515 м³/ч) оказался меньше требуемого значения (741 м³/ч). Это указывает на необходимость увеличения диаметра трубопровода для обеспечения заданной производительности.

$$D_{\text{вн}} = \sqrt{\frac{741}{900 \cdot 3,14 \cdot 2,92}} = 0,31 \text{ м}$$

Для нового диаметра $D_{\text{вн}} = 310$ мм пересчитаем критические и рабочие параметры, критическая скорость:

$$v_{\text{кр}} = 10,58 \cdot 0,31 \approx 3,28 \text{ м/с}$$

Рабочая скорость:

$$v_{\text{раб}} = 1,1 \cdot 3,28 \approx 3,61 \text{ м/с.}$$

Процесс подачи солеотходов гидротранспортом предусматривает обязательное проведение технологических промывок пульпопроводов рассолом. В штатном режиме для промывки пульпопроводов используется рассол, который подается из центральной насосной станции подземного комплекса рудника. В случае аварийных ситуаций промывка гидропровода осуществляется рассолом, который хранится в специальных баках, размещенных вблизи корпуса пульпоприготовления. Полезный объем таких баков рассчитывается с учетом необходимости одновременной промывки двух пульпопроводов, а также одного шламопровода. Также необходимо предусмотреть емкость для сбора растворов после промывки гидропровода.

Для обеспечения длительной эксплуатации системы и минимизации рисков при авариях расчетный срок службы баков принят с учетом периода эксплуатации в 25 лет. С учетом обслуживаемого участка шахтного поля длина одного пульпопровода до наиболее удаленной панели на западном направлении составляет 11250 м, а до наиболее удалённой панели на восточном направлении - 9800 м. Необходимый объём рассола для промывки двух пульпопроводов диаметром 310 мм с учетом коэффициента запаса 5%:

$$V_6 = 1,05 \cdot 11250 \cdot (2 \cdot 0,785 \cdot 0,310^2) = 1783 \text{ м}^3$$

Разработанная логистическая схема транспортирования закладочных материалов для калийных рудников, основанная на интеграции прямых и возвратных грузопотоков с использованием обезвоженных солеотходов (влажностью 8-9%) и рассола, обеспечивает формирование консолидированных закладочных массивов с заданными реологическими и прочностными характеристиками, достигая производительности 504,14 т/ч по солеотходам и 247 м³/ч по шламам, при этом исключая необходимость промежуточного хранения материалов при работе в без аварийном режиме за счет автоматизации процессов, оптимизации диаметра трубопровода (310 мм) и критической скорости потока (3,28 м/с),

3.6. Разработка алгоритма выбора логистической схемы закладочных работ

Как указано ранее, при выборе оптимальной логистической схемы закладки необходимо учитывать широкий спектр взаимосвязанных факторов, включая производительность системы, геологические, горнотехнические характеристики месторождения, объёмы и технологические свойства закладочных материалов, а также ограничения, связанные с их влажностью и физико-механическими характеристиками.

На основе изученных материалов и результатов выполненных расчетов разработан алгоритм выбора логистической схемы ведения закладочных работ при разработке глубокозалегающих месторождений водорастворимых полезных ископаемых (рис. 3.15). Данный алгоритм предусматривает учет расчетных параметров трубопроводов и конвейеров, характеристик влажности и физико-механических свойств закладочных материалов, а также ограничения, связанные с влажностью солеотходов.

На первом этапе проводятся комплексные исследования горно-геологических условий месторождения. В рамках исследований особое внимание уделяется глубине залегания соляных пластов, а также углу их падения, геомеханическим характеристикам и устойчивости массива горных пород. Существенное внимание уделяется характеристикам трещиноватости и иных структурных нарушений защитных пачек карналлита, сильвинита и налегающих пород. Эти характеристики имеют первостепенное значение при оценке склонности пород к пучению и деформациям.

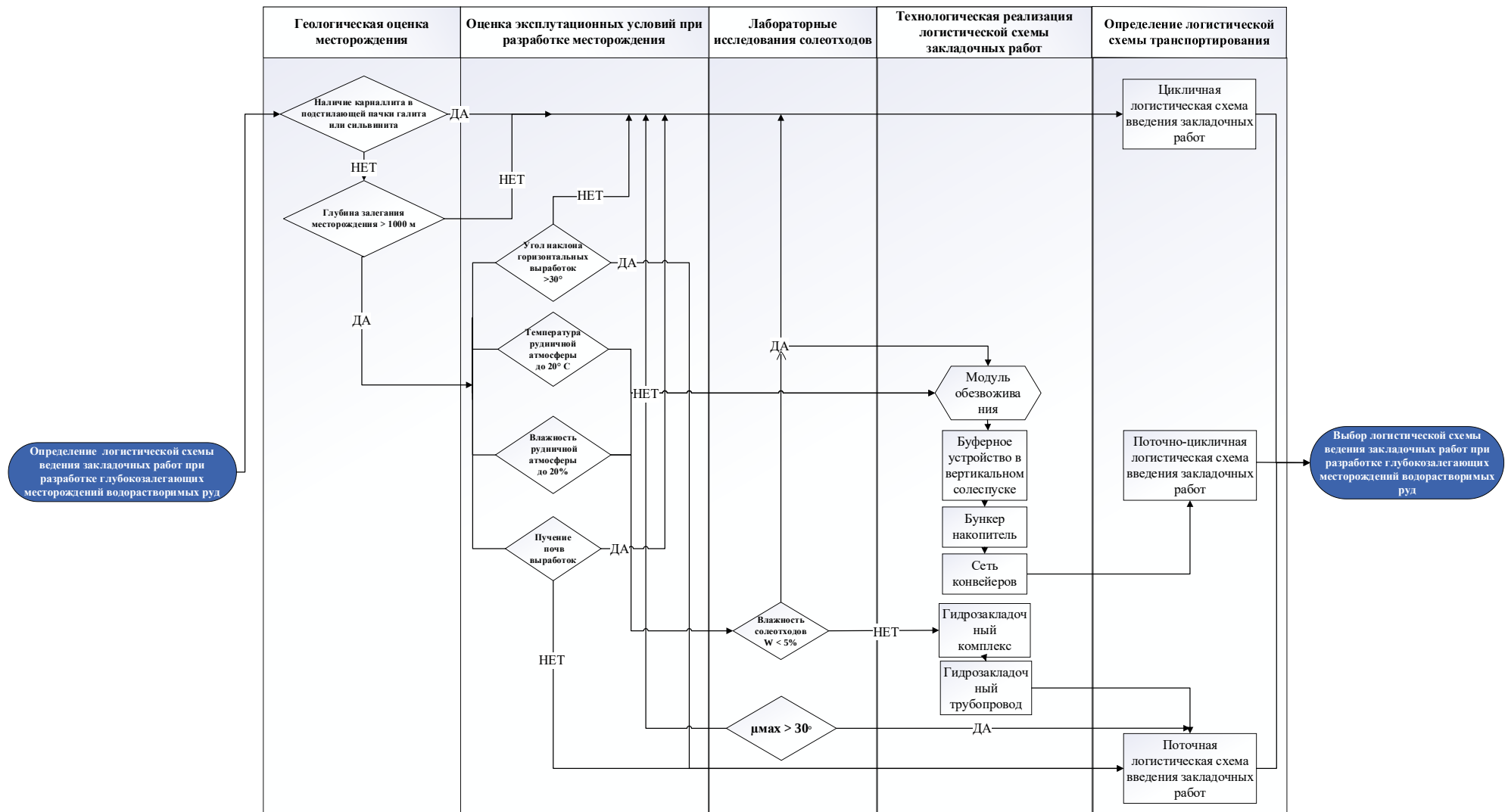


Рисунок 3.15 - Алгоритм выбора логистической схемы закладочных работ при разработке глубокозалегающих месторождений водорастворимого сырья

На следующем этапе производится оценка эксплуатационных условий с повышенными рисками деформаций. Для таких зон рекомендуется использовать укрепляющие конструкции трубопроводов в кровле, выполненные из коррозионностойких материалов, способных выдерживать динамические нагрузки. Конвейеры в таких условиях могут использоваться только при стабильной почве, так как повреждения лент из-за пучения могут привести к значительным простоям, либо закрепляться в устойчивой кровле. Для обеспечения бесперебойности работы ЦПТ целесообразно предусмотреть буферные бункеры-накопители объемом от 300 до 500 м³, что позволит выравнивать поток материалов даже при неритмичной подаче.

Далее для выбора приоритетной логистической схемы проводятся лабораторные исследования вещественного состава, структуры и свойств закладочного материала. Результаты выполненных лабораторных исследований показали, что при влажности закладочного материала в пределах влагоотдачи – 8-9% вероятно закупоривание трубопровода, поэтому требуется применение механизированных систем по устранению налипания на стенки бункера, описанных в параграфе 3.4 настоящей главы, либо понижать соотношение Ж:Т, увеличивая влажность смеси за пределом влагоотдачи.

Окончательный выбор логистической схемы определяется результатами проектных технико-экономических расчетов по максимуму показателей эффективности, рассчитанных в соответствии с действующей методикой. Циклическая схема рекомендуется для зон с повышенными рисками трещинообразования и пучения, так как она позволяет минимизировать воздействие на массив. Поточно-циклическая схема является компромиссным решением для условий комбинированного воздействия, обеспечивая одновременно высокую производительность и устойчивость системы. Поточная схема с применением трубопроводного транспорта характеризуется минимальной трудоемкостью и наибольшей производительностью технологических процессов.

Таким образом, предложенный алгоритм выбора логистической схемы закладочных работ при разработке глубокозалегающих месторождений

водорастворимого минерального сырья интегрирует геологические, эксплуатационные и технологические факторы и обеспечивает возможность выбора приоритетного варианта логистической системы подземного рудника на основе проведения специальных исследований в соответствии с разработанной методикой.

Так же разработан алгоритм обоснования параметров вертикального подземного модуля (ВПМ) для циклично-поточной логистической схемы (рис 3.16).

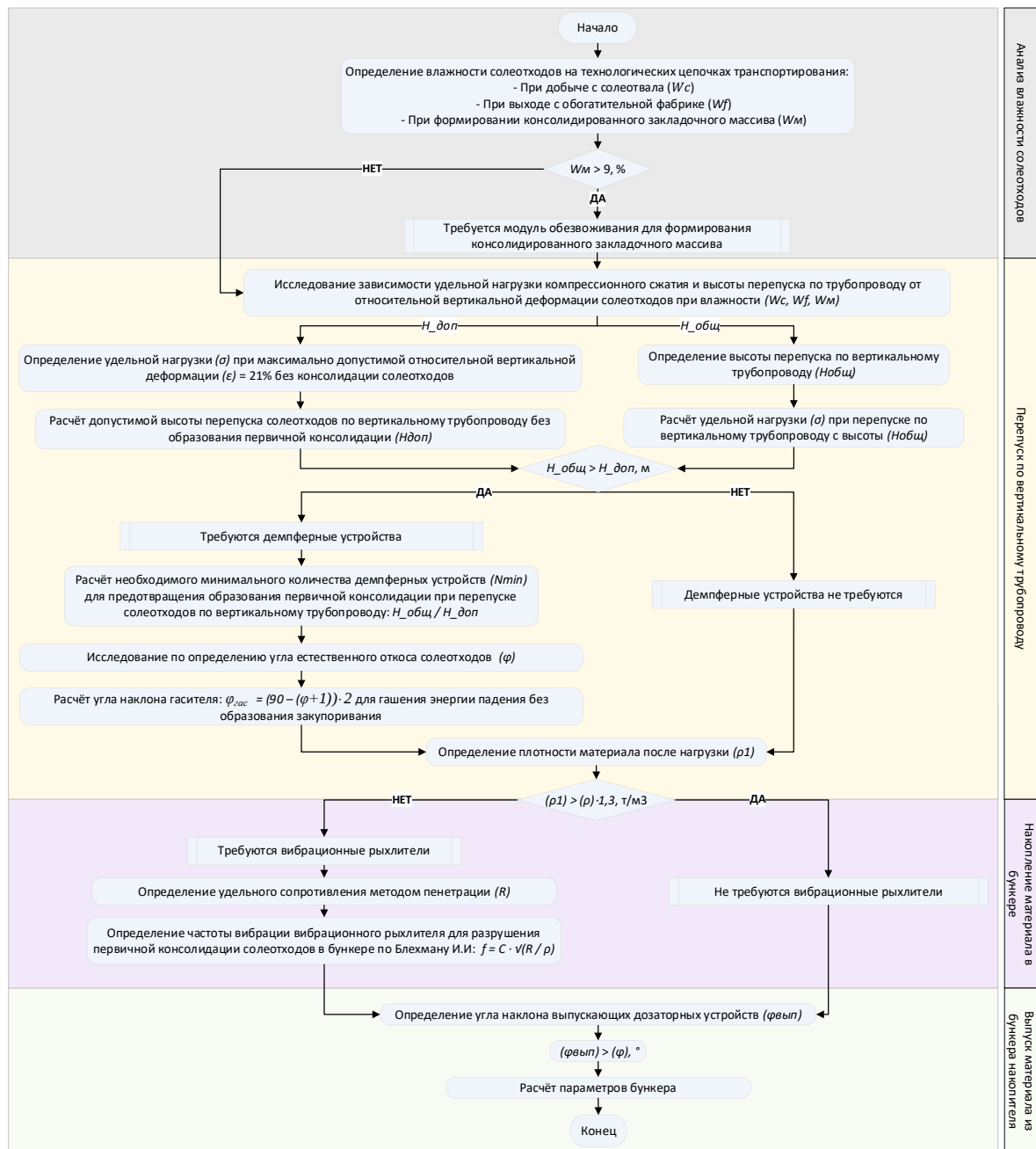


Рисунок 3.16 - Алгоритм выбора и обоснования параметров вертикального подземного модуля транспортировки слеотходов для циклично-поточной логистической схемы

Основная цель алгоритма заключается в расчетах, необходимых для предотвращения образования первичной консолидации солеотходов в процессе их транспортировки, а также в оценке требуемого количества демпферных устройств и режима работы вибрационных рыхлителей, необходимых для обеспечения безаварийного транспортирования материала в вертикальном трубопроводе.

