

На правах рукописи

Аргимбаева Кристина Владимировна



**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОСЕКЦИОННОЙ
ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ И ОТКРЫТОЙ
РАЗРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ,
ПРЕДСТАВЛЕННЫХ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИМИ
ХВОСТАМИ ОБОГАЩЕНИЯ ГОКов КМА**

Специальность 2.8.8. Геотехнология, горные машины

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург –2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Лигоцкий Дмитрий Николаевич

Официальные оппоненты:

Тальгамер Борис Леонидович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», кафедра разработки месторождений полезных ископаемых, заведующий кафедрой;

Радченко Дмитрий Николаевич

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, отдел теории проектирования и геотехнологии комплексного освоения недр, ведущий научный сотрудник.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Защита диссертации состоится **24 июня 2025 г. в 10:30** на заседании диссертационного совета ГУ.2 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 24 апреля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОВАЛЬСКИЙ
Евгений Ростиславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В современных условиях в связи с ростом потребления продукции минерально-сырьевого комплекса происходит истощение запасов крупных месторождений, увеличивается спрос на готовую продукцию, ухудшается состояние окружающей среды и возникает настоятельная необходимость вовлечения в разработку техногенных месторождений, представленных железосодержащими хвостами обогащения. Накопление отходов горно-металлургического производства в техногенных объектах осуществляется непрерывно. Так, только в хвостохранилищах горнодобывающих предприятий ГОКов КМА накопилось свыше 600 млн.т. железосодержащих отходов с содержанием полезного компонента до 30 %. При этом наиболее остро стоит вопрос создания новых емкостей для размещения хвостов обогащения с последующей отработкой на Лебединском ГОКе, где существующие хвостохранилища практически заполнены.

В настоящее время формирование хвостохранилищ происходит по классической схеме с естественной дифференциацией полезных компонентов, что не позволяет выделить экономически выгодные зоны для отработки. По ранее проведенным исследованиям доказано, что валовая выемка техногенного сырья приводит к значительным ущербам в виде повышения себестоимости добычи до 16 %, снижения извлечения полезного компонента в 2 раза, производительности выемочно-погрузочного оборудования до 35 %. Поэтому создание посекционной технологии формирования и открытой разработки техногенных месторождений, представленных железосодержащими хвостами обогащения ГОКов КМА, является актуальной задачей. Это позволит повысить производительность выемочно-погрузочного оборудования и полноту извлечения полезного компонента, что в свою очередь снизит себестоимость добычи техногенного сырья.

Работа соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации по п. 6 «Рациональное природопользование» (утвержден Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. № 899). Ее направленность отвечает стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской

Федерации до 2035 года (Распоряжение Правительства от 22 декабря 2018 г. № 2914-р) в части создания новых технологий, позволяющих обеспечить отечественную горнодобывающую промышленность дополнительными запасами железорудного сырья.

Степень разработанности темы исследования

Вопросам комплексного освоения недр и рационального использования ресурсов посвящены исследования ведущих ученых: М.И. Агошкова, С.Е. Гавришева, С.А. Ильина, Ю.Е. Капутина, И.П. Малярова, Н.В. Мельникова, Б.М. Никитина, К.Н. Трубецкого, В.Н. Уманца, Г.А. Холоднякова, М.В. Рыльниковой и др. Они впервые систематизировали и классифицировали техногенные месторождения и образования, выделили основные этапы и последовательность разработки для сформированных (старых) техногенных месторождений.

Несмотря на наличие обширного теоретического потенциала и научно-методической базы, до сих пор не разработаны эффективные и безопасные технологические схемы формирования и разработки техногенных месторождений, представленных хвостами обогащения, которые обеспечили бы высокую производительность выемочно-погрузочного оборудования и повысили экономическую привлекательность и полноту извлечения техногенного сырья.

Предмет исследования - технология формирования и открытой разработки техногенных месторождений, представленных железосодержащими хвостами обогащения ГОКов КМА.

Объект исследования - железосодержащие хвостохранилища ГОКов КМА.

Цель работы - разработка посекционной технологии формирования и освоения техногенных месторождений, представленных железосодержащими хвостами обогащения ГОКов КМА, позволяющей повысить полноту извлечения полезного компонента.

Идея - при разработке посекционной технологии формирования и освоения техногенных месторождений, представленных железосодержащими хвостами обогащения ГОКов КМА, необходимо учитывать сегрегационный процесс.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается при решении **задач**:

1. Оценить объем техногенного сырья, динамику образования, а также методическую базу формирования и вовлечения его в разработку.

2. Разработать посекционную технологию формирования техногенных месторождений с выделением различной крупности техногенного сырья за счет управления сегрегационным процессом.

3. Разработать физическую модель устройства по управлению сегрегационным процессом.

4. Разработать состав для изоляции осушенной секции от внешних осадков.

5. Разработать технологию освоения техногенного месторождения с использованием экскаватора драглайна и гидравлического экскаватора типа обратная лопата и установить зависимости параметров техногенного месторождения от применяемого выемочно-погрузочного оборудования, потерь добываемого сырья.

6. Экономически обосновать целесообразность вовлечения в разработку сформированного посекционно техногенного месторождения, представленного железосодержащими хвостами обогащения ГОКов КМА.

Научная новизна работы:

1. Установлены зависимости распределения осевых и окружных составляющих скоростей потока от диаметра трубопровода при транспортировании железосодержащих хвостов обогащения.

