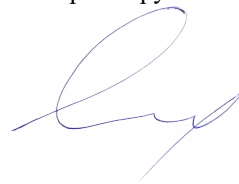


На правах рукописи



**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»

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук в отделе теории проектирования и геотехнологий комплексного освоения недр.

**Научный руководитель:**

**Рыльникова Марина Владимировна** – профессор, доктор технических наук, заведующий лабораторией интеллектуальных методов мониторинга горнотехнических систем ИПКОН РАН, г. Москва.

**Официальные оппоненты:**

**Кузьмин Евгений Викторович**, доктор технических наук, профессор, эксперт проектного офиса «Композиты для строительства» АО ВНИИСВ, г. Тверь.

**Власов Антон Владимирович**, кандидат технических наук, заместитель директора по инжинирингу проектного офиса крупных проектов АО «Алмалыкский ГМК», г. Алмалык.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук, г. Екатеринбург.

Защита диссертации состоится «11» марта 2026 г. в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.1.096.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук (ИПКОН РАН) по адресу: 111020, Москва, Крюковский тупик, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПКОН РАН: [ипконран.рф](http://ипконран.рф)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук



В.С. Федотенко

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы.**

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 междокамерных 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 том, что перемещение закладочных материалов на основе солеотходов организуется как единая логистическая система закладочных работ, учитывающая влажность перемещаемого материала, динамические нагрузки и условия транспортирования на всех звеньях, в совокупности не изменяющая структуру солеотходов, не вызывающая повышенного пыления и обеспечивающая формирование монолитного консолидированного закладочного массива.

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 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 исследования:** 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 исследований:**

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 Benetech 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 складочных работ, прогнозирование уплотнения солеотходов при перепуске, расчет критических скоростей падения в складочном 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 складочных работ выполнено методом приведенных затрат. Рекомендательная календарно-сетевая модель реализации логистической схемы складочных работ составлена в соответствии с ГОСТ Р 56716–2015 и методологией Numeric Schedule Levels.

## **Положения, выносимые на защиту.**

1. Обоснованный выбор параметров логистической схемы закладки при разработке глубокозалегающих месторождений калийных солей обеспечивается применением методики, построенной на принципах учёта влажности складочной смеси и 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 складочных смесей с применением разработанных демпферных устройств позволяет снизить динамические нагрузки на складочный трубопровод и предотвратить преждевременную консолидацию солеотходов в бункерах-накопителях, что обеспечивает повышение надежности логистической системы рудника.

4. Обоснование логистической схемы складочных работ при разработке глубокозалегающих месторождений калийных солей должно осуществляться на основе сравнительного технико экономического анализа гидравлического, сухого и комбинированного способов транспортирования складочного материала и смеси с

применением средств механизации цикличного, поточного и циклично поточного принципа действия, при этом достаточным критерием выбора предпочтительного варианта логистической схемы является минимум удельных энергетических затрат на перемещение в выработанное пространство 1 м<sup>3</sup> 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, выражающей уравнением::

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

**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 раздельную 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 вибрационного рыхления для предотвращения закупорки бункеров-накопителей, что обеспечивает производительность до 446,6 м<sup>3</sup>/ч.

**Научная значимость работы** состоит в том, что впервые обоснована и реализована система знаний и подходов, позволяющая эффективно проектировать и формировать логистическую систему закладочных работ при разработке глубокозалегающих месторождений калийных солей. Эта система учитывает последовательность стадий: от организации перемещения закладочных материалов на основе солеотходов с учётом их влажности, динамических нагрузок и физико-механических свойств до математического моделирования процессов самоуплотнения и определения оптимальных параметров транспортирования, а также обеспечивает надёжность и энергоэффективность всей логистической схемы рудника, что в результате позволяет формировать монолитный закладочный массив с управляемыми консолидационными свойствами.

**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 - Наукам 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 «Молодежь 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.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

*В первой главе проведен анализ условий современных технологических схем формирования монолитных закладочных массивов при подземной разработке соляных месторождений, с выявлением их достоинств и недостатков.*

Рассмотрены перспективы развития технологий формирования монолитных закладочных массивов на основе консолидации солеотходов с высокой степенью заполнения выработанного пространства, что позволяет повысить полноту освоения месторождений и утилизировать практически все отходы обогатительного пердела. Выявлена недостаточная изученность вопросов, связанных с

особенностями транспортирования закладочных материалов при формировании монолитных закладочных массивов на основе консолидации солейотходов, а также влияния глубины залегания месторождений и протяженности транспортных маршрутов на эффективность закладочных работ.