Процесс начинается с определения влажности солеотходов на разных этапах технологического процесса. Затем, на основе полученных данных, проводится расчет высоты перепуска солеотходов. Также алгоритм включает в себя вычисления для выявления минимального количества демпферных устройств и режима работы вибрационных рыхлителей, что позволяет избежать консолидации солеотходов и поддерживать требуемые параметры транспортировки.

На завершающих этапах осуществляется определение плотности материала после нагрузки и угла наклона выпускного устройства, что является важным элементом для точного контроля за процессом транспортировки и накопления материала в бункере. Алгоритм завершается расчетом параметров бункера, что является ключевым для дальнейшего эффективного функционирования системы вертикального перепуска.

Выводы по главе 3

1. Разработаны концептуальные требования к логистической схеме закладочных работ при разработке глубокозалегающих месторождений калийных солей, отличающиеся учетом глубины залегания продуктивных пластов, устойчивости выработок, флексурных изменений, рисков пучения почвы и нарушения режима работы трубопроводного транспорта, пылевой обстановки, микроклиматических характеристик, а также производительности, энергоэффективности и экологической безопасности.

2. Результаты анализа гранулометрического состава солеотходов обогащения сильвинита показали, что 77,93% материала состоит из крупнозернистых фракций ($>0,25$ мм). Такое соотношение частиц обеспечивает низкую склонность к слеживанию и подтверждает возможность использования

конвейерного транспорта. Гидравлический транспорт может быть применен при предварительной подготовке смеси, при этом требуется для формирования консолидированного закладочного массива снижение влажности перед укладкой в выработанное пространство камеры, сбор и отток отжимных рассолов. Транспорт циклического действия может быть применен для перемещения солеотходов без дополнительной подготовки и характеризуется наибольшей универсальностью по условиям применения, но наименьшей производительностью и повышенными требованиями к системе вентиляции.

3. На основании экспериментальных данных обосновано необходимое количество и расположение буферных устройств для перепуска закладочной смеси по вертикальному трубопроводу, учитывающее зависимость вертикальных деформаций сыпучих материалов от удельной компрессионной нагрузки при различной влажности солеотходов (0,05%, 4%, 8%), что позволяет предотвратить первичную консолидацию и слеживание материала и минимизировать динамические нагрузки на конструкцию приемного бункера, а также обосновать применение систем вибрационного рыхления с частотой 25–35 Гц для разрушения первичных кристаллических связей и обеспечения стабильности транспортирования закладочной смеси в условиях разработки глубокозалегающих месторождений калийных солей.

4. Лабораторные исследования механической абразивности солеотходов методом истирания эталонного стального стержня позволили установить, что солеотходы относятся к I классу абразивности (весьма малоабразивные породы) с потерей массы металлических элементов стержня в среднем на уровне 2,46 мг за цикл исследования. Это позволяет предположить невысокий износ рабочих элементов трубопроводов, конвейерных лент и других узлов транспортного оборудования, что особенно важно для продолжительной эксплуатации в условиях подземных выработок и должно быть проверено в промышленных условиях. Данные характеристики позволяют эффективно применять механизированный, гидравлический и гидромеханизированный виды транспорта без необходимости применения усиленного износостойкого оборудования.

5. Анализ вариантов транспортных схем показал, что поточная схема является наиболее рациональной для применения в зонах с устойчивыми массивами горных пород, характеризующихся минимальным риском пучения и структурных нарушений, что обеспечивает стабильность опорных и направляющих элементов транспортной системы. Цикличная схема может быть использована в условиях повышенной геомеханической напряжённости, где существует риск разрушения массива вмещающих пород. Поточно-цикличная схема представляет собой сбалансированное решение, сочетающее надёжность и производительность, и может быть рекомендована для сложных геологических условий. Однако её внедрение сопровождается повышенными эксплуатационными затратами, высокой трудоёмкостью и сложностью технического обслуживания.

6. Исследования эксплуатационных характеристик ПДМ выявили, что при скорости 7 км/ч и грузоподъемности 30 т для обеспечения ритмичности закладки при максимальной длине транспортирования до 12 км, потребуется 27 самоходных вагонов. На поверхности рудника потребуется 3 затаривателя для МКР, что обеспечивает синхронизацию процессов транспортирования и загрузки, но характеризуется высокой трудоемкостью.

7. Разработан алгоритм выбора логистической схемы с учетом результатов лабораторных исследований, полевых опытно-промышленных испытаний и теоретических расчетов. Алгоритм учитывает взаимосвязь таких факторов, как физико-механические свойства закладочных материалов и смеси, влажность, гранулометрический состав, горно-геологические и гидрогеологические условия месторождений, а также горнотехнические требования. Реализация алгоритма позволяет выбрать рациональную схему транспортирования на базе минимизации геомеханических рисков и достижения максимальной экономической эффективности.

8. Полевые замеры пылеобразования и микроклиматических условий показали, что использование конвейеров и трубопроводов значительно снижает концентрацию пыли в рудничной атмосфере, по сравнению с работой ПДМ. Например, концентрация пыли у конвейера на расстоянии 5 м составляет 24,5

мг/м³, тогда как у ПДМ этот показатель достигает 861,5 мг/м³. Это определяет необходимость использования более сложных и затратных систем пылеподавления и вентиляции для обеспечения безопасных условий труда при применении самоходной техники.

9. Разработка и расчет параметров бункеров-накопителей при циклично-поточной схеме транспортирования показали, что их вместимость 156,8 т солеотходов достаточна для обеспечения ритмичности потоков материала при кратковременных сбоях в работе системы. При этом бункеры выполняют функцию аварийных накопителей, минимизируя риски нарушения режима производственных процессов.

10. Теоретическое обоснование конструкций буферных устройств и демпферных механизмов выявило их высокую эффективность в снижении динамической нагрузки на элементы вертикального модуля циклично-поточной схемы транспортирования. Демпферные устройства и конические гасители энергии позволяют минимизировать повреждения конструктивных элементов при высокоскоростной подаче закладочной смеси, перспективность применения демпфирующих устройств должна быть оценена экспериментально в опытно-промышленных условиях.

11. Разработанные логистические схемы ведения закладочных работ, а также алгоритм выбора приоритетного варианта, сформированный на основе расчетных параметров, были адаптированы к проектным условиям освоения Гремячинского месторождения калийных солей и использованы в технико-экономическом сравнительном анализе. Итоговые результаты оценки эффективности реализуемых логистических решений изложены в последующей структурной части диссертации.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГРЕМЯЧИНСКОГО РУДНИКА С ЗАКЛАДКОЙ И ОЦЕНКА ЕЕ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

4.1. Обоснование выбора горнотранспортного оборудования и рекомендации по режимам его эксплуатации

На начало 2025 года, в условиях текущей геополитической ситуации и сложившихся ограничений на обслуживание и поставку запчастей для зарубежной горнотранспортной техники, в частности, таких производителей, как Caterpillar, Epiroc (Atlas Copco), Sandvik, Hitachi, возникла объективная необходимость перехода к использованию отечественного оборудования, а также техники из стран, входящих в партнерские экономические союзы с Россией, что способствует технологическому суверенитету, снижению уровня импортозависимости и обеспечению бесперебойного функционирования технологических закладочных комплексов на действующих и перспективных рудниках [110].

В связи с этим в рамках настоящей диссертации был проведен анализ и выбор рекомендуемых единиц технологического транспорта и оборудования для логистических схем введения закладочных работ при разработке Гремячинского месторождения калийных солей. Основой выбора явились технические характеристики и режимы работы, полученные в результате исследований, приведенных в параграфах 3.3-3.5, и паспортная производительность горных машин и механизмов. Сводный перечень оборудования, используемого в цикличной схеме транспортирования закладочных материалов, приведен в таблице 4.1.

Так, в качестве рекомендуемого оборудования для транспортирования закладочного материала для цикличной схемы на поверхностном модуле был рассмотрен комплекс механизированных средств, обеспечивающий непрерывность потока и согласование производительностей по всем звеньям, при этом учитывается высокая плотность солеотходов ($1133\text{--}1178\text{ кг/м}^3$) и их склонность к самоуплотнению при хранении.

Таблица 4.1 - Рекомендуемый перечень оборудования для цикличной схемы транспортирования закладочных материалов Гремячинского ГОКа

Оборудование	Тип/Модель	Кол-во	Производительность	Технические характеристики	Примечание
<i>Поверхностный модуль</i>					
Бульдозер	Б10М (ЧЕТРА Т20 или аналог)	2	до 2000 м ² /ч	Мощность двигателя: 200–300 л.с., глубина рыхления: до 500 мм; 21,6 л/маш.-час	Рыхление уплотненного массива солеотвалов.
Дробильно-сортировочная установка (МДСУ)	УМДС-250-0	2	500 т/ч	Фракция измельчения: 3–10 мм	Для измельчения солеотходов до требуемой фракции.
Фронтальный погрузчик	ЧЕТРА ПК-6	2	до 500 т/ч	Грузоподъемность: 6 т, объем ковша: 3,5 м ³	Для погрузки материала в приемный бункер МДСУ.
Ленточные конвейеры	КЛ-1000 («Рудгормаш»)	2	500–600 т/ч	Ширина ленты: 1000 мм, мощность двигателя: 75–150 кВт	Транспортировка материала от МДСУ к ленточному конвейеру.
Ленточный конвейер	КЛС 140	1	600 т/ч	Длина: 1360 м, угол наклона: 0-7 °	Транспортировка от солеотвала к стволу № 1 к корпусу затаривания солеотходов
<i>Корпус затаривания солеотходов</i>					
Станция затаривания МКР	СЗ-500-10/1-Л-4	3	до 120 МКР/ч	Вес контейнера: 500–2000 кг,	Для фасовки солеотходов в мягкие контейнеры.
Делитель потока	ДП-600 («Рудгормаш»)	1	до 600 т/ч	Регулируемое распределение потока материала	Для равномерной подачи материала на скребковые конвейеры.
Скребок-конвейер	СК-800 («Рудгормаш»)	3	до 169 т/ч	Ширина ленты: 800–1000 мм, мощность двигателя: 30–50 кВт	Для транспортировки материала к станциям затаривания.
<i>Вертикальный подземный модуль</i>					
Скиповой подъем	Скиповая установка № 1	1	до 600 т/ч	Скорость подъема: 16,5 м/с, масса груза: 59 т, емкость: 44 м ³ , высота подъема: 1129 м	Для транспортировки закладочного материала в до подземного горизонта
<i>Горизонтальный подземный модуль</i>					
Приемный бункер	БП-60 («УралСпецМаш»)	1	до 180 т	Вместимость: 180 м ³	Для разгрузки скипа и перегрузки МКР на самоходные вагоны.
Перегружатель для МКР	НМ СР-1000	1	до 360 МКР/ч	Вес контейнера: 500–2000 кг	Для загрузки МКР на самоходные вагоны.
Самоходные пневмоколесные вагоны	10ВС-30М	27	до 23 м ³ /рейс	Вместимость кузова: 23 м ³ , скорость движения: 7 км/ч	Для доставки МКР с закладочным материалом до панелей.

Разработка откоса солеотвала выполняется бульдозером рыхлителем ЧЕТРА Т20 с глубиной проникновения рыхлителя до 500 мм, формируются призмы запаса, далее фронтальный погрузчик ЧЕТРА ПК-6 обеспечивает подачу до 500 тонн в час на прием узла конвейера и на модуль обезвоживания [133]. С учетом

гранулометрии, где 77,93% частиц крупнее 0,25 мм и наиболее распространен диапазон 0,5–1 мм (см. параграф 3.2), для стабилизации загрузки перегружателей и лент включается мобильная дробильно-сортировочная установка УМДС-250-0 с доведением фракции до 1–5 мм. Дальнейшая транспортировка к надшахтному комплексу выполняется конвейерами КЛ-1000 и КЛС-140 с фактической производительностью 500–600 тонн в час.

Узел затаривания формирует поток мягких контейнеров (МКР) под вертикальный транспорт. Базовая станция СЗ-500 обеспечивает производительность 120 МКР в час при объеме одного контейнера 0,9 м³. Расчетная потребность составляет 337 МКР в час, поэтому принимается параллельная работа трех станций с суммарной производительностью 360 МКР в час, распределение материала между линиями выполняет делитель потока ДП-600, что предотвращает локальные перегрузы приемных бункеров и выравнивает такт загрузки.

Вертикальный транспортный модуль, в соответствии с проектными решениями Гремячинского рудника, представлен скиповой подъемной установкой № 1. Проектные параметры соответствуют транспортированию закладочного материала на глубину 1135 метров при скорости подъема 16,5 м/с. При продолжительности цикла 134,69 секунды количество подъемов составляет 26,73 в час, что эквивалентно 1470 т/час и с запасом покрывает потребность закладочного комплекса на уровне 505 т/час. При увеличении времени цикла до 164,69 секунды годовая производительность снижается приблизительно на 18%, данное отклонение компенсируется корректировкой режимов загрузки, оптимизацией такта затаривания и выравниванием графика подачи МКР на скип.

Горизонтальный подземный модуль ориентирован на быструю приемку и развоз материала по фронту закладочных работ. Разгрузка выполняется в приемный бункер БП-60 с вместимостью 60 м³, что обеспечивает синхронизацию со скиповым графиком и сглаживает пульсации потока. Перегрузка МКР на самоходные пневмоколесные вагоны 10ВС-30М осуществляется перегружателем УСМ-120 с номинальной производительностью 120 МКР в час [142]. С учетом расчетных дальностей до 11,5 км по западному направлению и до 9,8 км по-

восточному, а также при скорости движения подвижного состава 7 км/ч, требуемое количество одновременно работающих вагонов составляет 27 единиц. Принятая номенклатура оборудования и приведенные режимы работы обеспечивают непрерывность логистической цепочки от солеотвала и потока отходов фабрики до узлов смешения и подачи в камеры, при этом сохраняется требуемая пропускная способность отдельных звеньев и общий баланс производительности по всей схеме.