2. Выявлена зависимость потерь полезного компонента при использовании гидравлических экскаваторов типа обратная лопата от ширины разрабатываемой секции и глубины черпания экскаватора.

3. Установлены аппроксимационные зависимости радиуса рабочей зоны добычного забоя экскаватора драглайна от глубины его копания в пределах разрабатываемой секции техногенного сырья.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.8. Геотехнология, горные машины по следующим

пунктам областей исследований: п.1 «Научные основы создания и развития технологий и оборудования для комплексного освоения и сохранения недр в различных горно-геологических и природно-климатических условиях», п.5 «Способы вскрытия шахтных (карьерных) полей, их подготовки, системы разработки, комплексная механизация, технологические процессы добычи твердых полезных ископаемых», п.9 «Технология и оборудование для формирования и отработки техногенных месторождений».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Установлен механизм сегрегационного процесса, происходящего при заполнении секции хвостами обогащения.

2. Разработаны технологические схемы формирования и освоения железосодержащих техногенных месторождений, представленных хвостами обогащения ГОКов КМА, обеспечивающие управляемое разделение техногенного сырья по крупности и плотности.

3. Разработан состав, позволяющий изолировать осушенные секции техногенного сырья от внешних осадков.

4. Предложена методика определения оптимальной ширины секции при формировании техногенных месторождений, представленных хвостами обогащения ГОКов КМА.

5. Предложена методика сокращения потерь при отработке техногенных месторождений, представленных хвостами обогащения ГОКов КМА, в пределах каждой секции.

6. Результаты диссертационных исследований используются в проектных работах, выполняемых ООО «Маггеопроект» для отработки отвалов техногенного сырья (Участок №3 «Северный доменный шлакоотвал» и Участок №2 «Южный шлакоотвал»), что подтверждается актом об использовании результатов кандидатской диссертации от 17.05.2024 г.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использован комплексный метод, включающий: анализ отечественной и зарубежной литературы; проведение в лабораторных условиях исследований свойств лежалых хвостов; проведение экспериментов по управлению сегрегационным процессом и забою экскаватора драглайна; математическое трехмерное параметрическое моделирование и обработку

результатов исследований на ЭВМ с использованием специализированных программных комплексов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Управление сегрегационным процессом при посекционной укладке техногенного сырья по крупности и плотности позволяет при шаге навивки равном диаметру трубопровода с вероятностью 0,88 выделить мелкий класс - $3,1 \pm 0$ мм.

2. Рекомендуемая технология формирования и отработки секции с использованием гидравлических экскаваторов типа обратная лопата (или экскаваторов драглайнов), позволяет обеспечить сокращение потерь полезного компонента не менее чем на 10-15 %.

3. Экранирование секций сформированного техногенного месторождения от внешних осадков за счет использования рекомендуемого состава с 5 % содержанием гидроксипропилметилцеллюлозы позволяет повысить производительность отработки секции не менее чем на 10 %.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена значительным объемом проанализированной и обобщенной исходной информации для аналитических исследований, экспериментальных исследований в натурных и лабораторных условиях, применением современных методов анализа и обработки экспериментальных данных, хорошей сходимостью расчетных данных с результатами лабораторных и натурных экспериментов.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы освещались на: IV Международном форуме студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков «Проблемы горного дела» (г. Донецк, ноябрь 2024 г.), III Международном форуме студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков «Проблемы горного дела» (г. Донецк, апрель 2023 г.), XXII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, с международным участием (г. Нерюнгри, октябрь 2022 г.), II Международном форуме студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков, посвященном 100-летию ДонНТУ (г. Донецк, апрель 2021 г.).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе и обобщении существующего опыта разработки техногенных месторождений; создании и научном обосновании новой технологии; разработке методики и проведении лабораторных и экспериментальных исследований; получении аналитических зависимостей; формулировке основных научных положений и выводов; разработке практических рекомендаций; подготовке публикаций по теме исследования.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 12 печатных работах, в том числе в 5 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3-х статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получены 2 патента и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 103 наименования, 2 приложений. Диссертация изложена на 127 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков и 16 таблиц.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и искреннюю признательность научному руководителю доценту Д.Н. Лигоцкому, развитие идей которого, постоянное внимание и помощь способствовали успешному выполнению работы; сотрудникам кафедры Разработки месторождений полезных ископаемых за ценные советы и помощь в научной работе; зав. лабораторией физико-механических свойств и разрушения горных пород Научного центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета М.Д. Ильинову за содействие в проведении экспериментальных исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, идея, задачи работы и научная новизна,

раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена анализу состояния исследований по вовлечению в разработку железосодержащих техногенных месторождений, закономерностям формирования техногенных месторождений и распределению в них полезных компонентов. Также приведены основные существующие технологии формирования и разработки техногенных месторождений.

Во второй главе представлены результаты изученности криогенных процессов в хвостохранилище Лебединского ГОКа, исследования физико-механических свойств и гранулометрического состава техногенного сырья Лебединского ГОКа, разработанный состав для изоляции добычных блоков техногенного сырья от внешних осадков.