Теоретические основы формирования монолитных закладочных массивов и выбора средств механизации заложены ведущими учеными в области горного дела, среди которых 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 монолитных закладочных массивов, предложены методы расчета параметров систем разработки в зависимости от свойств закладочных материалов, разработаны направления изыскания новых вариантов систем подземной разработки и создания закладочных комплексов.

Вклад в развитие логистических схем перемещения прямых и возвратных минерально-сырьевых потоков внесли: Власов А.В., Гольцов В.В., Клебанов Д.А., Козлова О.Ю., Красавин А.В., Лавенков В.С., Малыханов А.А., Милкин Д.А., Олизаренко В.В., Сабитов Р.А., Селиверстова Н.С., Темкин Е.И., Туркин И.С., Черненко В.Е., Чудинов Г.В., а также зарубежные исследователи Li Yu, Parakh Saurabh, Russell Nicole, Zhang Lu, Ye Xu. В их трудах разработаны методы имитационного моделирования перемещения потоков горных пород и закладочного материала, обоснованы логистические схемы и методы расчета параметров управления минерально-сырьевыми потоками.

Несмотря на достигнутые результаты, в представленных исследованиях недостаточно проработаны вопросы обоснования параметров логистических схем закладочных работ на больших глубинах, включая транспортирование закладочных материалов и смеси на значительные расстояния, сохранение их реологических свойств и предотвращение изменений в процессе доставки и транспортировки, а также минимизацию выхода из строя оборудования и обоснованного выбора режима работы и средств механизации при ведении закладочных работ.

На основании выявленных ограничений сформулированы цель, задачи и основная идея диссертации, направленные на разработку и выбор предпочтительных логистических схем рудника, обеспечивающих устойчивость технологических процессов и стабильность формирования консолидированного закладочного массива с заданными характеристиками при освоении глубокозалегających месторождений калийных солей.

*Вторая глава посвящена развитию научно-методических основ формирования логистической схемы подземного рудника при разработке соляных месторождений с монолитной закладкой, включая обоснование ее структуры с применением классификации логистических схем закладочных работ, предложенной методики определения их параметров, а также математического аппарата для моделирования процессов транспортирования закладочного материала и смеси.*

На основе анализа известного терминологического аппарата и структуры логистических систем подземного рудника сформулированы ключевые элементы



логистической схемы закладочных работ, включающие поверхностный, вертикальный, горизонтальный и камерный модули, призванные обеспечить перемещение и комплексное управление прямыми и возвратными минерально-сырьевыми потоками подземного рудника. Разработана классификация логистических схем ведения закладочных работ в зависимости от метода транспортирования закладочных материалов и смеси, глубины ведения горных работ, расстояния транспортирования, а также размещения модуля обезвоживания закладочной смеси, что позволяет обоснованно выбирать средства доставки смеси и укладки закладочного массива в зависимости от горно-геологических условий месторождения (табл. 1).

Выбор рациональной логистической схемы рудника, учитывающей влияние динамических нагрузок на физико-механические свойства закладочной смеси и минимизирующей риски закупоривания в трубопроводе и перегрузочных узлах, основан на разработанной методике, включающей комплексную оценку горно-геологических, геомеханических, геотехнологических и производственно-организационных факторов. Это позволило сформулировать требования к размещению и функционированию модуля обезвоживания, обеспечивающего стабильность процесса транспортирования смеси и формирование закладочного массива с заданными прочностными и деформационными характеристиками.

Разработанный математический аппарат расчета рациональных параметров логистической схемы подземного рудника учитывает ключевые параметры гидродинамического и механического взаимодействия солеотходов с транспортной системой, что позволяет определять условия для предотвращения закупоривания транспортной смеси, снижения абразивного износа оборудования и обеспечения равномерной подачи закладочной смеси в выработанное пространство.