При циклично-поточной схеме добыча и подготовка солеотходов на солеотвале организуются так же, как в циклическом варианте, однако по всей логистической цепочке материал перемещается непрерывным потоком, поэтому к гранулометрии и влажности предъявляются более жёсткие требования. Стабильность физико-механических свойств становится критически важной, поскольку отклонения по крупности или влажности провоцируют закупорку трубопроводов, пульсации на конвейерах и сбои при гидротранспортировании в камерах закладки. Результаты раздела 3.2 показывают, что оптимальная крупность ограничивается фракцией 3–10 мм, поскольку превышение верхней границы ведёт к неравномерному ходу по лентам конвейера и росту риска засорений в трубопроводах. Влажность регламентируется в пределах 5-6%. Значения выше 6% повышают слёживаемость и ухудшают сыпучесть, тогда как значения ниже 5% усиливают пылеобразование и снижают консолидацию массива в выработанном пространстве.

Для доведения фракционного состава до требуемого диапазона целесообразно применять дробильно-сортировочную установку УМДС-250, что обеспечивает устойчивую загрузку перегружателей и магистральных лент. Регулирование влажности выполняется двумя каналами. Первый канал предназначен для потока с солеотвала и включает газовые барабанные сушилки БН 3.5 27. По опыту ВКМКС такие барабаны обеспечивают достижение влажности 5-6% при удельном расходе газа около 7,8 м³/т, что делает схему эффективной для непрерывной подачи. Второй канал обслуживает шламовый поток с фабрики и реализуется вакуум-фильтрами ДОО. Для обеспечения пропускной способности

закладочного комплекса 600 т/ч принимается пять параллельных сушильных линий с распределением питания по делителю потока.

Вертикальный модуль ориентирован на безударный перепуск потока в горизонтальный подземный модуль. Для подачи обезвоженного материала используется закладочный трубопровод диаметром 273 мм с расчётной пропускной способностью, согласованной с поверхностным модулем (145,46 м/с). С учётом высокой кинетической энергии частиц предусмотрена система конических демпфирующих устройств с углом раскрытия 100° через каждые 387 м, что снижает скорость, гасит ударные нагрузки и защищает элементы приёмного бункера. Подачу рассолов для консолидации массива обеспечивает рассолопровод диаметром 200 мм, рассчитанный на давление 10 бар и расход до 500 м³/ч, что покрывает потребности смесительных узлов на горизонте.

Горизонтальный подземный модуль формирует устойчивый непрерывный поток от приёмки к участковым линиям. Аккумуляция материала выполняется в бункере накопителе БП 60 с геометрической вместимостью 139,36 м³, что позволяет аккумулировать до 156,8 т при принятой насыпной плотности и обеспечивает сглаживание такта вертикальной подачи. Дальнейшая транспортировка ведётся по магистральному конвейеру КЛ 1000 с расчётной производительностью 605,5 т/ч и последующей раздачей на участковые ленты. Угол трасс на подъёмах ограничивается 24-25°, что согласуется с углом естественного откоса материала в движении (27°) и предотвращает самопроизвольное скольжение по ленте.

Распределение закладочной смеси в камерах выполняется передвижным пневмокамерным закладочным комплексом ППЗК 150 с дозированной подачей до 150 т/ч. Для предотвращения расслаивания компонентов при выпуске из гибких рукавов предусматривается орошение водой. В качестве насосного агрегата применим самовсасывающий насос НС2 250/375.375-15/8-400, рабочим давлением 3-5 бар и расходом рассола до 10 м³/ч на линию. Воздушная система должна обеспечивать подачу сжатого воздуха до 500 м³/ч при давлении 4-5 бар. Это

стабилизирует вещественный состав, исключает зависания в бункерах и поддерживает непрерывность потока на всём плече от приёмки до камеры.

Сводный перечень оборудования, рекомендуемого к использованию при реализации циклично-поточной схемы транспортирования закладочной смеси, приведен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Рекомендательный перечень оборудования для циклично-поточной схемы транспортирования закладочных материалов Гремячинского ГОКа

Оборудование	Тип/Модель	Кол-во	Производительность	Основные параметры	Примечание
Поверхностный модуль					
1	2	3	4	5	6
Бульдозер	Б10М (ЧЕТРА Т20 или аналог)	2	до 2000 м ² /ч	Мощность двигателя: 200–300 л.с., глубина рыхления: до 500 мм; 21,6 л/маш.-час	Рыхление уплотненного массива солеотвалов.
Дробильно-сортировочная установка	УМДС-250-0	2	до 500 т/ч	Фракция измельчения: 3–10 мм	Измельчение солеотходов до требуемой фракции.
Фронтальный погрузчик	ЧЕТРА ПК-6	2	до 500 т/ч	Грузоподъемность: 6 т, объем ковша: 3,5 м ³	Погрузка материала в приемный бункер
Ленточные конвейеры	КЛС1400	2	500–600 т/ч	Ширина ленты: 1200–1400 мм, мощность двигателя: 75–150 кВт	Транспортировка материала от МДСУ к конвейеру.
Ленточный конвейер	КЛС 1400	1	600 т/ч	Длина: 550 м, угол наклона: 0–7 °	Транспортировка от солеотвала к корпусу обезвоживания.
Барабанная сушилка	БН 3,5-27	5	600 т/ч	Расход газа: 7,8 м ³ /т, длина: 27 м, диаметр: 3,5 м 200 кВт	Для снижения влажности солеотходов до 5–6% с солеотвала.
Ленточный конвейер	КЛС 1400	1	600 т/ч	Длина: 550 м, угол наклона: 0–7 °	Транспортировка от солеотвала к стволу № 1 к корпусу подачи солеотходов
Корпус подачи солеотходов					
Инерционный грохот	ГИС-62	1	до 600 т/ч	Размер ячейки: 10–20 мм	Предварительное грохочение солеотходов.
Скребковый конвейер	ПСН3100	2	300 т/ч	Длина: 30 метров	
Донный делитель	ДП-600 Рудгормаш	1	до 600 т/ч	Регулируемое распределение потока материала	Равномерная подача материала на питатель.
Питатель	МПВ 8х34	4	до 100 т/ч	Ширина ленты: 1000 мм, мощность двигателя: 30–50 кВт	Дозированная подача материала в трубопровод.
Вертикальный модуль					
Закладочный трубопровод	Сталь Ст3, диаметр 273 мм	1	до 35244 т/ч (полное заполнение)	Длина: 1110,3 м, угол наклона: 90°	Транспортировка солеотходов в подземный рудник.
Буферные устройства	Конический демпфер	4	-	Угол конуса: 100°, (при влажности ≤5–6%)	Гашение энергии солеотходов при перепуске. Расположены через 300–350 м.
Рассолопровод	1	1	до 500 м ³ /ч	Диаметр: 200 мм, давление: 10 бар	Транспортировка рассолов к ПЗК.

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4	5	6
Горизонтальный модуль					
Бункер-накопитель	БП-60	1	до 156,8 т	Вместимость: 139,36 м³, угол наклона стенок: 50°	Аккумулирование солеотходов перед подачей на скребковый конвейер. Погашение скорости и локализация пыли.
Скребковый конвейер	СК-800 Рудгормаш	4	до 169 т/ч	Длина: 25 м, ширина ленты: 800–1000 мм, мощность двигателя: 30–50 кВт	Транспортировка материала к магистральному конвейеру.
Магистральный конвейер	КЛ-1000	2	До 1442,5 т/ч мощность электродвигателя: 2х132 кВт на 1000 м	Ширина ленты: 1000 мм, мощность двигателя: 75–150 кВт, длина: 10000 м	Транспортировка солеотходов к участковым конвейерам до западного и восточного направления.
Камерный модуль					
ППЗК	ППЗК-150	3	до 150 т/ч	Вместимость: 15 м³, мощность двигателя: 50–75 кВт	Распределение закладочной смеси в камерах.
Блоковый конвейер	КЛ-600	6	до 600 т/ч	Ширина ленты: 600 мм, мощность двигателя: 30–50 кВт	Подача солеотходов в ППЗК
Система орошения	РЗ-1	1	До 10 м³/ч	Давление: 3–5 бар, расход воды: 10 м³/ч	Орошение солеотходов при формировании закладочного массива.
Дополнительное оборудование					
Система сжатого воздуха	Компрессорная станция	1	до 1000 м³/ч	Давление: 8–10 бар, мощность двигателя: 100–150 кВт	Продувка бункеров и предотвращения закупоривания.
Уровнемеры	Датчики	2	-	Точность измерения: ±1 см	Контроль уровня солеотходов в бункере

Предложенные технические решения согласуют производительности поверхностного, вертикального и подземного модулей, удерживают гранулометрические и влажностные параметры в узких допусках и тем самым обеспечивают устойчивую работу непрерывной логистической цепочки в условиях глубоких горизонтов.

Для поточной логистической схемы добыча и подача солеотходов организуются по тому же принципу, что и в цикличной и циклично-поточной конфигурациях. Источниками поступления служат солеотвал и поток отходов с обогатительной фабрики, которые сводятся в общий транспортный поток без предварительного обезвоживания материала. Однако, в корпусе пульпоприготовления необходимо предусмотреть емкости временного аккумулирования материала объёмом 20 м³, например, бункеры Б-20, откуда

должна быть обеспечена равномерная подача материала в закладочный трубопровод встряхивателями ВМ-3,0 и ленточным питателем ПЛ-1000, синхронизированными по производительности. Диаметр закладочного трубопровода целесообразно принять 273 мм, где скорость потока составит 2,92–3,61 м/с.

На подземном горизонте в центральной насосной станции предусмотрено размещение четырех центробежных насосов производительностью 200 м³/ч каждый, и функционирующих в соответствии с требованиями ФНП N 505 «Правила безопасности при ведении горных работ...» [90]. Указанные требования регламентируют откачку суточного притока за 20 часов, что обуславливает расчёт производительности агрегатов на основе среднесуточного притока, разделённого на 20 часов. Учитывая необходимость резервирования (три рабочих насоса, один резервный и один на обслуживании), требуемое количество насосов в ЦНС достигает четырёх единиц, что гарантирует бесперебойность процесса транспортирования даже в случае аварийных ситуаций.

В камерном модуле необходимо предусмотреть систему контроля жидкости на основе рассолосборников вместимостью 4 м³ и центробежных насосов мощностью 50–75 кВт, которые предотвращают затопление закладочных камер и обеспечивают отвод избыточного рассола. Дополнительно рекомендуется применение системы сжатого воздуха (1000 м³/ч, 8–10 бар) и ультразвуковых уровнемеров (± 1 см) для стабилизации режима. Сводный перечень оборудования, используемого в поточной схеме транспортирования закладочных материалов, приведен в таблице 4.3.

Таким образом, приведенные данные о количестве, производительности и спецификации эксплуатируемого оборудования формируют исходную базу для сравнительного анализа технико-экономических показателей предложенных логистических схем транспортирования закладочных материалов для Гремячинского ГОКа.

Таблица 4.3 - Рекомендательный перечень оборудования для поточной схемы транспортирования закладочных материалов Гремячинского ГОКа

Оборудование	Тип/Модель	Кол-во	Производительность	Основные параметры	Примечание
1	2	3	4	5	6
<i>Поверхностный модуль</i>					
Бульдозер	Б10М (ЧЕТРА Т20 или аналог)	2	до 2000 м ² /ч	Мощность двигателя: 200–300 л.с., глубина рыхления: до 500 мм; 21,6 л/маш.-час	Рыхление уплотненного массива солей.
Дробильно-сортировочная установка	УМДС-250-0	2	до 500 т/ч	Фракция измельчения: 3–10 мм	Измельчение солей до требуемой фракции.
Фронтальный погрузчик	ЧЕТРА ПК-6	2	до 500 т/ч	Грузоподъемность: 6 т, объем ковша: 3,5 м ³	Погрузка материала на конвейеры.
Ленточные конвейеры	КЛС-1400 (Рудгормаш)	2	500–600 т/ч	Ширина ленты: 1200–1400 мм, мощность двигателя: 75–150 кВт	Перемещение галитовых отходов к месту подготовки пульпы.
Ленточный конвейер	КЛС 1400	1	600 т/ч	Длина: 550 м, угол наклона: 0–7 °	Транспортировка от солей к корпусу обезвоживания.
<i>Корпус пульпоприготовления</i>					
Бункер для хранения	Б-20	2	-	Объем: 20 м ³ , габариты: 5600х3300х2150 мм	Временное хранение закладочной смеси
Встряхиватель	ВМ-3,0	8	-	Мощность двигателей: до 3,0 кВт	Обеспечение равномерной подачи материала
Питатель ленточный	ПЛ-1000	2	600 т/ч	Ширина ленты: 1000 мм, длина: 5850 мм	Дозированная подача материала
Делитель потока	ДП-600	1	-	Мощность двигателя: до 3,0 кВт	Регулирование потока материала
<i>Вертикальный модуль</i>					
Закладочный трубопровод	Трубы пульпопровода (273х10)	1	500 т/ч	Длина: 1100,3 м,	Гидротранспортирование закладочного материала по стволу
Бак рассолосборника	Резервуар РС-50	1		Объем: 50 м ³	Бак для накопления рассола для аварийной промывки
<i>Подземный горизонтальный модуль</i>					
Закладочный трубопровод	Трубы пульпопровода (273х10)	2	500 т/ч	Длина 10000 м	Гидротранспортирование закладочного материала от ствола до камер
Центральная насосная станция	Центробежные насосы	4	200 м ³ /ч	Мощность: 250 кВт	Откачка избыточного рассола
<i>Камерный модуль</i>					
Камерный рассолосборник	Бак для удаления жидкости	4		Вместимость: 4 м ³ ,	Бак для сбора излишнего рассола от гидрозакладочной пульпы
Насос	АН 12/10АМ	3	2	Мощность двигателя: 50–75 кВт	Насос для откачки избыточного рассола
<i>Дополнительное оборудование</i>					
Система сжатого воздуха	Компрессорная станция	1	до 1000 м ³ /ч	Давление: 8–10 бар, мощность двигателя: 100–150 кВт	Продувка бункеров и предотвращения закупоривания.
Уровнемеры	Ультразвуковые датчики	2	-	Точность измерения: ±1 см	Контроль уровня солей в бункере

4.2. Расчёт и сравнительный анализ технико-экономических показателей вариантов логистической системы

Так как в одних и тех же горно-геологических условиях Гремячинского ГОКа возможно применение различных технологических схем введения закладочных работ, возникает необходимость в их экономической оценке для обоснованного выбора способа транспортирования закладочных материалов и смеси до выработанного пространства. Методка экономического сравнения базируется на анализе прямых затратных компонентов, таких как капитальных инвестиций в техническое оснащение и вспомогательную инфраструктуру, а также текущих операционных расходов на содержание и функционирование производственного комплекса. При этом исследование намеренно ограничивается рассмотрением только затратных показателей, исключая из анализа: стоимостные параметры сырьевых компонентов закладочной смеси, коэффициенты полноты заполнения выработанного пространства, потенциальные экономические эффекты от вовлечения целиковых зон в промышленную отработку. Такое ограничение продиктовано необходимостью выделить влияние именно логистической составляющей на общую экономическую эффективность горнотехнической системы. Все денежные показатели выражены в российских рублях по ценовым уровням первого квартала 2025 г. Для пересчета валютных компонентов стоимости применялся прогнозный обменный курс доллара США: 97,86 руб./USD.