В третьей главе представлены предлагаемые технологии формирования и разработки железосодержащего хвостохранилища Лебединского ГОКа, обеспечивающие безопасность, высокую производительность выемочно-погрузочного оборудования, полноту извлечения техногенного сырья и эффективность разделения железосодержащих хвостов по крупности и плотности; результаты компьютерного моделирования и лабораторных исследований по управлению сегрегационным процессом. Обоснованы параметры формирования техногенного месторождения для последующей отработки, потерь, возникающих при ведении горных работ в *i*-ой секции сформированного техногенного месторождения, гидравлическими экскаваторами типа обратная лопата или экскаваторами драглайнами; предложены методы сокращения потерь в пределах каждой секции.

В четвертой главе изложены результаты технико-экономической оценки целесообразности вовлечения в разработку сформированного посекционно техногенного месторождения, представленного железосодержащими хвостами обогащения ГОКов КМА, путем математического моделирования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Управление сегрегационным процессом при

посекционной укладке техногенного сырья по крупности и плотности позволяет при шаге навивки равном диаметру трубопровода с вероятностью 0,88 выделить мелкий класс $-3,1+0$ мм.

Формирование техногенного месторождения с секциями, разделенными с помощью скальных перегородок, позволяет в значительной степени повысить безопасность ведения горных работ, снизить разубоживание, а также повысить эффективность использования техногенного сырья для различных отраслей (Рисунок 1).

Деление техногенного сырья, укладываемого в секции сформированного техногенного месторождения, по крупности и плотности достигается за счет создания винтообразного движения потока с помощью винтовой сплошной навивки, что позволяет транспортировать хвосты обогащения без оседания тяжелых/твердых частиц в трубопроводе.

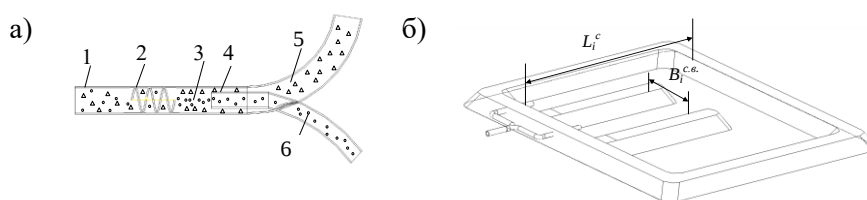


Рисунок 1 – Формируемое посекционно техногенное месторождение с управляемым сегрегационным процессом: а – поперечное сечение устройства по управлению сегрегационным процессом; б – 3Д модель формируемого техногенного месторождения; 1 – цилиндрический корпус; 2 – сплошной винтовой направляющий аппарат; 3 – зона турбулентного движения смеси (слоевого деления); 4 – слоевой делитель; 5 – крупная фракция; 6 – мелкая фракция; L_i^c - i -ая длина секции, м; $B_i^{c.в.}$ - i -ая ширина секции по верху, м

Работа модели по управлению сегрегационным процессом осуществляется следующим образом: полидисперсная смесь, транспортируемая по трубопроводу, попадает на участок с устройством цилиндрической формы. Проходя через этот участок, смесь отправляется на сплошной винтовой направляющий аппарат,

где из ламинарного движение преобразуется в турбулентное. Выходя из этого аппарата, она попадает в зону турбулентного движения смеси (слоевого деления), в котором под действием осевых, окружных скоростей, а также центробежных сил крупная (богатая) фракция прибивается к стенкам трубопровода и, проходя через слой делитель, транспортируется по трубе большего диаметра, а мелкая (бедная) фракция притягивается к центру и транспортируется по трубе меньшего диаметра.

Выявленные в ходе компьютерного моделирования основные параметры, позволили собрать экспериментальную установку. В ходе лабораторных и теоретических исследований производился замер скоростных характеристик полидисперсных смесей при изменении шага навивки (Рисунок 2).

Установлено, что при управлении сегрегацией в процессе формирования техногенного месторождения достигается изменение скоростных характеристик полидисперсных смесей при изменении шага навивки. Наличие высокой осевой скорости способствует надежному удержанию мелких и легких частиц, попавших в ядро потока, от выпадения их в пристеночные области.

Проведенные экспериментальные исследования на техногенном сырье Лебединского ГОКа также доказали, что навивание потока при сохранении неизменной средней скорости транспортирования позволяет разделять поток по крупности и плотности частиц с вероятностью выделения мелкого класса $-3,1+0$ мм 88 % при шаге навивки равном диаметру трубопровода (Таблица 1).

2. Рекомендуемая технология формирования и отработки секции с использованием гидравлических экскаваторов типа обратная лопата (или экскаваторов драглайнов), позволяет обеспечить сокращение потерь полезного компонента не менее чем на 10-15 %.

При формировании и отработке техногенного месторождения создается дамба, которая может иметь различную конструкцию. Полученная емкость делится на секции при помощи перегородок из скальной вскрыши. Отсыпка перегородок по длине производится с оставлением промежутка между перегородкой из скальной вскрыши и дамбой для водоотведения. Укладка

техногенного сырья производится рассредоточенным выпуском в каждую секцию трубами с крупной (богатой) фракцией и с мелкой (бедной) фракцией техногенного сырья. Разделение на крупную (богатую) или мелкую (бедную) фракции осуществляется устройством по управлению сегрегационным процессом. После заполнения секций производится разработка техногенного сырья в пределах каждой секции с двух его сторон при помощи гидравлических экскаваторов типа обратная лопата или экскаваторов драглайнов на всю глубину секции (Рисунок 3).