В целях верификации теоретических положений разработана программа-методика опытно-промышленных исследований, направленная на изучение влияния гидродинамических параметров и состава смеси на её транспортируемость. Анализ линейных потерь напора в пульпопроводе и определение условий фильтрации и твердения смеси свидетельствует, что в совокупности обеспечен научно обоснованный подход к выбору параметров логистической схемы закладочных работ в условиях глубокозалегающих калийных месторождений для повышения эффективности освоения минерально-сырьевой базы и обеспечения экологической безопасности производства.

***В третьей главе предложены конкурирующие варианты логистической схемы подземного рудника с монолитной закладкой выработанного пространства на основе консолидации солеотходов. Проведен комплексный анализ трёх ключевых схем транспортирования закладочных материалов: цикличной, циклично-поточной и поточной.***

Основное внимание уделено концептуальным и технологическим параметрам транспортирования материалов и смеси, влияющим на эффективность логистической системы, а также сохранению физико-механических свойств солеотходов, определяющих их транспортирование.

Комплексные исследования физико-механических характеристик солеотходов показали их высокую вариативность в зависимости от условий получения и хранения, что оказывает значительное влияние на выбор технологии транспортирования и параметры логистической системы.

**Таблица 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 бит-бэгах с последующей транспортировкой ПДМ до закладываемых выработок	до 15 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 15 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 15 км
		2.2.	циклично-поточная	самотечный		гидроциклонирование	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

Определено, что средняя влажность природного сильвинита составляет 0,05–0,15 %, галитовых пород — 0,07 %, тогда как влажность солеотходов, поступающих с обогатительной фабрики, достигает 7,6 %. Оптимальный уровень влажности для формирования консолидированного закладочного массива должен составлять 8–9 %. Однако для обеспечения транспортабельности материала в конвейерных системах и перепуска в сухом виде по вертикальному трубопроводу влажность солеотходов должна быть снижена до 0,05 %. Анализ результатов экспериментов по исследованию зависимости относительных вертикальных деформаций сыпучих материалов от удельной компрессионной нагрузки показал, что увеличение влажности приводит к снижению критической высоты перепуска материала без образования первичной консолидации. Установлено, что для перепуска условно сухого материала (с влажностью до 0,05%) с высоты 1135 метров достаточно применить 4 буферных устройства по высоте ствола, расположенных не реже, чем 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 12 ед. При влажности 8%, потребность в буферных устройствах возрастает в 5 раз до 18 ед. (рис. 1).



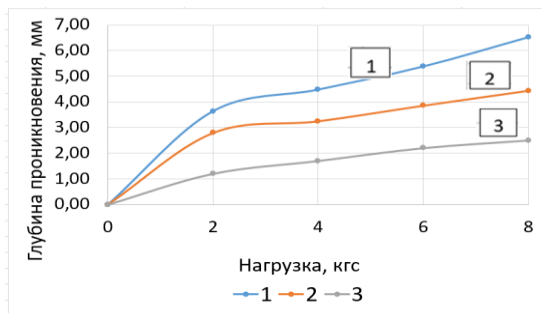
**Рисунок 1.** Зависимость удельной нагрузки компрессионного сжатия и высоты перепуска по трубопроводу от относительной вертикальной деформации сыпучих солеотходов при влажности (1–0,05%; 2–4%; 3–8%)

На основе экспериментальных данных, полученных в лаборатории ЭКОН РАН, построена зависимость относительных вертикальных деформаций сыпучих материалов от удельной компрессионной нагрузки при различной влажности (0,05%, 4%, 8%) и определении количества демпферных гасителей для предотвращения первичной консолидации солеотходов, выражающаяся в уравнении 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:

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

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

При накоплении материала в бункере после перепуска по вертикальному трубопроводу возможно значительное увеличение насыпной плотности солеотходов. Это обусловлено воздействием динамических нагрузок во время перепуска, а также увеличением влажности материала, что способствует образованию кристаллических связей и консолидации материала. Для изучения этой закономерности были проведены соответствующие исследования зависимости глубины проникновения конуса в солеотходы при различной влажности смеси. (рис. 2)



**Рисунок 2.** Зависимость глубины проникновения конуса в солеотходы от удельной нормированной нагрузки при влажности: 1 – 0,05%; 2 – 4%; 3 – 8%.