Для обоснованного выбора логистической схемы применяется метод приведенных затрат, который интегрирует капитальные инвестиции и текущие операционные расходы в единую сопоставимую величину. Это обеспечивает объективное сравнение альтернативных вариантов независимо от их капиталоемкости и структуры затратных компонентов. Приведенные затраты определяются по формуле.:

$$ПЗ = Э + К \cdot E_n \quad (4.1)$$

где: Э – годовые эксплуатационные затраты; К – капитальные затраты; E_n – нормативный коэффициент сравнительной эффективности капитальных вложений

(обычно принимается в диапазоне 0,1–0,15, для новой техники и технологии $E_n = 0,15$).

В структуру годовых операционных издержек включены затраты на содержание и функционирование технологического оборудования, и плановые ремонты горных машин, расходы на электроэнергию, топливное обеспечение и оплату труда персонала. При калькуляции использованы следующие базовые параметры: стоимость конвейерного полотна — 600 USD/п.м., электроэнергия — 6 руб./кВт·ч [53], дизельное топливо — 71 руб./л, численность рабочих определена нормативом обслуживания оборудования, среднемесячная оплата труда — 120 тыс. руб./человека. Комплексная оценка стоимости внедрения каждого из анализируемых вариантов логистических схем представлена в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Капитальные и эксплуатационные затраты для различных логистических схем транспортирования закладочного материала Гремячинского ГОКа

Затраты	Варианты логистической схемы		
	Поточная, тыс. руб	Циклично-поточная, тыс. руб	Цикличная, тыс. руб
Капитальные затраты	565 403	2 152 385	2 159 350
Эксплуатационные затраты (годовые)	211 444	243 272	633 132
Приведенные затраты	296 255	566 130	957 034

Таким образом приведенные затраты для поточной схемы составляют: 296 255 тыс. руб, циклично-поточной – 566 130 тыс. руб, цикличной - 957 034 тыс.руб. Гистограмма распределения затрат по вариантам логистических схем закладочных работ Гремячинского ГОКа представлена на рисунке 4.1.

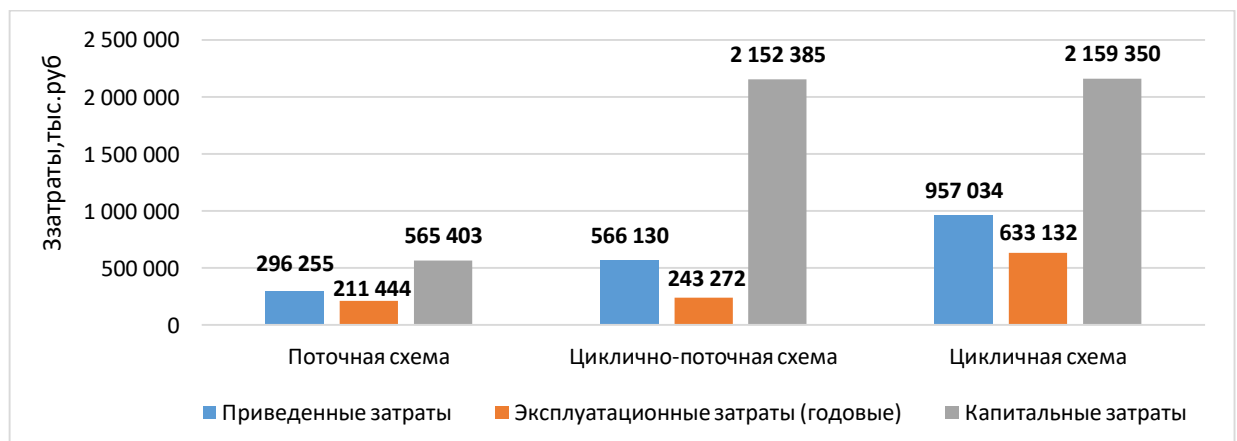


Рисунок 4.1 - Гистограмма распределения затрат для сравниваемых вариантов транспортировки закладочного материала на Гремячинском ГОКе.

Детализированный расчет годовых эксплуатационных и капитальных затрат представлен в приложениях А-Е.

Ввиду того, что выбор предпочтительного варианта логистической схемы является многокритериальной задачей, целесообразно дополнительно учитывать ряд критериев, позволяющих всесторонне оценить, как экономическую эффективность варианта, так и его эксплуатационные характеристики. В рамках настоящего исследования, помимо суммарных приведённых затрат, в качестве критериев оптимальности рассмотрены:

- доля капитальных затрат на реализацию выбранного варианта в общей стоимости логистической системы для 1-ого года эксплуатации C_k , %, рассчитывается по формуле:

$$C_k = \frac{K}{K+Э} \cdot 100 \% \quad (4.2)$$

- удельная энергоемкость транспортирования закладочной смеси:

$$E_e = \frac{E}{V} \quad (4.3)$$

где: V – объём транспортированных закладочных материалов, m^3 ; E – необходимая выделенная мощность, кВт;

По данным критериям приоритетными являются минимумы значений, таких как затраты на транспортировку $1 m^3$, доля капитальных затрат в общей стоимости логистической схемы и показатель энергетической эффективности. Значение критериев оптимальности для каждого варианта логистической схемы транспортирования закладочного материала Гремячинского ГОКа сведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Критерии оптимальности для различных логистических схем закладки на Гремячинском ГОКе

Критерий оптимальности	Поточная	Циклично-поточная	Цикличная
Доля капитальных затрат в общей стоимости логистической схемы C_k , %	72,8	89,8	77, 3
Энергоемкость E_e , кВт·ч/ m^3	5,5	6,6	10,1
Затраты на транспортировку $1 m^3$, руб/ m^3	23,3	32,4	52,8

Циклично-поточная и цикличная схемы характеризуются более высокой капиталоемкостью и демонстрируют низкий уровень экономической эффективности ввиду значительных первоначальных инвестиций и относительно

высоких эксплуатационных затрат, что делает их внедрение менее перспективным в горно-геологических условиях и при экономических ограничениях освоения Гремячинского месторождения калийно-магниевых солей.

Предпочтительным вариантом по результатам технико-экономического сравнения является поточная логистическая схема, так как она характеризуется приведёнными затратами на ее реализацию в 1,91 и 3,23 раза ниже чем для циклично-поточной и цикличной логистических схем, соответственно, а также имеет самый низкий уровень энергоемкости транспортирования 5,5 кВт·ч на 1 м³ транспортируемого закладочного материала, обеспечивая приоритет по всем показателям экономической, технологической и организационной эффективности.

4.3. Рекомендательная календарно-сетевая модель реализации поточной логистической схемы транспортирования закладочного материала и обоснование её технологических параметров

Для реализации в проекте рекомендована к внедрению поточная логистическая схема транспортирования закладочного материала. Для этого разработаны календарно-сетевая модель с рекомендациями по последовательности и срокам выполнения работ (рис. 4.2), а также укрупненный план их реализации, учитывающий распределение трудозатрат при последовательном выполнении технологических операций обозначением ключевых вех и предусматривающей контроль технологических параметров, определенных проектными расчетами. Календарно-сетевой график сформирован в ПО Oracle Primavera в соответствии с международными рекомендациями по уровню иерархии графиков и методологией Numeric Schedule Levels [8, 15, 57].

Для ресурсного планирования и более точной оценки трудозатрат внедрение поточной логистической схемы транспортирования закладочных материалов, декомпозиция представлена до 3-ого уровня. Для комплексного планирования и управления проектом реализация поточной логистической схемы транспортирования закладочных материалов на Гремячинском ГОКе включает в себя ряд ключевых этапов: проектно-изыскательские работы; закупка оборудования и материалов; строительно-монтажные работы; электромонтажные; пусконаладочные работы (ПНР); опытной и промышленной эксплуатации.

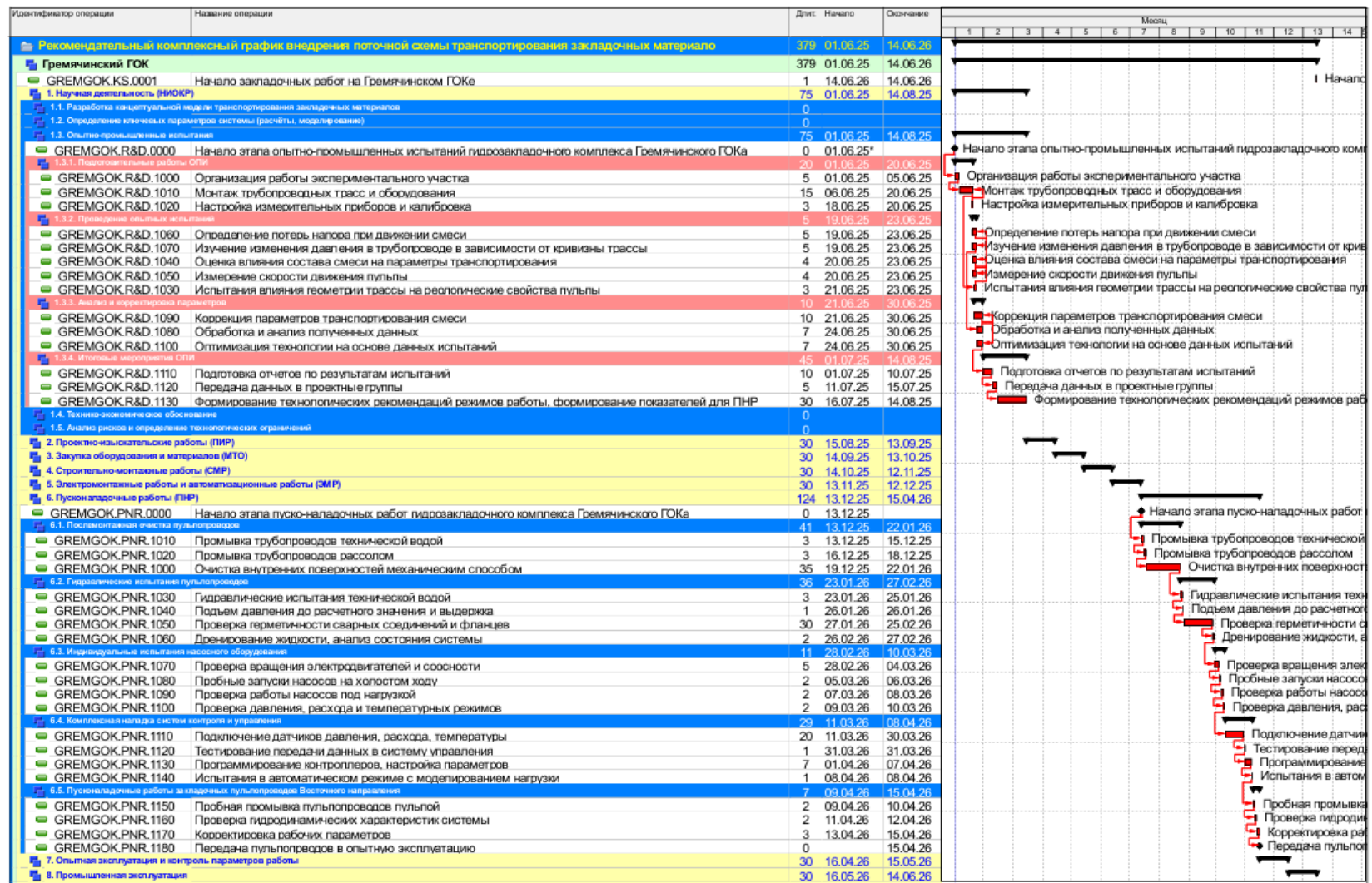


Рисунок 4.2 - Рекомендательный комплексный календарно-сетевой график внедрения поточной логистической схемы транспортирования закладочных материалов для Гремячинского ГОКа (перечень операций, диаграмма Ганта)

В процессе опытно-промышленных испытаний (ОПИ) необходимо определить значения скорости движения закладочной смеси, которые не должны быть ниже критической скорости осаждения твердых частиц, что обусловлено необходимостью предотвращения образования донных отложений и закупорки трубопроводов. Согласно расчетным данным, для закладочной смеси с соотношением Ж:Т 2:1, при плотности обратного рассола 1230 кг/м^3 и плотности твердой фазы 2100 кг/м^3 , критическая скорость составляет $3,28 \text{ м/с}$, а рабочая скорость должна быть не менее $3,61 \text{ м/с}$.

Контроль этого параметра в ходе испытаний требует использования ультразвуковых расходомеров и датчиков давления, установленных в точках изменения направления трассы, поскольку именно в этих местах возникает максимальная вероятность осаждения твердых частиц.

Дополнительно необходимо зафиксировать потери напора на различных участках трассы, которые являются функцией длины трубопровода, его диаметра, шероховатости внутренней поверхности и геометрии трассировки. В ходе испытаний требуется определить реальный коэффициент сопротивления движения смеси, который не должен превышать $1,2\text{--}1,4$, в зависимости от характера поворотов трассы. Реологические свойства смеси должны быть исследованы с точки зрения динамики изменения ее консистенции после транспортирования, поскольку длительное перемещение пульпы может приводить к частичной коагуляции и структурообразованию, что особенно критично при использовании смеси с минимальным содержанием жидкости (Ж:Т = $1,3:1$). В ходе опытно-промышленных испытаний должны быть зафиксированы величины динамической и структурной вязкости, определяемые на входе и выходе системы транспортирования с использованием ротационных вискозиметров, поскольку их изменение более чем на 15% указывает на нарушение технологических свойств смеси и требует корректировки параметров подачи.