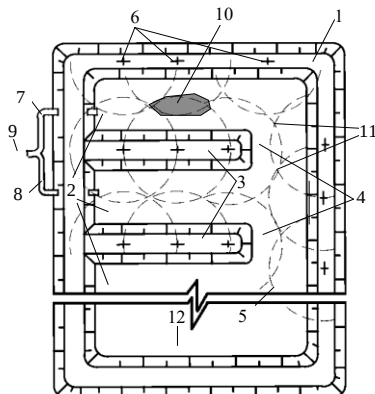


Рисунок 3 – Схема расположения выемочно-погрузочного оборудования при разработке сформированного посекционно техногенного месторождения: 1 – основная дамба; 2 – секции; 3 – перегородки из скальной вскрыши; 4 – промежуток, соединяющий секции; 5 – рабочие зоны экскаваторов; 6 – местоположение выемочно-погрузочного оборудования; 7 – труба с богатой/крупной фракцией сырья; 8 – труба с бедной/мелкой фракцией сырья; 9 – устройство по управлению сегрегационным процессом при формировании техногенного месторождения; 10 – зона перекрещивания рабочих зон экскаваторов; 11 – точки пересечения рабочих зон экскаваторов; 12 – секция водоотведения

Экскавируемое техногенное сырье погружается в автосамосвал и транспортируется на обогатительную фабрику для дальнейшей переработки и использования в различных отраслях промышленности.

Отработка техногенной залежи должна осуществляться в порядке, представленном на рисунке 4. В этом случае снижается риск оползня откоса, повышается коэффициент запаса устойчивости площадки из скальной вскрыши за счет наличия подпорной стенки к откосу, что также влечет повышение производительности выемочно-погрузочного оборудования.

Высота скальной перегородки равна максимальной глубине черпания экскаватора, а ширина i -ой перегородки по верху – минимальной ширине рабочей площадки.

Высота i -ой секции равна максимальной глубине черпания экскаватора, а при сложной конструкции секции, которая может быть выполнена как выше уровня земной поверхности, так и углублена ниже земной поверхности, она составит сумму высот дневной и углубленной частей.

Длина формируемой секции ограничивается границами свободного земельного участка в пределах земельного отвода.

Максимальная ширина секции составит (1):

$$B_i^{c.б.} = R_{1p.з.} + R_{2p.з.} - 2z, м \quad (1)$$

где z - безопасное расстояние от оси экскаватора до крайней бровки уступа, м, $R_{1p.з.}$ - радиус рабочей зоны 1-го экскаватора, м, $R_{2p.з.}$ - радиус рабочей зоны 2-го экскаватора, м.

При этом радиусы рабочих зон применяемых экскаваторов равны их максимальным радиусам копания, которые могут перекрещиваться друг с другом как в одной точке, так и в двух, или вовсе не пересекаться. Величина перекрещивания может варьироваться от расстояния расположения осей экскаваторов между собой и, соответственно, влиять на ширину секции, потери и вместимость.

Важным этапом при разработке сформированного посекционно техногенного месторождения является решение задачи по снижению потерь техногенного сырья в секциях.

Это достигается расположением выемочно-погрузочного оборудования друг напротив друга.

Площадь потерь в i -ой секции при отработке гидравлическими экскаваторами типа обратная лопата имеет зависимость (2):

$$\begin{aligned}
S_{\text{потерь}} = & x \cdot (|b| - |y|) - \left(\frac{R_{1p.z.}^2}{4} \cdot \left(\left| \pi \cdot \frac{\arctg\left(\frac{x}{y}\right)}{90^\circ} - \left| \sin\left(2 \cdot \arctg\left(\frac{x}{y}\right)\right) \right| \right) - \right. \\
& \left. - \pi \cdot \frac{\arctg\left(\frac{x_b}{b}\right)}{90^\circ} + \left| \sin\left(2 \cdot \arctg\left(\frac{x_b}{b}\right)\right) \right| \right) + (x_{32} - x) \cdot (|b| - |y|) - \\
& - \left(\frac{R_{2p.z.}^2}{4} \cdot \left(\left| \pi \cdot \frac{\arctg\left(\frac{x_{32} - x}{y}\right)}{90^\circ} - \left| \sin\left(2 \cdot \arctg\left(\frac{x_{32} - x}{y}\right)\right) \right| \right) - \right. \\
& \left. - \pi \cdot \frac{\arctg\left(\frac{x_b}{b}\right)}{90^\circ} + \left| \sin\left(2 \cdot \arctg\left(\frac{x_b}{b}\right)\right) \right| \right) \right), M^2
\end{aligned} \quad (2)$$

где x_{32}, y_{32} – координаты местоположения 2-го экскаватора; x, y – координаты точек пересечения рабочих зон экскаваторов; $b = (H^c + a) - y, M$; остальные обозначения соответствуют рисунку 4.

В свою очередь, траектория движения ковша экскаватора драглайна описывается уравнением, которое имеет вид (3):

$$y = -a \cdot x^2 + b \cdot x - c \quad (3)$$

где a, b – эмпирические коэффициенты, зависящие от модели шагающего экскаватора; c – константа уравнения.