По результатам выполненных исследований установлено, что с увеличением влажности солеотходов значительно снижается глубина проникновения конуса в насыпную массу солеотходов, что свидетельствует о повышении сопротивляемости материала при воздействии нагрузки (табл. 2)

**Таблица 2.** Результаты экспериментального определения удельного сопротивления и глубины проникновения конуса в солеотходы при различной влажности и нагрузке

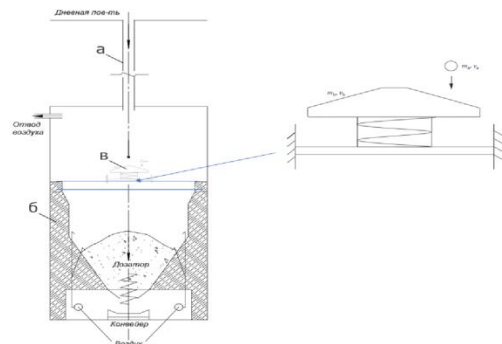
Нагрузка, Н	Удельное сопротивление пенетрации при влажности, кПа			Глубина проникновения конуса при влажности материала, см		
	0,05 %	4 %	8 %	0,05 %	4 %	8 %
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	15,09	25,64	138,89	0,36	0,28	0,12
40	19,93	37,87	138,41	0,45	0,33	0,17
60	20,73	40,31	123,97	0,54	0,39	0,22
80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

Для материала с влажностью 8 % удельное сопротивление пенетрации достигает максимальных значений (138,89 кПа при нагрузке 20 Н), что указывает на формирование плотных межчастичных связей, препятствующих дальнейшему заглублению конуса.

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

Для нейтрализации выявленных недостатков сформулирована концепция и обоснованы параметры процесса управления первичной консолидацией

солеотходов при их перепуске. Эти результаты легли в основу проектирования демпферных устройств, предназначенных для минимизации динамических нагрузок на вертикальные транспортные системы (рис. 3)



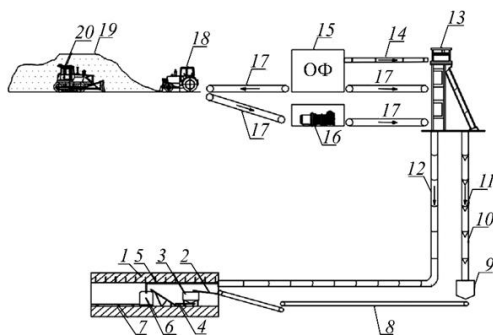
**Рисунок 3.** Предлагаемая конструкция подземного бункера-накопителя с демпфирующим устройством: а — перепускной трубопровод, б — корпус бункера-накопителя, в — демпфер для гашения энергии сыпучей смеси

Определены угол естественного откоса ( $39^\circ$  в покое и  $14\text{--}27^\circ$  в движении), что подтверждает возможность транспортирования материала конвейерными системами с уклоном до  $25^\circ$  при уровне абразивности материала, соответствующего I классу.

Расчетным путем определена производительность каждой единицы используемой техники при применении всех трёх предложенных логистических схем ведения закладочных работ. Установлено, что цикличная схема, характеризующаяся последовательной подачей материала дискретными партиями в мягких контейнерах в сочетании со скиповым подъёмом, позволяет достигать производительности  $444,54 \text{ м}^3/\text{ч}$ , однако временные затраты на загрузку и разгрузку контейнеров приводят к снижению общей производительности подъёмной установки на 18%. В связи с этим разработан уточняющий расчёт по минимизации рисков снижения эффективности системы, включая оптимизацию параметров движения скипового подъема и самоходных вагонов для доставки контейнеров в наиболее удалённые панели рудника.

При анализе циклично-поточной схемы транспортирования закладочных материалов разработан интегрированный закладочный комплекс, включающий поверхностный, стволовой, горизонтальный и камерный модули, которые предусматривают перемещение непрерывного потока закладочных материалов с раздельным использованием конвейерного транспорта в сочетании с трубопроводной системой доставки рассолов (рис. 4).