На этапе пусконаладочных работ происходит настройка и тестирование технологического оборудования, включающего в себя насосные станции, запорную арматуру, трубопроводы и системы контроля параметров смеси. В ходе испытаний должны быть зафиксированы параметры работы насосных агрегатов, включая

расход смеси ($\text{м}^3/\text{ч}$), создаваемое давление напора (Па) и потребляемую на электроснабжение системы мощность (кВт). Причем данные значения не должны отличаться от расчетных параметров более, чем на 5%.

Дополнительно в ходе ПНР должны быть проведены испытания запорной арматуры, включая тестирование работоспособности запорных клапанов при максимальном и минимальном расходе смеси, проверку герметичности уплотнений и анализ времени срабатывания арматуры в аварийных режимах.

Из анализа диаграммы Ганта (рис. 4.2) следует, что этап опытно-промышленных испытаний (ОПИ) занимает 75 дней, а этап ПНР – 124 дня, что обусловлено принципиальным различием в характере выполняемых работ. Пусконаладочные работы проводятся на действительной модели в реальных условиях рудника, с масштабами, превышающими модель ОПИ, и уже с установленными параметрами системы, что означает, что основной целью данного этапа является не выявление, а подтверждение соответствия технологических характеристик проектным значениям и выход логистической системы на проектный режим работы. В то же время, опытно-промышленные испытания включают в себя определение, анализ и корректировку технологических параметров, что требует проведения серии тестов, направленных на изучение влияния скорости движения смеси, потерь напора, гидродинамических характеристик транспортируемой пульпы, параметров осаждения твердых частиц и стабильности консистенции смеси в ходе транспортирования. Именно этап ОПИ формирует основу для последующего ПНР, обеспечивая уточнение расчетных данных и адаптацию параметров работы оборудования под реальные эксплуатационные условия, тогда как на этапе пусконаладочных работ основной задачей является не настройка системы, а подтверждение ее готовности к промышленной эксплуатации путем достижения стабильных параметров подачи смеси и функционирования оборудования без отклонений от заданных режимов, выявленных на этапе ОПИ.

Выводы по главе 4

1. Обоснованы параметры, состав и технические характеристики технологического оборудования, рекомендованного для реализации цикличной, циклично-поточной и поточной логистических схем транспортирования закладочного материала на Гремячинском ГОКе, включая выбор основного технологического оборудования.

2. В качестве основного оборудования поверхностного модуля для трех предложенных логистических схем рекомендовано использование бульдозера Б10М (ЧЕТРА Т20 или аналога), дробильно-сортировочной установки УМДС-250, фронтального погрузчика ЧЕТРА ПК-6, ленточных конвейеров КЛС1400, для циклично-поточной схемы необходимо дополнительно предусмотреть барабанную сушилку БН 3,5-27 для снижения влажности солеотходов до 5–6%.

3. Для цикличной логистической схемы транспортирование материала до закладываемых камер и укладка закладочной смеси осуществляется перегружателями для МКР СЗ-500 и самоходными пневмоколесными вагонами 10ВС-30М. Для поточной – трубами пульпопровода (273х10) с использованием типовых центробежных насосов. Для циклично-поточной схемы - магистральным конвейером КЛ-1000 и передвижным пневмокамерным закладочным комплексом ППЗК, укладка сопровождается орошением солеотходов с формированием закладочного массива системой орошения РЗ-1.

4. Проведён детализированный сравнительный анализ капитальных и эксплуатационных затрат, необходимых для внедрения различных вариантов логистической системы. Установлено, что приведённые затраты для поточной схемы составляют 296 255 тыс. руб., что является минимальным значением среди рассматриваемых вариантов, тогда как для циклично-поточной схемы этот показатель достигает 566 130 тыс. руб., а для цикличной схемы – 957 034 тыс. руб. Поточная схема транспортирования имеет самый низкий уровень энергоемкости транспортирования на 1 м³ транспортируемого закладочного материала - 5,5 кВт·ч.

5. Определена предпочтительная логистическая схема закладочных работ - поточная технология транспортирования закладочного материала,

обеспечивающая наименьшие приведённые затраты и удельную энергоёмкость. Данный вариант характеризуется наилучшим соотношением инвестиционных и эксплуатационных издержек, что подтверждается его сравнительно низкими капитальными затратами (565 403 тыс. руб.) и приемлемым уровнем годовых эксплуатационных расходов (211 444 тыс. руб.), в то время как для циклично-поточной и циклической схем этот показатель значительно выше – 243 272 тыс. руб. и 633 132 тыс. руб., соответственно.

6. Разработан комплекс рекомендаций по внедрению поточной логистической схемы, включающий построение календарно-сетевой модели последовательности выполнения работ, определение ключевых этапов пусконаладочных мероприятий и мероприятий по минимизации технологических рисков, в частности предотвращению закупоривания трубопроводов, снижению потерь напора и стабилизации параметров движения закладочной смеси.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, являющейся законченной научно-квалификационной работой, решена актуальная научно-практическая задача - обоснованы параметры логистической системы подземного рудника при освоении глубокозалегающих месторождений калийных солей с монолитной закладкой выработанного пространства, что имеет важное значение для расширения минерально-сырьевой базы горно-химической промышленности в России.

Основные результаты проведенных исследований заключаются в следующем:

1. Разработана классификация логистических схем закладочных работ, которая базируется на способах транспортирования закладочных материалов (конвейерный, гидравлический, циклический), глубине залегания месторождения, максимально допустимом расстоянии транспортирования и типе модуля обезвоживания, что позволяет адаптировать выбор технологического оборудования и методов укладки закладочного массива под конкретные горнотехнические условия, включая устойчивость массива и риски пучения.

2. Обоснована комплексная методика математического моделирования параметров логистической системы, включающая применение метода наименьших объемов для моделирования перепуска закладочного материала по вертикальным пульпопроводам диаметром 310 мм, критической (3,28 м/с) и рабочей (3,61 м/с) скоростей движения пульпы с учетом гранулометрического состава, плотности фракций, соотношением Ж:Т 2:1, а также интеграцию методов расчета производительности вертикального трубопровода с учетом, трения материала о стенки и потерь напора, что позволяет минимизировать риски закупоривания и обосновать параметры логистической схемы транспортирования закладочного материала для условий глубокозалегающих калийных месторождений.

3. Подтверждена эффективность буферных устройств и демпферных механизмов, включая конические гасители скорости с углом наклона 100° , которые снижают динамические нагрузки на конструктивные элементы системы, а также применение вибрационного рыхления с частотой 25-35 Гц для разрушения

первичных кристаллических связей и обеспечения стабильности транспортирования закладочной смеси, что особенно важно в условиях высокоскоростного перепуска материала по вертикальным трубопроводам.

4. Определены требования к бункерам-накопителям, которые включают геометрический объем 139,36 м³, угол наклона стенок $\geq 50^\circ$ для предотвращения залипания материала, а также интеграцию систем вибрационного рыхления для ликвидации закупорок, что обеспечивает непрерывность технологического процесса и снижает риск нарушения ритмичности закладочных работ.

5. Разработан алгоритм выбора рациональной схемы транспортирования, который учитывает взаимосвязь таких факторов, как физико-механические свойства закладочных материалов (влажность 0,05 %, гранулометрический состав с преобладанием крупнозернистых фракций - 77,93 %), горно-геологические и гидрогеологические условия месторождения, а также горнотехнические требования, что позволяет минимизировать геомеханические риски и обеспечить максимальной эффективности логистической системы.

6. Проведен технико-экономический анализ логистических схем, который показал, что поточная схема транспортирования закладочного материала характеризуется минимальными приведенными затратами (296 255 тыс. руб.), что в 1,92 и 3,23 раза ниже, чем для циклично-поточной и цикличной схем соответственно, а также имеет самый низкий уровень энергоемкости транспортирования на 1 м³ транспортируемого закладочного материала, что делает поточную схему предпочтительной для внедрения на Гремячинском ГОКе при производительности 444,17 м³/ч по солеотходам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bąk, P. The Optimal Transportation Option in an Underground Hard Coal Mine: A Multi-Criteria Cost Analysis / P. Bąk, M.C. Turek, Ł. Bednarczyk, I. Jonek-Kowalska // Resources. - 2024. - Vol. 13, no. 1. - P. 14.

2. Cheng, A. Study on the nonlinear deformation characteristics and constitutive model of cemented tailings backfill considering compaction hardening and strain softening / A. Cheng // Journal of Materials Research and Technology. - 2022. - Vol. 19. - P. 4627–4644.

3. Davis, C.H. Progress with thin seam mechanization / C.H. Davis, J.H. Paterson // Mining Engineer. - 1965. - Vol. 61, no. 5. - P. 54–58.

4. Domaknina, Yu.A. Systematization of factors of strategic development of logistics complexes of mining and chemical enterprises / Yu.A. Domaknina // Economics in Industry. - 2022. - Vol. 15, no. 4. - P. 466–472.

5. Eriksson, C. Garpenberg mine – 10 years of mining with paste backfill / C. Eriksson, A. Nyström // Paste 2018: Proceedings of the 21st International Seminar on Paste and Thickened Tailings (Perth, Australia, 11–13 Apr. 2018) / eds. R.J. Jewell, A.B. Fourie. - Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2018. - P. 323–336.

6. Goncharenko, S.N. Optimization of Ore Concentrate Transportation Indicators of a Mining Enterprise Based on a Logistic Analysis of Alternative Options for Organizing a Transportation System / S.N. Goncharenko, A.M. Ivakhnenko // 2022 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED): Proceedings. - Moscow: IEEE, 2022. - P. 1–6.

7. Hansen, F. Granular Salt Summary: Reconsolidation Principles and Applications / F. Hansen, T. Popp, K. Wieczorek, D. Stührenberg; подготовлено для U.S. Department of Energy, Used Fuel Disposition; Sandia National Laboratories. - July 2014. - Report No. FCRD-UFD-2014-000590.

8. International Organization for Standardization. ISO 21511:2018. Work breakdown structures for project and programme management. - Geneva: ISO, 2018. - 16 p.

9. Janda, A. Pipe transport in underground mining: an experimental approach / A. Janda, I. Zuriguel, J. Bienzobas, A. Garcimartín, D. Maza // AIP Conference Proceedings. - 2013. - Vol. 1542, no. 1. - P. 710–713.

10. Janka, S. Simulation of material flow using vertical transport by a double-action mine hoist / S. Janka, M. Ondov, J. Kováč, M. Szucs, M. Betuš // Acta Simulatio. - 2022. - Vol. 8, no. 4. - P. 47–50.

11. Jin, R. Slurry Transportation Characteristics of Potash Mine Cemented Paste Backfills via Loop Test Processing / R. Jin, X. Wang, S. Zhang, H. Huo, J. Li, W. Ni // Processes. - 2024. - Vol. 12, no. 12. - Art. 2929.

12. Jinyang, L. Application of data mining in logistics industry in the era of big data / L. Jinyang // Proceedings of the 2023 IEEE 2nd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA), Changchun, China, 2023. - [S.l.]: IEEE, 2023. - P. 10–14.

13. Parakh, S. Simulating Backfill Operations for Underground Mining / S. Parakh, N. Russell // Proceedings of the 2021 Winter Simulation Conference / eds. S. Kim, B. Feng, K. Smith, S. Masoud, Z. Zheng, C. Szabo, M. Loper. - Phoenix, AZ, USA: IEEE, 2021. - P. 385–396.

14. Poborska-Mlynarska K. Water disasters in salt mining worldwide: causes, countermeasures, consequences / K. Poborska-Mlynarska // Mining Review. – 2018. – Vol. 74, no. 6. – pp. 33–41.

15. Project Management Institute. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide). - 6th ed. - Newtown Square, Pennsylvania: PMI, 2017. - 756 p. - ISBN 978-1-62825-184-5.

16. Ryl'nikova, M.V. Backfill Technologies and Designs for Deep-Level Sylvinitic Mining / M.V. Ryl'nikova, R.V. Berger, I.V. Yakovlev et al. // Journal of Mining Science. - 2024. - Vol. 60, no. 2. - P. 332–340.

17. Sainsbury, D.P. Design and implementation of cemented rockfill at the Ballarat Gold Project / D.P. Sainsbury, B.L. Sainsbury // Proceedings of the 11th International Symposium on Mining with Backfill (Minefill 2014), Perth, Australia. - Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2014. - P. 205–216.

18. Saw, H. Characterisation of cemented rock fill materials for the Cosmos nickel mine, Western Australia / H. Saw, S. Prentice, E. Villaescusa // Proceedings of the International Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering, Hong Kong, 5–7 Sept. 2011. - Hong Kong, 2011. - P. 1–8. - ISBN 978-962-367-734-6.
19. Wang, J. Optimization of Parameters for Rheological Properties and Strength of Cemented Paste Backfill Blended with Coarse Aggregates / J. Wang, A. Wu, Z. Ruan, R. Bürger, Y. Wang, S. Wang, P. Zhang, Z. Gao // Minerals. - 2022. - Vol. 12, no. 3. - Art. 374.
20. Wu, A. Coupled effects of cement type and water quality on the properties of cemented paste backfill / A. Wu, Y. Wang, H. Wang, S. Yin, X. Miao // International Journal of Mineral Processing. - 2015. - Vol. 143. - P. 65–71.
21. Xu, L. Modeling and Simulation of the Underground Mining Transportation System / L. Xu, S. Ye, G. Lu, Z. Zhang // Advanced Research on Computer Education, Simulation and Modeling: proc. of the CESM 2011 Conf. / eds. S. Lin, X. Huang. - Berlin; Heidelberg: Springer, 2011. - (Communications in Computer and Information Science; vol. 176). - P. 153–159.
22. Xu, L. Modeling and Simulation of the Underground Mining Transportation System / L. Xu, S. Ye, G. Lu, Z. Zhang // CESM 2011, Part II, CCIS 176. - 2011. - P. 116–121.
23. Yang, T. The influence of gangue particle size and gangue feeding rate on the dynamic response of suspended buffer and engineering application / T. Yang, S. Guo, B. An // Journal of Geophysics and Engineering. - 2019. - Vol. 16. - P. 275–288.
24. Yilmaz, E. Curing time effect on consolidation behaviour of cemented paste backfill containing different cement types and contents / E. Yilmaz, T. Belem, B. Bussi ère, M. Mbonimpa, M. Benzaazoua // Construction and Building Materials. - 2015. - Vol. 75. - P. 99–111.
25. Yilmaz, E. Editorial. Advances in the Design and Implementation of Cementitious Backfills / E. Yilmaz, S. Cao, D. Wu // Frontiers in Materials. - 2022. - Vol. 9. - Art. 964111. - 5 p.