Решая данное уравнение, получим площадь теряемого техногенного сырья при пересечении рабочих зон экскаваторов драглайнов (4):

$$\begin{aligned}
S_{\text{потерь}} = & \left(\frac{1}{2} \left| \tan^{-1} \left(\frac{b}{\sqrt{R_{1ш.p.z.}^2 - b^2}} \right) \cdot R_{1ш.p.z.}^2 - \tan^{-1} \left(\frac{y_2}{\sqrt{R_{1ш.p.z.}^2 - y_2^2}} \right) \cdot R_{1ш.p.z.}^2 + \right. \right. \\
& \left. \left. + b \cdot \sqrt{R_{1ш.p.z.}^2 - b^2} - y_2 \cdot \sqrt{R_{1ш.p.z.}^2 - y_2^2} \right) - \right. \\
& \left(\frac{1}{2} \cdot (-y_2 \cdot \sqrt{R_{2ш.p.z.}^2 - y_2^2} - R_{2ш.p.z.}^2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{y_2}{\sqrt{R_{2ш.p.z.}^2 - y_2^2}} \right) + b \cdot \sqrt{R_{2ш.p.z.}^2 - b^2} + \right. \\
& \left. + R_{2ш.p.z.}^2 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{b}{\sqrt{R_{2ш.p.z.}^2 - b^2}} \right) - \right. \\
& \left. \left. - y_2 \cdot x_2 + b \cdot x_2 \right) \right), M^2
\end{aligned} \quad (4)$$

Потери техногенного сырья, образующиеся в результате разработки сформированного посекционно техногенного месторождения, могут быть сокращены путем: выполаживания углов откосов уступов в отрабатываемой секции до линий забоев экскаваторов драглайнов; создания съездов в секциях и размещения в них мобильного оборудования для подвигания оставшегося техногенного сырья в рабочую зону экскаваторов; уменьшения высоты разрабатываемой секции на величину, равную координате пересечения рабочих зон экскаваторов по оси ОУ; уменьшения ширины разрабатываемой секции на величину, равную длине основания треугольника потерь.

На рисунке 5 представлен график объема потерь от ширины секции.

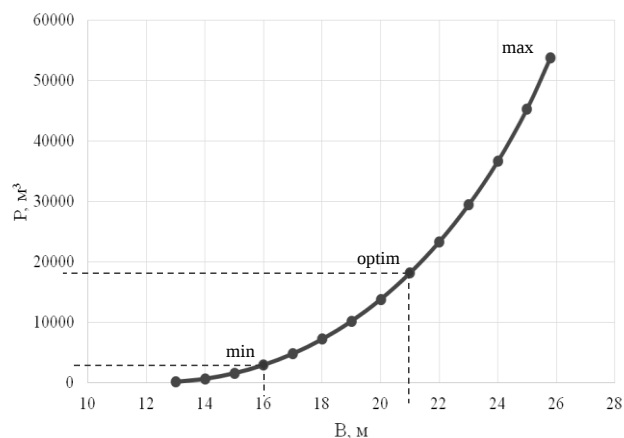


Рисунок 5 – Зависимость величины потерь от ширины секции на сформированном посекционно техногенном месторождении Лебединского ГОКа: P – объем потерь, м^3 ; B – ширина секции, м

Анализируя Рисунок 5, а также применяемое на Лебединском ГОКе оборудование – гидравлические экскаваторы типа обратная лопата Hitachi ZX800 и экскаваторы драглайны ЭО-5111Б, можно сделать вывод, что оптимальная ширина секции составляет 21 м, высота 12 м. Это обусловлено критериями технической возможности оборудования, безопасности ведения горных работ и минимума эксплуатационных затрат. Выявленные

параметры разработанной посекционной технологии формирования и освоения техногенного месторождения позволяют достичь максимальной емкости секции 500 тыс.т. и обеспечить сокращение потерь полезного компонента не менее чем на 10-15 %.

3. Экранирование секций сформированного техногенного месторождения от внешних осадков за счет использования рекомендуемого состава с 5 % содержанием гидроксипропилметилцеллюлозы позволяет повысить производительность отработки секции не менее чем на 10 %.

Как показывает практика, основным источником повышения влажности хвостов после проведенных мероприятий осушения является выпадение внешних осадков как в летний, так и в зимний периоды, что приводит к обрушению профиля добычного забоя и, соответственно, снижению производительности выемочно-погрузочного оборудования. Повышенная влажность способствует развитию криогенных процессов, с появлением мерзлых включений откос добычного забоя экскаватора также ослабевает.

В связи с этим предложен состав, который содержит компоненты при следующем соотношении, мас. %: цемент 20,0-50,0, уксусная кислота 1,0-10,0, целлюлознодиспергируемый полимер гидроксипропилметилцеллюлоза CAS 9004-32-40,1-10,0, синтетическое волокно 0,2-30,0, железистый пигмент 1,0-20,0, вода остальное. Состав предназначен для изоляции подготовленных к выемке добычных блоков, перспективных участков техногенного месторождения для последующей отработки, не допускающий переувлажнения техногенного сырья.

Анализ отечественных и зарубежных изоляционных составов выявил многочисленные их недостатки и непригодность к использованию в условиях техногенных месторождений.

Предлагаемый состав по механизму оказывает следующее действие: блокирует поступление кислорода к обработанной поверхности, благодаря прочности, способен противостоять климатическим факторам, а также минимальным динамическим проявлениям (Таблица 2, Рисунок 6). Увеличенная адгезия позволяет создавать сплошное покрытие на различных поверхностях (скальная порода, пластик, стекло, уголь, хвосты обогащения и др.).