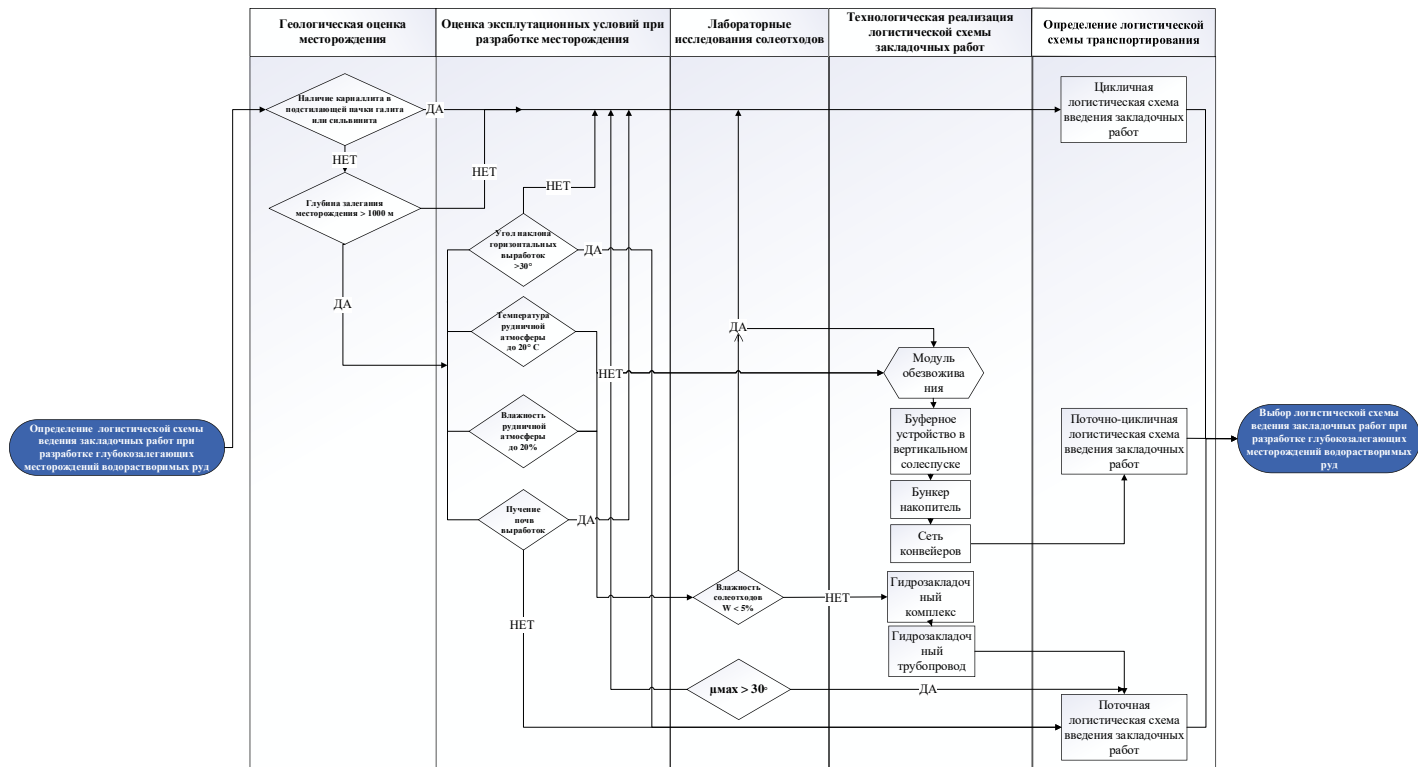
Процесс транспортирования обезвоженных солеотходов с влажностью 0,05% по вертикальному трубопроводу диаметром 273 мм обеспечивается путем оснащения его коническими демпферными устройствами. Для предотвращения слеживания материала предложены бункеры-накопители объемом  $139,36 \text{ м}^3$ , оснащенные системой вибрационного рыхления, что позволяет достичь проектной производительности  $444,17 \text{ м}^3/\text{ч}$  по твердым солеотходам.