26. Yu, H. The Function Design for the Communication-Based Train Control (CBTC) System: How to Solve the Problems in the Underground Mine Rail Transportation / H. Yu, S. Li // *Applied System Innovation*. - 2021. - Vol. 4, no. 2. - P. 31.

27. Yu, H. The Function Design for the Communication-based Train Control (CBTC) System: How to Solve the Problems in the Underground Mine Rail Transportation? / H. Yu, S. Li // *Preprints*. - 2021. - DOI: 10.20944/preprints202104.0428.v1.

28. Zhao, Y. Long-term strength and deformation size effect of gangue cemented backfill in acid mine water / Y. Zhao, Y. Guo, G. Feng, C. Li // *Structures*. - 2023. - Vol. 57. - Art. 105114.

29. Айнбиндер, И.И. Геотехнологии отработки глубоких горизонтов мощных разнородных залежей комплексных медно-никелевых руд Норильска / И.И. Айнбиндер, П.Г. Пацкевич, А.Б. Ковальский // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. - 2009. - N 6. - С. 320–325.

30. Айнбиндер, И.И. К вопросу классификации технологий и составов закладки / И.И. Айнбиндер, И.Н. Савич, О.И. Савич // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. - 2000. - N 1. - С. 186–195.

31. Аллабердин, А.Б. Способ закладки выработанного пространства при восходящем порядке отработки рудных залежей / А.Б. Аллабердин // *Успехи современного естествознания*. - 2021. - N 2. - С. 64–69.

32. Аллабердин, А.Б. Способ закладки выработанного пространства: пат. RU 2603992 С1 / А.Б. Аллабердин. - Российская Федерация. - Заявл. 05.11.2015; опубл. 10.12.2016. - Бюл. N 34.

33. Андрейко, С.С. Газодинамические явления в калийных рудниках: генезис, прогноз и управление: дис. ... д-ра техн. наук: 2.8.6 / С.С. Андрейко. - Солигорск, 1999. - 431 с.

34. Анушенков, А.Н. Производство закладочных работ на примере Таштагольского подземного рудника: учеб. пособие / А.Н. Анушенков. - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2016. - 136 с.

35. Анушенков, А.Н. Разработка технологии приготовления и транспорта активированных закладочных смесей на основе отходов производства: дис. ... д-ра техн. наук / А.Н. Анушенков. - Красноярск, 2000. - 350 с.

36. Аспекты повышения эффективности разработки Верхнекамского калийного месторождения / В.А. Соловьёв, В.Н. Аптуков, Д.С. Чернопазов и др. - Новосибирск: Наука, 2019. - 182 с.

37. Атрощенко, В.А. Повышение эффективности эксплуатации закладочного комплекса футеровкой полиуретаном транспортных трубопроводов: дис. ... канд. техн. наук / В.А. Атрощенко. - Санкт-Петербург, 2023. - 150 с.

38. Балах, Р.В. Механические свойства закладки из хвостов обогащения руд Джебказгана / Р.В. Балах, Г.А. Прокушев, Р.П. Стрельникова // Горный журнал. - 1985. - N 6. - С. 45–48.

39. Баранов, Ю.Д. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий / Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин. - [Днепропетровск]: Новая идеология, 2006. - 416 с.

40. Барях, А.А. Обоснование возможности повторной отработки запасов калийных руд / А.А. Барях, Н.Л. Бельтюков, Н.А. Самоделкина, В.Н. Токсаров // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2020. - N 3. - С. 85–97.

41. Башта, Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т.М. Башта, А.В. Гохман, В.И. Каракозов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1982. - 423 с.

42. Бергер, Р.В. Использование солеотходов в закладке выработанного пространства подземного рудника как средство полной утилизации сформированных на поверхности солеотвалов / Р.В. Бергер, В.И. Татарников // Комбинированная геотехнология: комплексное освоение техногенных образований и месторождений полезных ископаемых: материалы науч.-практ. конф.: тез. докл. - Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2023. - С. 106–109.

43. Блехман, И.И. Вибрационная механика / И.И. Блехман. - М.: Физматлит, 1994. - 400 с.

44. Блехман, И.И. Теория вибрационных процессов и устройств. Вибрационная механика и вибрационная техника / И.И. Блехман. - СПб.: ИД «Руда и Металлы», 2013. - 640 с.

45. Борзаковский, Б.А. Новый закладочный материал из отходов производства калийных удобрений / Б.А. Борзаковский, М.И. Русаков, М.В. Генкин // ОАО «Галургия» – 40 лет пути: задачи, решения, достижения: сб. науч. тр. - Новосибирск: Наука, 2012. - С. 169–173.

46. Борзаковский, Б.А. Опыт размещения глинисто-солевых шламов на калийных рудниках Верхнекамского месторождения / Б.А. Борзаковский, М.И. Русаков, А.В. Шилов // Известия вузов. Горный журнал. - 2009. - N 6. - С. 7–12.

47. Брюховецкий, О.С. Рудничный напорный гидравлический транспорт горной массы: учеб. пособие для вузов / О.С. Брюховецкий. - 2-е изд., стер. - Санкт-Петербург: Лань, 2022. - 196 с.

48. Ваганов, В.С. Шахтная логистика – новые решения / В.С. Ваганов, Т.В. Гоффарт // Уголь. - 2018. - N 8. - С. 60–61.

49. Волков, Е.П. Разработка технологии закладки горных выработок литыми твердеющими смесями на основе хвостов обогащения / Е.П. Волков, А.Н. Анушенков. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. - 176 с.

50. Вяткин, А.Н. Твердеющая закладка на рудниках / А.Н. Вяткин, Д.Г. Горбачев, В.Н. Рубцов. - М.: Недра, 1983. - 192 с.

51. Газодинамические явления в калийных рудниках: методы прогнозирования и способы предотвращения: учеб. пособие. - Пермь: Изд-во ПГТУ, 2007. - 128 с.

52. Галченко, Ю.П. Геоэкологические особенности освоения минеральных ресурсов в криолитозоне / Ю.П. Галченко, Г.В. Сабянин // Экологические системы и приборы. - 2006. - N 6. - С. 22–27.

53. Гвоздяный, С.Е. Методика определения ценообразования энергоресурсов на примере АЭС «Аккую» / С.Е. Гвоздяный, И.В. Яковлев // Молодежь и наука: материалы XIX Междунар. науч.-практ. конф. старшеклассников, студентов и

аспирантов (26 мая 2023 г., г. Нижний Тагил). - Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2023. - С. 173–174. - ISBN 978-5-9544-0142-4.

54. Гертман, В.П. Влияние расхода воды и зернового состава заполнителей на качество закладки / В.П. Гертман, С.А. Атманских, К.Н. Светлаков // Горный журнал. - 1982. - N 5. - С. 28–31.

55. Гогин, Д.Ю. Логистика материальных запасов государственного резерва: основы теории / Д.Ю. Гогин // Проблемы современной экономики. - 2013. - N 1(45). - С. 132–136.

56. ГОСТ 32721–2014. Дороги автомобильные общего пользования. Песок природный и дроблёный. Определение насыпной плотности и пустотности. - Введ. 2015-01-01. - М.: Стандартиформ, 2015. - 9 с.

57. ГОСТ Р 56716–2015. Техника сетевого планирования. Общие положения и терминология. - Введ. 2016-01-01. - М.: Стандартиформ, 2015. - 14 с.

58. Грунты. Методы лабораторной пенетрации: рабочая инструкция РИ 06-2015 / Охотинское общество грунтоведов, Трест геодезических работ и инженерных изысканий («Трест ГРИИ»). - СПб., 2015.

59. Гуттер, А.А. Исследование свойств закладочных материалов, определяющих условия транспортирования и выпуска из бункеров / А.А. Гуттер, И.И. Барсуков // Подземная разработка мощных угольных пластов. - 1976. - Вып. 3. - С. 71–78.

60. Дарбинян, Т.П. Текущее состояние и перспективные направления совершенствования комплекса закладочных работ на подземных рудниках ЗФ ПАО «ГМК Норильский никель» / Т.П. Дарбинян, В.А. Лозицкий, Д.В. Гоголев, В.В. Баландин // Горный журнал. - 2022. - N 1. - С. 40–45.

61. Де Соуза, Э. Экономика и перспективы практики обратной закладки подземных рудников в канадских шахтах / Э. Де Соуза, Дж.Ф. Арчибальд, А.П. Дириг // Материалы 105-го ежегодного общего собрания Канадского института горного дела, металлургии и нефти. - Монреаль, 2003. - С. 1–12.

62. Демин, В.Ф. Применение закрепляющих смол для стабилизации неустойчивого горного массива в угольных шахтах / В.Ф. Демин, В.А. Кан,

Н.А. Кожабек, К.А. Громков // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф., Междуреченск, 15 апр. 2020 г. - Кемерово: Кузбасский гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева, 2020. - С. 113–116.

63. Дмитрак, Ю.В. Повышение эффективности активации компонентов твердеющей закладочной смеси с использованием отходов горно-металлургического производства / Ю.В. Дмитрак, В.П. Голик, В.И. Франчук, В.И. Ляшенко // Горный журнал. - 2021. - Т. 77, N 10. - С. 1023–1031.

64. Домахина, Ю.А. Систематизация факторов стратегического развития логистических комплексов горно-химических предприятий / Ю.А. Домахина // Экономика промышленности. - 2022. - Т. 15, N 4. - С. 466–472.

65. А.Д. Конструирование и расчет химических аппаратов / А.Д. Домашнев. - М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит., 1961. - 624 с.

66. Еремченко, О.З. Природно-техногенная организация почвенного покрова территории воздействия солеотвалов и шламохранилищ в Соликамско-Березниковском экономическом районе / О.З. Еремченко, Н.В. Митракова, И.Е. Шестаков // Вестник Пермского государственного университета. Серия: Биология. - 2017. - N 3. - С. 311–320.

67. Зайцев, О.Н. Совершенствование закладочных работ на Джезказганском горно-металлургическом комбинате / О.Н. Зайцев, Е.И. Николаев // Горный журнал. - 1983. - N 5. - С. 23–25.

68. Зайцева, М.А. Соликамский калийный комбинат – первенец калийной промышленности на Урале [Электронный ресурс] / М.А. Зайцева, Ж.А. Агапова // Пермский государственный архив новейшей истории. - Режим доступа: <https://www.permgaspi.ru/deyatelnost/stati.html> (дата обращения: 18.10.2024).

69. Зубов, В.П. Применяемые технологии и актуальные проблемы ресурсосбережения при подземной разработке пластовых месторождений полезных ископаемых / В.П. Зубов // Горный журнал. - 2018. - N 6. - С. 77–83.

70. Зубов, В.П. Снижение рисков затопления калийных рудников при прорывах в горные выработки подземных вод / В.П. Зубов, А.Д. Смычник // Записки Горного института. - 2015. - Т. 215. - С. 29–37.

71. Илюшин, А.П. Обоснование технологических свойств твердеющей закладки с крупным заполнителем: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.П. Илюшин; Свердлов. горн. ин-т. - Свердловск, 1984. - 24 с.

72. Инструкции по расчету гидротранспорта песчаных и песчано-гравийных материалов: ПР 34-70 / ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. - Л.: ВНИИГ, 1970. - 66 с.

73. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Добыча и обогащение железных руд: ИТС НДТ 25-2021. - М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2021. - 287 с.

74. Князькин, Е.А. Исследование влияния влажности солеотходов на эффективность процесса транспортировки по закладочному трубопроводу / Е.А. Князькин, И.В. Яковлев // Материалы XVI Междунар. науч.-практич. конф. «Новые идеи в науках о Земле». - М.: МГРИ, 2023. - С. 52–54.

75. Князькин, Е.А. Обоснование корректировки логистической схемы Гремячинского подземного рудника с учётом доставки для закладки сухих солеотходов / Е.А. Князькин, И.В. Яковлев // Материалы 5 Междунар. науч. школы акад. К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр». - М.: ИПКОН РАН, 2022. - С. 203–206.

76. Князькин, Е.А. Особенности логистической схемы подземного рудника на больших глубинах при закладке выработанного пространства солеотходами из сформированных техногенных образований / Е.А. Князькин, И.В. Яковлев // Материалы науч.-практич. конф. «Комбинированная геотехнология: комплексное освоение техногенных образований и месторождений полезных ископаемых». - Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2023. - С. 101–102.

77. Ковальский, Е.Р. Разработка технологии закладки выработанного пространства при выемке калийных руд / Е.Р. Ковальский, К.В. Громцев // Записки Горного института. - 2022. - Т. 254. - С. 202–209.

78. Кожушко, Г.Г. Расчет и проектирование ленточных конвейеров: учебно-методическое пособие / Г.Г. Кожушко, О.А. Лукашук. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. - 232 с.

79. Козлова, О.Ю. Дискретно-событийное моделирование транспортных потоков рудника / О.Ю. Козлова // Уголь. - 2021. - N 12 (1149). - С. 12–14.

80. Константинова, С.А. Некоторые задачи механики деформирования и разрушения соляных пород / С.А. Константинова, В.Н. Аптуков. - Новосибирск: Наука, 2013. - 200 с.

81. Крайнев, Б.А. Способ ликвидации солеотвалов на калийных рудниках: пат. РФ N 2355887 / Б.А. Крайнев, С.П. Дьяков, А.И. Шумахер, В.В. Белкин; заявитель ОАО «Уралкалий». - Оpubл. 20 мая 2009 г. - Бюл. N 14. - 5 с.

82. Крупник, Л.А. Технология закладочных работ с полным использованием хвостов обогащения / Л.А. Крупник, Г.В. Соколов, В.С. Герасимов // Совершенствование технологии добычи руд с закладкой на рудниках Казахстана. - Алма-Ата: Наука, 1986. - С. 81–106.