Исследованиями установлено, что уменьшение гидроксипропилметилцеллюлозы в составе приводит к уменьшению деформации образцов. Небольшое увеличение концентрации гидроксипропилметилцеллюлозы в образцах вызывает резкое уменьшение прочности и значительное увеличение деформаций на разрыв, тогда как при недостатке указанный характер изменения параметров прочности и деформации проявляется в гораздо меньшей степени.

По рисунку 7 видно, что при максимально достигнутой влажности хвостов, соответствующей 26 %, допускается применение забоя экскаватора с безопасной высотой 5 м, что обуславливает меньшую вместимость секции и, соответственно, снижение производительности выемочно-погрузочного оборудования (Рисунок 8). При этом выпадение внешних осадков еще больше увеличивает влажность хвостов и приводит к обрушению забоя экскаватора.

Анализ полученных результатов доказывает, что при осушении хвостов согласно разработанной технологии до показателя влажности 15 % безопасно возможная высота забоя экскаватора составит 12 м и приведет к повышению производительности выемочно-погрузочного оборудования не менее чем на 10 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предлагается решение актуальной задачи – разработки посекционной технологии формирования и освоения техногенных месторождений, представленных железосодержащими хвостами обогащения ГОКов КМА, позволяющей повысить полноту извлечения полезного компонента и тем самым экономическую привлекательность освоения техногенных месторождений.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. В контурах горных отводов ГОКов КМА в настоящее время валово заскладировано около 1500 млн. м³ отходов обогащения без четко очерченных границ сортности техногенного сырья, содержащих значительное количество железа, кремния и даже меди, цинка, золота. Хвостохранилищами занято 43 % площади земель, которые дошли до проектных показателей заполнения, что

обосновывает необходимость формирования новых емкостей по совершенно новому принципу с учетом управления сегрегационным процессом для дальнейшей высокоэффективной отработки.

2. Предложенная технология формирования техногенного месторождения включает в себя создание дамбы и перегородок из скальной вскрыши, которые делят месторождение на секции. Укладка сырья в секции осуществляется рассредоточенным выпуском в каждую секцию трубами с крупной (богатой) фракцией и с мелкой (бедной) фракцией техногенного сырья. Искусственный сегрегационный процесс складирования техногенного сырья различной крупности возможен за счет установки в тело потока техногенного сырья сплошной навивки, что на 25 % увеличивает значение осевой составляющей скорости в центральной части за счет ее снижения в пристеночной области трубопровода, и способствует его управлению.

3. Разработанная физическая модель по управлению сегрегационным процессом и проведенные экспериментальные исследования показали, что навивание потока при сохранении неизменной средней скорости транспортирования позволяет разделять поток по крупности и плотности частиц с вероятностью выделения мелкого класса $-3,1+0$ мм 88 % при шаге навивки равном диаметру трубопровода. Среднее содержание полезного компонента в секциях повысится не менее чем на 3-5 %.

4. Состав, направленный на изолирование добычных участков от внешних осадков, основанный на ацетате кальция, кремниевой кислоты, молочной кислоты, обладает улучшенной адгезией до 8 МПа и пределом прочности при одноосном сжатии от 0,3 до 1,84 МПа. Это достигается путем добавления гидроксипропилметилцеллюлозы.

5. Предлагаемая технология освоения посекционного техногенного месторождения включает в себя экранирование заполненных секций разработанным составом от внешних осадков для сохранения влажности хвостов обогащения 15 %, размещение гидравлических экскаваторов типа обратная лопата (или экскаваторов драглайнов) на скальных перегородках друг напротив друга, производство горных работ в пределах секций шириной 21 м, высотой 12 м, что позволяет обеспечить сокращение потерь полезного

компонента не менее чем на 10-15 % и повысить производительность выемочно-погрузочного оборудования не менее чем на 10 %.

6. Экономический эффект от освоения сформированного посекционно техногенного месторождения, представленного железосодержащими хвостами обогащения ГОКов КМА, составляет 920 млн. рубл. при годовой производительности в 2,5 млн.т/год и сроком окупаемости в 1,1 год.

Дальнейшее развитие темы диссертации предполагает широкое применение разработанных технологий на действующих и проектируемых горнодобывающих предприятиях, в научно-исследовательских организациях, а также в развитии фундаментальных основ формирования и разработки техногенных месторождений.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Лигоцкий, Д.Н. Рационализация работы одноковшовых экскаваторов / Д.Н. Лигоцкий, **К.В. Аргимбаева** // Рациональное освоение недр. – 2022. – № 6 (68). – С. 58-63.

2. Лигоцкий, Д.Н. Установление взаимосвязи технологических параметров гидравлических экскаваторов с параметрами добычного забоя хвостохранилища / Д.Н. Лигоцкий, **К.В. Аргимбаева** // Рациональное освоение недр. – 2022. – № 2 (64). – С. 56-60.

3. Аргимбаев, К.Р. Исследование винтовой сплошной навивки при формировании техногенного месторождения / К.Р. Аргимбаев, Д.Н. Лигоцкий, **К.В. Миронова** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 8 (31). – С. 3-8.

4. Аргимбаев, К.Р. Компьютерное моделирование винтовой сплошной навивки при формировании техногенного месторождения / К.Р. Аргимбаев, Е.В. Логинов, **К.В. Миронова** // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 8 (31). – С. 9-15.