**Рисунок 4.** 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 — стволочный комплекс подачи солеотходов; 14 — поверхностная часть рассолопровода; 15 — обогатительная фабрика; 16 — модуль обезвоживания отходов обогащения; 17 — конвейер; 18 — фронтальный погрузчик; 19 — солеотвал; 20 — бульдозер-рыхлитель

Поточная логистическая схема базируется на гидротранспортировании закладочных материалов, рассолов и смеси. Исследования подтвердили технологическую возможность реализации схемы и ее эффективность с обеспечением утилизации 3,431 млн тонн галитовых отходов и 0,340 млн тонн шламов в год. На основании расчётов определены диаметр трубопровода (310 мм), критическая скорость потока (3,28 м/с) и технологические параметры подачи пульпы, позволяющие стабилизировать движение закладочного материала по всей длине гидротранспортирования. Для повышения надёжности функционирования комплекса разработана концепция автоматизированного управления процессом закладки, предусматривающая регулярную промывку пульпопроводов рассолом, предотвращающую их засорение, определены реализуемые параметры.

На основании проведённых исследований разработан алгоритм выбора логистической схемы рудника (рис. 5), учитывающей горно-геологические, геомеханические, технологические и экономические факторы. Обоснованы предельные характеристики скорости движения пульпы -  $\geq 3,61$  м/с и угла наклона конвейерных линий -  $\leq 25^\circ$ , обеспечивающие устойчивость процесса транспортирования. Выявленные зависимости от скорости движения пульпы, угла наклона транспортных линий и гидродинамических характеристик потока позволили сформировать рекомендации по проектированию логистической системы рудника, обеспечивающие минимизацию эксплуатационных затрат и повышение энергоэффективности закладочных работ в условиях глубокозалегающих месторождений калийных солей.

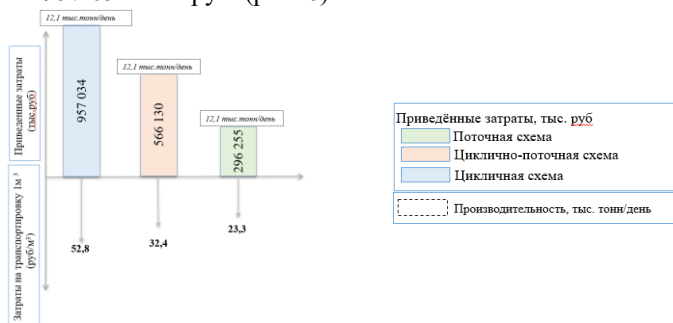


**Рисунок 5.** Алгоритм выбора логистической схемы закладочных работ при разработке глубокозалегающих месторождений водорастворимого сырья

*В четвертой главе проведено сравнительное технико-экономическое обоснование цикличной, циклично-поточной и поточной логистических схем транспортирования закладочных материалов и смеси в условиях Гремячинского ГОКа, а также разработаны рекомендации по выбору технологического оборудования.*

На основе рассчитанных технических характеристик, режима работ и требуемой производительности закладки обоснован состав комплекса технологического оборудования для каждой из рассматриваемых схем, включая выбор бульдозеров, барабанных сушилок, промежуточных бункеров для хранения, конвейерных систем, насосных установок, трубопроводного и закладочного оборудования и других.

Технико-экономические расчёты показали, что приведённые затраты для поточной схемы составляют 296 255 тыс. руб., что является минимальным значением среди всех рассмотренных вариантов. В то же время для циклично-поточной схемы этот показатель достигает 566 130 тыс. руб., а для цикличной схемы – 957 034 тыс. руб. (рис. 6).



**Рисунок 6.** Гистограмма приведенных затрат для различных вариантов транспортировки закладочного материала на Гремячинском ГОКе

Выбор логистической схемы закладочных работ для Гремячинского ГОКа основывался на критериях оптимальности (табл. 3).

**Таблица 3** – Критерии оптимальности для различных логистических схем транспортирования закладочного материала 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/м <sup>3</sup>	5,5	6,6	10,1
Затраты на транспортировку 1м <sup>3</sup> , руб/м <sup>3</sup>	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 условиях горно-геологических условий и экономических ограничений освоения Гремячинского месторождения калийно-магниевого солей.



Таким образом, предпочтительным вариантом по результатам технико-экономического сравнения является поточная логистическая схема, так как она характеризуется приведёнными затратами на ее реализацию в 1,92 и 3,23 раза ниже чем для циклично-поточной и цикличной логистических схем, соответственно, а также имеет самый низкий уровень энергоемкости транспортирования на 1 м<sup>3</sup> транспортируемого закладочного материала - 5,5 кВт·ч, обеспечивая приоритет по показателям экономической, технологической эффективности.