83. Кудря, А.О. Бутобетонная закладка при камерных системах разработки маломощных крутых и наклонных рудных залежей / А.О. Кудря // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2013. - N S1. - С. 45–52.

84. Лавенков, В.С. Решение задачи моделирования потоков минерального вещества в горнотехнических системах и его миграции в окружающую среду с использованием среды AnyLogic / В.С. Лавенков // ИММОД-2017: Труды Междунар. науч. конф. по имитационному моделированию. - СПб., 2017. - С. 446–451.

85. Мещеряков, Э.Ю. Метод формирования комбинированного закладочного массива при камерной системе разработки крутопадающих рудных тел малой и средней мощности на глубоких горизонтах / Э.Ю. Мещеряков, А.Б. Аллабердин // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2014. - N S1-1. - С. 112–118.

86. Милкин, Д.А. Обоснование параметров минерально-сырьевых потоков при проектировании комплексного освоения медно-колчеданных месторождений: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д.А. Милкин. - М., 2009. - 30 с.

87. Морозов, И.А. Оценка устойчивости горных выработок в соляных породах Гремячинского месторождения: дис. ... канд. техн. наук / И.А. Морозов. - Пермь, 2022. - 153 с.

88. Николаева, Т.Н. Инженерно-геологическое обоснование рационального размещения отходов калийного производства: дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 04.00.07 / Т.Н.Николаева. - М., 1998. - 148 с.

89. Новик, Г.Я. Абразивность горных пород // Большая российская энциклопедия. - М.: БРЭ, 2024. - Т. 2. - С. 121–123.

90. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ». Утверждены приказом Ростехнадзора от 08.12.2020 № 505. – Москва, 2020. – 114 с

91. Обоснование и выбор вида, способа и технологии закладки выработанного пространства в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях ведения горных работ на Гремячинском месторождении калийно-магниевых солей: отчет о НИР по договору № ВК-22/251А/8000441100 от 25.02.22 г. между ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий» и ИПКОН РАН / науч. рук. М.В. Рыльникова. - М.: ИПКОН РАН, 2022. - 195 с.

92. Олизаренко, В.В. Анализ логистической схемы горно-обогательного предприятия при комбинированной разработке медно-колчеданных месторождений / В.В. Олизаренко, А.В. Красавин, Р.И. Абдрахманов, В.В. Гольцов // Современные проблемы транспортного комплекса России: межвуз. сб. науч. тр. - Вып. 4. - Магнитогорск: МГТУ им. Г.И.Носова, 2013. - С. 88–94.

93. ООО «ТОМС-проект». Горно-обогательный комбинат по добыче и обогащению калийных солей мощностью 2,3 млн т/год 95% KCl Гремячинского месторождения Котельниковского района Волгоградской области. Рудник Гремячинского ГОК. - 2017. - 245 с.

94. Основные технические решения различных вариантов транспорта галитовых отходов от сильвинитовой фабрики (солеотвала) до места ведения закладочных работ выработанного пространства в наиболее удалённых панелях

восточного и западного участков в руднике Гремячинского ГОК: отчёт по НИР / Е120-0016-8000586352-ПП-01-ОТР1. - Санкт-Петербург, 2024.

95. Паршиков, А.М. К вопросу использования различных материалов для закладки выработанного пространства на угольных шахтах / А.М. Паршиков. - Донецк: Донец. ун-т, 1983. - 19 с.

96. Перевощикова, А.А. Управление отходами калийных горнодобывающих предприятий / А.А. Перевощикова, Р.Д. Перевощиков, Е.Е. Малышкина, Н.В. Митракова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2024. - Т. 335, N 1. - С. 19–35.

97. Петров, А.Н. Совершенствование технологии закладки выработанных камер льдопородной смесью в криолитозонах / А.Н. Петров, Д.Н. Петров // Горный журнал. - 2015. - N 4. - С. 26–28.

98. Петров, А.Н. Технологические решения по отработке месторождения Бадран / А.Н. Петров, Л.М. Алексеев, Д.Н. Петров, С.Г. Колесников // Горный журнал. - 2016. - N 9. - С. 46–49.

99. Петрова, Т.А. Анализ воздействия хранилищ отходов калийного производства на окружающую среду и подходы к выбору рационального способа их складирования / Т.А. Петрова, Т.С. Астапенко, А.А. Кологривко, А.С. Долгих // Вестник евразийской науки. - 2022. - Т. 14, N 3. - С. 185–198.

100. Плоткин, Б.К. Связь производственных и товарных запасов промышленного предприятия: теоретический аспект / Б.К. Плоткин, Д.Ю. Гогин // Проблемы современной экономики. - 2011. - N 1(37). - С. 112–118.

101. Плоткин, Б.К. Формирование и развитие теории минерально-сырьевой логистики / Б.К. Плоткин, М.М. Хайкин // Записки Горного института. - 2017. - Т. 225. - С. 693–699.

102. Пособие по проектированию гидравлического транспорта (к СНиП 2.05.07–85) / Промтрансниипроект Госстроя СССР. - М.: Стройиздат, 1988. - 92 с.

103. Практика управления горным давлением / под ред. В.Д. Слиза, В.В. Панюкова. - М.: Недра, 1985. - 215 с.

104. Пухов, Г.И. Рудничный транспорт / Г.И. Пухов. - М.: Недра, 2006. - 287 с.
105. Пухов, Ю.С. Рудничный транспорт: учеб. для учащихся горно-руд. техникумов по спец. «Эксплуатация и ремонт горного электромех. и автомат. устройств» / Ю.С.Пухов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1991. - 352 с.
106. Радченко, Д.Н. Выбор состава закладочных смесей для формирования консолидированного закладочного массива при подземной отработке Гремячинского месторождения / Д.Н. Радченко, В.И. Татарников // Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр: материалы V Конф. Междунар. науч. школы акад. РАН К.Н.Трубецкого, Москва, 14–18 нояб. 2022 г. - М.: ИПКОН РАН, 2022. - С. 222–225.
107. Радченко, Д.Н. Обоснование новой технологии формирования высокоплотных закладочных массивов на основе солеотходов для обеспечения высокой полноты выемки калийных солей при подземной добыче / Д.Н. Радченко, В.И. Татарников, В.В. Гавриленко // Комбинированная геотехнология: комплексное освоение техногенных образований и месторождений полезных ископаемых: материалы XII науч.-практ. конф. с междунар. участием. - Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2023. - С. 103–106.
108. Радченко, Д.Н. Экспериментальное исследование характера и последствий взаимодействия соляных пород с гидрозакладочными рассолами при подземной разработке месторождений калийных солей / Д.Н. Радченко, Р.В. Бергер, В.И. Татарников, П.О. Зубков // Маркшейдерия и недропользование. - 2023. - N 6(128). - С. 60–67.
109. Райс, В.В. Определение параметров технологии с замораживаемой закладкой выработанного пространства при отработке ценных руд жильных месторождений в криолитозоне: дис. ... канд. техн. наук / В.В. Райс. – Санкт-Петербург, 2019. – 178 с.
110. Растяникова, Е.В. Мировой рынок спецтехники и горнодобывающего оборудования в 2022 г.: сможет ли Китай обеспечить поставки в Россию? / Е.В. Растяникова // Восточная аналитика. - 2022. - Т. 13, N 4. - С. 156–172.

111. Рекомендации по гидравлическому расчету систем напорного гидротранспорта золошлаковых материалов: П 61–77 / ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, УкрНИИГидроуголь. - Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1977. - 52 с.

112. Рубашкина, Т.И. Способ получения композиционного материала для закладки выработанного пространства: пат. RU 2747753 С1 / Т.И. Рубашкина, М.А. Костина. - Российская Федерация. - Заявл. 09.10.2020; опубл. 13.05.2021. - Бюл. N 14.

113. Русаков, М.И. Исследование транспортабельности закладочных смесей из отходов калийного производства и хлористого кальция / М.И. Русаков, Б.А. Борзаковский, А.В. Шилов, В.В. Тарасов, В.С. Пестрикова // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. - 2014. - Вып. 1. - С. 65–70.

114. Рыбак, Я. Прогнозирование геомеханического состояния массива при отработке соляных месторождений с закладкой / Я. Рыбак, М.М. Хайрутдинов, Д.А. Кузиев, Ч.Б. Конгар-Сюрюн, Н.В. Бабырь // Записки Горного института. - 2022. - Т. 254. - С. 210–218.

115. Рыльникова, М.В. Закономерности гипергенного минералообразования в модельных системах кучного выщелачивания техногенных отходов медно-колчеданных месторождений / М.В. Рыльникова, Е.А. Горбатова, Е.А. Емельяненко // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2011. - N 9. - С. 44–52.

116. Рыльникова, М.В. Исследование процессов выщелачивания ценных компонентов из текущих хвостов обогащения медно-колчеданных руд / М.В. Рыльникова, Д.Н. Радченко, Д.А. Милкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2010. - N 2. - С. 19–27.

117. Рыльникова, М.В. Классификация технологий закладки для условий подземной разработки соляных месторождений / М.В. Рыльникова, Р.В. Бергер, И.В. Яковлев, Е.М. Сахаров // Горная промышленность. - 2024. - N 5S. - С. 64–70.

118. Рыльникова, М.В. Обоснование развития логистической системы Светлинского карьера с учетом перспектив перехода на комбинированную

геотехнологию / М.В. Рыльникова, К.И. Струков, Р.В. Бергер, Е.Н. Есина // Горная промышленность. - 2019. - N 6. - С. 106–111.

119. Рыльникова, М.В. Обоснование структуры и параметров логистической схемы подземного рудника при разработке глубокозалегающих месторождений калийных солей системами с закладкой выработанного пространства / М.В. Рыльникова, И.В. Яковлев, Е.М. Сахаров, Р.В. Бергер // Горная промышленность. - 2023. - N 2. - С. 134–139.

120. Рыльникова, М.В. Особенности логистической схемы рудника при освоении глубокозалегающего месторождения калийных солей с закладкой выработанного пространства на основе солеотходов / М.В. Рыльникова, Р.В. Бергер, И.В. Яковлев // Горная промышленность. - 2025. - N 2. - С. 47–54.

121. Рыльникова, М.В. Техничко-технологические решения по закладке выработанного пространства при отработке глубокозалегающих пластов сильвинита / М.В. Рыльникова, Р.В. Бергер, И.В. Яковлев и др. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2024. - N S2. - С. 167–176.

122. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности факторов среды обитания для человека: утв. Глав. гос. санитар. врачом РФ 28 янв. 2021 г.; введ. в действие с 01 марта 2021 г. - М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2021. - 298 с.

123. Селиверстова, Н.С. Подходы к управлению логистическими процессами в условиях цифровой экономики / Н.С. Селиверстова, Р.А. Сабитов// Russian Journal of Economics and Law. - 2022. - N 3. - С. 114–121.

124. Смирнов, К.А. Опыт применения твердеющей закладки на Гайском руднике / К.А. Смирнов, К.Ю. Репп. - М.: ЦНИИцветмет, 1966. - 89 с.

125. Стёпин, А.А. Состояние и пути совершенствования технологии подземных горных работ в условиях вечной мерзлоты / А.А. Стёпин, Ю.В. Михайлов // В сб.: ЦНИИцветмет экономики и информации. Сборник научных трудов. - Вып. 2. - М.: ЦНИИцветмет, 1987. - С. 18–25.

126. Тапси́ев, А.П. Развитие ресурсосберегающих геотехнологий разработки мощных пологопадающих залежей полиметаллических руд в условиях Норильска / А.П. Тапси́ев, А.М. Фре́йдин, В.А. Усков, А.Н. Анушенков, П.А. Филиппов, А.А. Неверов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2014. - N 5. - С. 622-634.

127. Темкин, Е.И. Интеллектуальные системы управления горно-транспортными комплексами: современное состояние, задачи и механизмы решения / Е.И. Темкин, Д.А. Клебанов // Уголь. - 2014. - N 8. - С. 257–266.

128. Трубецкой, К.Н. Особенности методологии создания и применения природоподобных горных технологий при освоении минеральных ресурсов Арктики/ К.Н. Трубецкой, Ю.П. Галченко, Г.В. Калабин//Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2019. - N 3. - С. 53-62.

129. Фангель, Х. Закладка выработанного пространства льдом / Х. Фангель // В кн.: Разработка месторождений с закладкой / под ред. С. Гранхольма. - М.: Мир, 1987. - С. 486–504.

130. Хайрутдинов, М.М. Подземная геотехнология с закладкой выработанного пространства: недостатки, возможности совершенствования / М.М. Хайрутдинов, И.К. Шаймярдянов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2009. - N 1. - С. 240–250.

131. Цibaев, С.С. Особенности применения полимерных и органических скрепляющих составов при ремонте подземных горных выработок / С.С. Цibaев, Д.В. Зоркин, А.А. Ранев, Ц. Ванг // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2020. - Т. 331, N 10. - С. 113–119.

132. Цыгалов, М.Н. Влияние материалов на качество монолитной закладки / М.Н. Цыгалов, И.Т. Слащилин, Г.Д. Замосковцева // Горный журнал. - 1981. - N 5. - С. 27–28.

133. Челябинский тракторный завод. Цены на технику [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://chtz-trak.ru/ceny-na-techniku.html> (дата обращения: 05.01.2025).

134. Черненко, В.Е. Дискретно-событийное моделирование горной добычи в подземном калийном руднике / В.Е. Черненко, А.А. Малыханов // Материалы конф. «Имитационное моделирование: теория и практика» (ИММОД–2013), Казань, 16–18 окт. 2013 г. - Казань, 2013. - С. 292–296.

135. Чудинов, Г.С. Архитектура системы имитационного моделирования грузопотока в калийных рудниках – ПК «Рудопоток» / Г.С. Чудинов // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. - 2011. - N 3. - С. 67–73.

136. Шадронов, А.Г. Совершенствование логистической схемы Светлинского рудника при переходе на циклично-поточную технологию / А.Г. Шадронов, С.А. Саблёв, И.А. Пыталев, О.В. Фридрихсон // Известия ТулГУ. Науки о Земле. - 2020. - Вып. 4. - С. 535–546.

137. Шишлянников, Д.И. Совершенствование оборудования и режимов работы проходческо-очистных комбайнов калийных рудников как энергоэффективных объектов функционирования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.06 / Д.И. Шишлянников. - М., 2012. - 273 с.