5. Аргимбаев, К.Р. Технология формирования техногенного месторождения и определение параметров потерь, возникающих при ведении горных работ с использованием шагающего экскаватора / К.Р. Аргимбаев, Д.Н. Лигоцкий, **К.В. Миронова**, М.О. Бовдуй // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 5. – С. 35-42.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования SCOPUS:

7. Ligotsky, D.N. The sectional formation technology of an anthropogenic deposit with its subsequent mining using a hydraulic pull shovel / D.N. Ligotsky, **K.V. Argimbaeva** // Sustainable Development of Mountain Territories. – 2024. – № 16 (1). – P. 111–121.

8. Argimbaev, K.R. Investigations on Material Composition of Iron-containing Tails of Enrichment of Combined Mining and Processing in Kursk Magnetic Anomaly of Russia / K.R. Argimbaev, D.N. Ligotsky, **K.V. Mironova**, E.V. Loginov // International Journal of Engineering. Transactions A: Basics. – 2020. – № 33 (7). – P. 1431-1439.

9. Argimbaev, K.R. Methods for the Reduction of Loss and Optimization Processes Open Pit Mining Operations When Mining Man-made Deposits Formed by Sections / K.R. Argimbaev, **K.V. Mironova** // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2018. - № 13 (7). - P. 1624–1631.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

10. Патент № 2775024 Российская Федерация, МПК C04B 28/02 (2006.01), C04B 24/04 (2006.01), C04B 16/06 (2006.01). Состав для изоляции пород и отходов от внешнего воздействия: № 2021137254 : заявл. 16.12.2021 : опубл. 27.06.2022 / К.Р. Аргимбаев, **К.В. Аргимбаева**; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 8 с. : 3 ил.

11. Патент № 2661510 Российская Федерация, МПК E21C 41/26 (2006.01) E02B 7/06 (2006.01). Способ формирования и разработки техногенного месторождения и устройство для его осуществления: № 2017127605 : заявл. 01.08.2017 : опубл. 17.07.2018 / К.Р. Аргимбаев, **К.В. Миронова**, П.К. Подлесный, М.О. Бовдуй; заявитель Санкт-Петербургский горный университет. – 11 с. : 9 ил.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016662579 Российская Федерация. Определение параметров добычного забоя при разработке хвостохранилищ. Заявка № 2016660269. Дата приоритета: 03.10.2016. Дата регистрации: 15.11.2016. Авторы: К.Р. Аргимбаев, **К.В. Миронова**, М.О. Бовдуй. Заявитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 416 Кб.

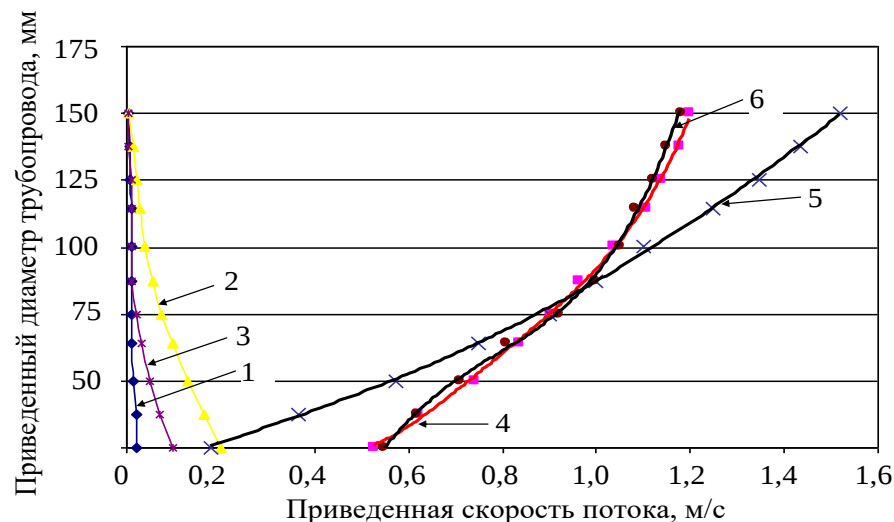


Рисунок 2 – Распределение осевых и окружных составляющих скоростей потока в сечении трубопровода: 1 – приведенная окружная скорость $\bar{g}_o$ (без винтовой вставки); 2 – приведенная окружная скорость $\bar{g}_o$ (винтовая вставки с шагом $l = D$); 3 – приведенная окружная скорость $\bar{g}_o$ (винтовая вставки с шагом $l \approx 20 \cdot D$); 4 – приведенная осевая скорость $\bar{g}_T$ (без винтовой вставки); 5 – приведенная осевая скорость $\bar{g}_T$ (винтовая вставки с шагом $l = D$); 6 – приведенная осевая скорость $\bar{g}_T$ (винтовая вставки с шагом $l \approx 20 \cdot D$)

Таблица 1 – Результаты эксперимента влияния винтовой сплошной навивки на изменение скорости потока и вероятность выделения мелкого класса

Показатели	без винтовой вставки	винтовая вставка с шагом $l = D$	винтовая вставка с шагом $l \approx 20 \cdot D$
Приведенная скорость потока, м/с	1,02	1,18	1,05
Вероятность выделения класса -3,1+0 мм при установке делителя в 0,5*D	0,15	0,88	0,25