## **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 моделирование перепуска закладочного материала по вертикальным пульпопроводам диаметром 310 мм, расчет критической (3,28 м/с) и рабочей (3,61 м/с) скоростей движения пульпы с учетом гранулометрического состава, плотности фракций и соотношения 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 м<sup>3</sup>, 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 1,91 и 3,23 раза ниже, чем для циклично-поточной и циклической схем соответственно, а также имеет самый низкий уровень энергоемкости транспортирования на 1 м<sup>3</sup> транспортируемого закладочного материала, что делает поточную схему предпочтительной для внедрения на Гремячинском ГОКе при производительности 444,17 м<sup>3</sup>/ч по солеотходам.

**Основное содержание диссертации опубликовано: в изданиях, рекомендованных ВАК России:**

1. Рыльникова М. В., Яковлев И. В., Сахаров Е. М., Бергер Р. В. Обоснование структуры и параметров логистической схемы подземного рудника при разработке глубокозалегающих месторождений калийных солей системами с закладкой выработанного пространства // Горная промышленность. – 2023. – № 2. – С. 134–139. – DOI 10.30686/1609-9192-2023-2-134-139.

2. Рыльникова М. В., Бергер Р. В., Яковлев И. В., Сахаров Е. М. Классификация технологий закладки для условий подземной разработки соляных месторождений // Горная промышленность. – 2024. – № 5S. – С. 64–70. – DOI 10.30686/1609-9192-2024-5S-64-70.

3. Рыльникова М.В., Бергер Р.В., Яковлев И.В. и др. Техничко-технологические решения по закладке выработанного пространства при отработке глубокозалегающих пластов сильвинита // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2024. – № S2. – С. 167-176. – DOI 10.15372/FTPRPI20240214.

4. Ryl'nikova M.V., Berger R.V., Yakovlev I.V. et al. Backfill Technologies and Designs for Deep-Level Sylvinit Mining // Journal of Mining Science. – 2024. – Vol. 60, No. 2. – P. 332-340. – DOI 10.1134/S1062739124020145.

5. Рыльникова М.В., Бергер Р.В., Яковлев И.В. Особенности логистической схемы глубокозалегающего месторождения калийных солей с закладкой выработанного пространства на основе складированных солеотходов // Горная промышленность. – 2025. – № 2S. – С. 88–95. – DOI 10.30686/1609-9192-2025-2- 47-54.

**В прочих изданиях:**

6. Яковлев И. В., Иляхин С. В., Брюховецкий О. С. Совершенствование технологии герметизации стволов при проходке кейль-кранцем // Тезисы докладов X Международной научной конференции молодых ученых «Молодые - Научкам о Земле» - М.: МГРИ. - 2022. - С. 52-54.

7. Князькин Е.А., Яковлев И.В. Обоснование корректировки логистической схемы Гремячинского подземного рудника с учётом доставки для закладки сухих солеотходов // Материалы 5 Международной научной школы академика К.Н.

Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» - М.: ИПКОН РАН. - 2022. - С. 203–206.

8. Князькин Е.А., Яковлев И.В. Исследование влияния влажности солеотходов на эффективность процесса транспортировки по закладочному трубопроводу // Материалы XVI Международной научно-практической конференции "Новые идеи в науках о Земле" – М.: МГРИ. - 2023. - С. 52–54.

9. Князькин Е.А., Яковлев И.В. Особенности логистической схемы подземного рудника на больших глубинах при закладке выработанного пространства солеотходами из сформированных техногенных образований // Материалы научно-практической конференции «Комбинированная геотехнология: комплексное освоение техногенных образований и месторождений полезных ископаемых» - Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. – 2023. - С. 101–102.

10. Яковлев И.В. Обоснование условий транспортирования сухих компонентов закладочных смесей в калийный рудник // Материалы 16 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. – М.: ИПКОН РАН. - 2023. - С. 207–209.

11. Яковлев И.В. Обоснование параметров логистической системы Гремячинского рудника с гидравлической схемой транспортирования закладочного массива // Материалы 6 Международной научной школы академика К.Н. Трубецкого «Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр» - М.: ИПКОН РАН. - 2024. - С. 246–249.