138. Шкуратский, Д.Н. Использование отходов производства калийных удобрений в породных смесях для закладки выработанных пространств / Д.Н. Шкуратский, М.И. Русаков // Известия ТулГУ. Науки о Земле. - 2015. - Вып. 3. - С. 87–98.

139. Шувалов, Ю.В. К вопросу снижения инвестиционных рисков при разработке калийных месторождений / Ю.В. Шувалов, О.В. Ковалев, С.П. Мозер и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2010. - N 11. - С. 366–372.

140. Шумаев, В.А. Основы логистики: учеб. пособие / В.А. Шумаев. - М.: Юридический институт МИИТ, 2016. - 314 с.

141. Щербань, П.С. Разработка технологии ведения закладочных работ на месторождениях полиминеральных солей / П.С. Щербань, С.В. Разумович // Техника и технология горного дела. - 2018. - N 3(3). - С. 4-18.

142. Экскаватор Ру. Погрузочно-доставочные машины CATERPILLAR б/у и новые [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://exkavator.ru/trade/karernaya-tehnika/pogruzочно-dostavochnye-mashiny/caterpillar/> (дата обращения: 11.01.2025).

143. Яковлев, И.В. Обоснование параметров логистической системы Гремячинского рудника с гидравлической схемой транспортирования закладочного массива // Материалы VI Междунар. науч. школы акад. К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр». - М.: ИПКОН РАН, 2024. - С. 246–249.

144. Яковлев, И.В. Обоснование условий транспортирования сухих компонентов закладочных смесей в калийный рудник // Материалы 16 Междунар. науч. школы молодых ученых и специалистов. - М.: ИПКОН РАН, 2023. - С. 207–209.

145. Яковлев, И.В. Совершенствование технологии герметизации стволов при проходке кейль-кранцем / И.В. Яковлев, С.В. Иляхин, О.С. Брюховецкий // Молодые — Научкам о Земле: тезисы докладов X Междунар. науч. конф. молодых ученых. - М.: МГРИ, 2022. - С. 52–54.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. Затраты на приобретение оборудования для цикличной логистической схемы
транспортирования закладочного материала Гремячинского ГОКа**

№ п/п	Наименование оборудования	Тип/Модель	Количество, шт	Длина, м	Цена за единицу, тыс.\$	Сумма, руб.
1	2	3	4	5	6	7
Поверхностный модуль						159 418 400
1	Бульдозер	ЧЕТРА Т20	2	-	250	49 325 000
2	Дробильно-сортировочная установка	УМДС-250-0	2	-	30	5 919 000
3	Фронтальный погрузчик	ЧЕТРА ПК-6	2	-	150	29 595 000
4	Ленточные конвейеры	КЛ-1000	2	550	0,6	65 109 000
5	Ленточный конвейер	КЛС 140	2	80	0,6	9 470 400
Корпус затаривания солеотходов						
6	Станция затаривания МКР	АТМ-1000	3	-	50	14 797 500
7	Делитель потока	ДП-600	1	-	3	295 950
8	Скребковый конвейер	СК-800	3	25	4	29 595 000
Вертикальный подземный модуль						
9	Скиповой подъем	Скиповая установка № 1	1	-	320	31 568 000
Горизонтальный подземный модуль						
10	Приемный бункер	БП-60	6	-	50	29 595 000
11	Перегружатель для МКР	УСМ-120	6	-	50	29 595 000
12	Самоходные пневмоколесные вагоны	10ВС-30М	27	-	700	1 864 485 000
Итого						2 159 349 850

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Затраты на приобретение оборудования для циклично-поточной логистической схемы
транспортирования закладочного материала Гремячинского ГОКа**

№ п/п	Наименование оборудования	Тип/Модель	Количество, шт	Длина, м	Цена за единицу, тыс.\$	Сумма, руб.
1	2	3	4	5	6	7
Поверхностный модуль						180 233 550
1	Бульдозер	ЧЕТРА Т20	2	-	150	14 797 500
2	Дробильно-сортировочная установка	УМДС-250-0	2	-	3	295 950
3	Фронтальный погрузчик	ЧЕТРА ПК-6	2	-	150	14 797 500
4	Ленточные конвейеры	КЛС 1400	2	80	0,7	11 048 800
5	Ленточный конвейер	КЛС 1400	1	550	0,7	37 980 250
6	Барабанная сушилка	БН 3,5-27	5	-	17	8 385 250
7	Ленточный конвейер	КЛС 1400	1	550	0,7	37 980 250
Корпус подачи солеотходов						46 069 550
8	Инерционный грохот	ГИС-62	1	-	2	197 300
9	Скребковый конвейер	СПЦ-300	2	30	0,7	4 143 300
10	Донный делитель	ДП-600	1	-	3	295 950
11	Питатель	ПЛ-1000	1	-	4	394 600
Вертикальный модуль						149 652 050
12	Закладочный трубопровод	Сталь Ст3, диаметр 273 мм	1	1110	0,7	76 651 050
13	Буферные устройства	Конический демпфер	4	-	5	1 973 000
14	Рассолопровод	Сталь, диаметр 200 мм	1	1200	0,6	71 028 000

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7
Горизонтальный модуль						1 382 066 770
15	Рассолопровод	Сталь, диаметр 200 мм	2	10000	0,19	374 870 000
16	Бункер-накопитель	БП-60	1	-	7	690 550
17	Скребковый конвейер	СПЦ-271	4	25	0,7	276 220
18	Магистральный конвейер	КЛ-1000	2	10 000	0,7	1 381 100 000
Камерный модуль						18 348 900
19	Передвижной пневмокамерный закладочный комплекс (ППЗК)	ППЗК-150	3	-	16	4 735 200
20	Блочный конвейер	КЛ-1000	6	30	0,7	12 429 900
21	Система орошения	РЗ-1	3	-	4	1 183 800
Дополнительное оборудование						1 144 340
22	Система сжатого воздуха	Компрессорная станция	1	-	8	789 200
23	Уровнемеры	Ультразвуковые	18	-	0,2	355 140
Итого						2 152 385 160

**ПРИЛОЖЕНИЕ В. Затраты на приобретение оборудования для поточной логистической схемы
транспортирования закладочного материала Гремячинского ГОКа**

№ п/п	Наименование оборудования	Тип/Модель	Количество, шт	Длина, м	Цена за единицу, тыс.\$	Сумма, руб
1	2	3	4	5	6	7
Поверхностный модуль						159 418 400
1	Бульдозер	ЧЕТРА Т20	2	-	250	49 325 000
2	Дробильно-сортировочная установка	УМДС-250-0	2	-	30	5 919 000
3	Фронтальный погрузчик	ЧЕТРА ПК-6	2	-	150	29 595 000
4	Ленточные конвейеры	КЛС 1400	2	550	0,6	65 109 000
5	Ленточный конвейер	КЛС 1000	2	80	0,6	9 470 400
Корпус пульпоприготовления						2 466 250
6	Бункер для хранения	Б-20	2	-	3	591 900
7	Встряхиватель	ВМ-3,0	8	-	1	789 200
8	Питатель ленточный	ПЛ-1000	2	-	4	789 200
9	Делитель потока	ДП-600	1	-	3	295 950
Вертикальный модуль						21 012 450
10	Закладочный трубопровод	273х10 мм	1	1100	0,19	20 617 850
11	Бак рассолосборника	РС-50	1	-	4	394 600
Подземный модуль						378 816 000
12	Закладочный трубопровод	273х10 мм	2	10 000	0,19	374 870 000
13	ЦНС	250 кВт	4	-	10	3 946 000
Камерный модуль						1 479 750
14	Камерные рассолосборники	4 м³	6	-	1	591 900
15	Насосы	Центробежный	3	-	3	887 850
Дополнительное оборудование						2 209 760
16	Система сжатого воздуха	Компрессорная станция	2	-	8	1 578 400
17	Уровнемеры	Ультразвуковые	32	-	0,2	631 360
Итого						565 402 610

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Эксплуатационные затраты для цикличной логистической схемы транспортирования закладочного материала Гремячинского ГОКа

№ п/п	Наименование оборудования	Тип/Модель	Кол-во, шт	Срок службы, лет	ТОиР (10%), руб.	Электро-энергия, руб.	Топливо, руб.	Рабочая сила, руб.	Итого, руб.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Поверхностный модуль									
1	Бульдозер	ЧЕТРА Т20	2	10	1 479 750	0	13 812 768	8 500 000	47 585 036
2	Дробильно-сортировочная установка	УМДС-250-0	2	10	5 919 000	40 800 000	0	2 880 000	25 198 000
3	Фронтальный погрузчик	ЧЕТРА ПК-6	2	10	3 946 000	20 400 000	3 600 000	2 880 000	32 892 000
4	Ленточные конвейеры	КЛ-1000	2	15	4 340 600	60 600 000	0	0	21 881 200
5	Ленточный конвейер	КЛС 140	2	15	947 040	10 200 000	0	0	4 294 080
Корпус затаривания солеотходов									
6	Станция затаривания МКР	АТМ-1000	3	12	5 919 00	20 400 000	0	4 320 000	21 935 700
Вертикальный подземный модуль									
7	Скиповой подъем	Скиповая установка № 1	1	20	1 183 200	30 600 000	0	0	5 783 200
Горизонтальный подземный модуль									
8	Приемный бункер	БП-60	6	15	295 950	0	0	0	1 775 700
9	Перегружатель для МКР	УСМ-120	6	15	295 950	0	0	8 640 000	5 935 950
10	Самоходные вагоны	10ВС-30М	27	12	1 553 737	320 400 000	0	38 880 000	465 850 899
Итого									633 131 765

**ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Эксплуатационные затраты для циклично-поточной логистической схемы
транспортирования закладочного материала Гремячинского ГОКа**

№ п/п	Наименование оборудования	Тип/Модель	Кол- во, шт	Срок службы, лет	ТОиР (10%), руб.	Электро- энергия, руб.	Топливо, руб.	Рабочая сила, руб.	Итого, руб.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Поверхностный модуль									
1	Бульдозер	ЧЕТРА Т20	2	10	1 479 750	0	13 812 768	8 500 000	47 585 036
2	Дробильно-сортировочная установка	УМДС-250-0	2	10	3 200 000	3 800 000	0	2 880 000	19 760 000
3	Фронтальный погрузчик	ЧЕТРА ПК-6	2	10	3 946 000	2 400 000	3 600 000	6 500 000	32 892 000
4	Ленточные конвейеры	КЛС 1400	2	15	4 340 600	6 600 000	0	0	21 881 200
5	Барабанная сушилка	БН 3,5-27	5	15	947 040	12 000 000	0	0	25 894 080
Корпус подачи солеотходов									
6	Инерционный грохот	ГИС-62	1	12	82 208	120 000	0	1 440 000	1 642 208
7	Скребковый конвейер	СПЦ-300	2	15	276 220	2 400 000	0	1 440 000	8 232 440
Вертикальный модуль									
8	Закладочный трубопровод	Сталь Ст3, диаметр 273 мм	1	20	383 255	480 000	0	0	863 255
9	Буферные устройства	Конический демпфер	4	20	98 650	0	0	0	394 600

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Горизонтальный модуль									
10	Рассолопровод	Сталь, диаметр 200 мм	2	20	118 380	760 000	0	0	1 756 760
11	Бункер-накопитель	БП-60	1	15	44 064	0	0	0	484 701
12	Магистральный конвейер	КЛ-1000	2	15	789 200	12 000 000	0	0	25 578 400
Камерный модуль									
13	Передвижной пневмокамерный закладочный комплекс (ППЗК)	ППЗК-150	3	12	157 840	4 800 000	0	4 320 000	27 833 520
14	Блочный конвейер	КЛ-1000	6	15	710 280	3 600 000	0	0	25 861 680
Дополнительное оборудование									
15	Система сжатого воздуха	Компрессорная станция	1	15	52 613	2 400 000	0	0	2 452 613
16	Уровнемеры	Ультразвуковые	18	10	8 878	0	0	0	159 804
Итого									243 272 297

ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Эксплуатационные затраты для поточной логистической схемы транспортирования закладочного материала Гремячинского ГОКа

№ п/п	Наименование оборудования	Тип/Модель	Кол-во, шт	Срок службы, лет	ТОиР (10%), руб.	Электро-энергия,руб.	Топливо, руб.	Рабочая сила, руб.	Итого, руб
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Поверхностный модуль									
1	Бульдозер	ЧЕТРА Т20	2	10	1 479 750	0	13 812 768	8 500 000	47 585 036
2	Дробильно-сортировочн. установка	УМДС-250-0	2	10	3 200 000	3 800 000	0	2 880 000	19 760 000
3	Фронтальный погрузчик	ЧЕТРА ПК-6	2	10	3 946 000	2 400 000	3 600 000	6 500 000	32 892 000
4	Ленточные конвейеры	КЛС 1400	2	15	4 340 600	6 600 000	0	0	21 881 200
Корпус пульпоприготовления									
5	Бункер для хранения	Б-20	2	12	65 767	0	0	0	131 534
6	Встряхиватель	ВМ-3,0	8	12	32 883	400 000	0	0	263 064
7	Питатель ленточный	ПЛ-1000	2	15	65 767	1 200 000	0	0	2 531 534
8	Делитель потока	ДП-600	1	12	65 767	305000	0	0	370 767
Вертикальный модуль									
9	Закладочный трубопр.	273x10 мм	1	20	379 803	480 000	0	0	859 803
10	Бак рассолосборника	РС-50	1	20	49 325	0	0	0	49 325
Подземный модуль									
11	Закладочный трубопровод	273x10 мм	2	20	6 905 500	100 000	0	0	14 011 000
12	ЦНС	250 кВт	4	15	789 200	12 000 000	0	0	51 156 800
Камерный модуль									
13	Камерный рассолосборник	4 м³	6	12	65 767	120 000	0	0	1 114 602
14	Насосы	Центробежный	3	10	493 250	4 800 000	0	0	15 879 750
Дополнительное оборудование									
15	Система сжатого воздуха	Компрессорная станция	1	15	52 613	2 400 000	0	0	2 452 613
16	Уровнемеры	Ультразвуковые	32	10	15 784	0	0	0	505 088
Итого									211 444 116