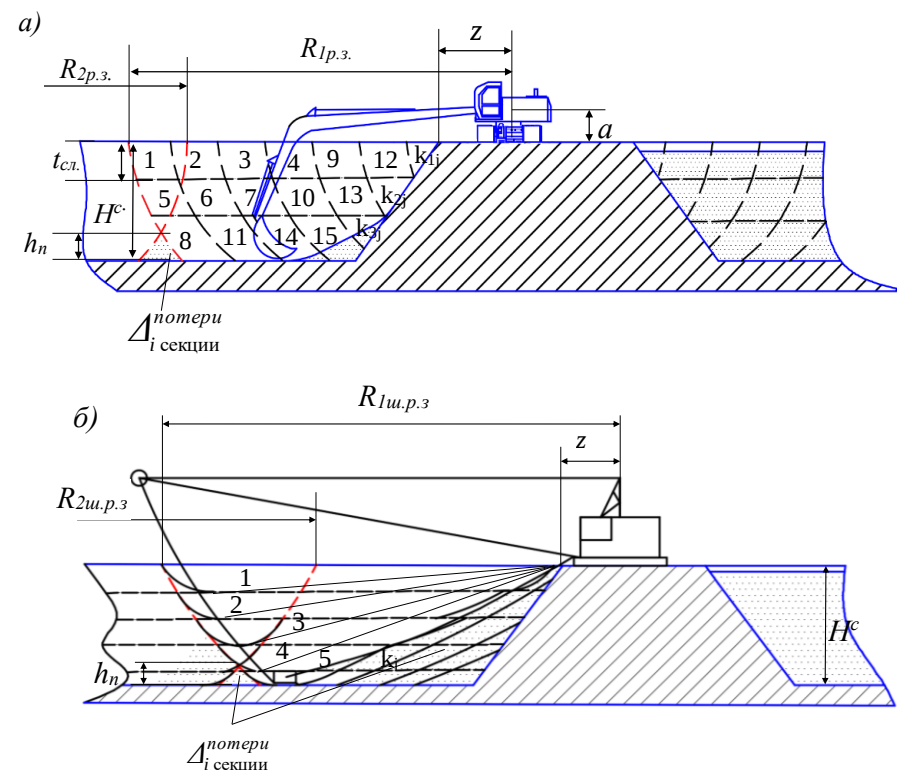


Рисунок 4 – Порядок отработки секции с использованием: а – гидравлических экскаваторов типа обратная лопата; б – экскаваторов драглайнов; $R_{1p.z.}$, $R_{1ш.п.з.}$ – радиус рабочей зоны 1-го экскаватора, м; $R_{2p.z.}$, $R_{2ш.п.з.}$ – радиус рабочей зоны 2-го экскаватора, м; $t_{сл.}$ – мощность слоя материала, м; $\Delta_{i \text{ секции}}^{потери}$ – величина потерь при пересечении рабочих зон экскаваторов в i -ой секции, а также не добытый материал в силу ограниченности технических параметров выемочно-погрузочного оборудования; h_n – высота потерь, м; 1,2,3, ..., k_{1j} , k_{2j} , k_{3j} , k_{nj} – порядок отработки блоков материала; z – безопасное расстояние до бровки уступа, м; H^c – высота секции, м

Таблица 2 – Результаты лабораторных исследований составов

Свойства состава/содержание полимера, %	0	0,1	5	10	15
Смываемость водой при нанесении на 1 м ² поверхности 200 г вещества, г/м ²	1	1	2	3	1
Адгезия, МПа	3	5	7	8	5
Огнестойкость	не горит	не горит	не горит	не горит	плав/разруш
Предел прочности при одноосном растяжении, МПа	0,3	1,45	1,84	1,41	0,40
Предел прочности при одноосном сжатии, МПа	-	13,18	14,45	13,14	-
Предельное сопротивление срезу без нормальных напряжений, МПа	-	2,98	3,15	2,80	-

а



б



Рисунок 6 – Лабораторные исследования подготовленных образцов на одноосное сжатие сферическими инденторами: а – вид установки, б – результат испытания образца с замером

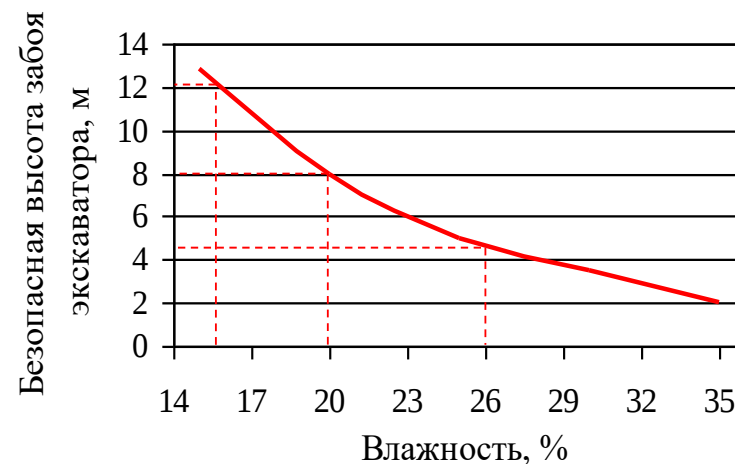


Рисунок 7 – Зависимость безопасной высоты забоя экскаватора от влажности средневзвешенных лежалых хвостов при $K_{з,у} = 1,3$

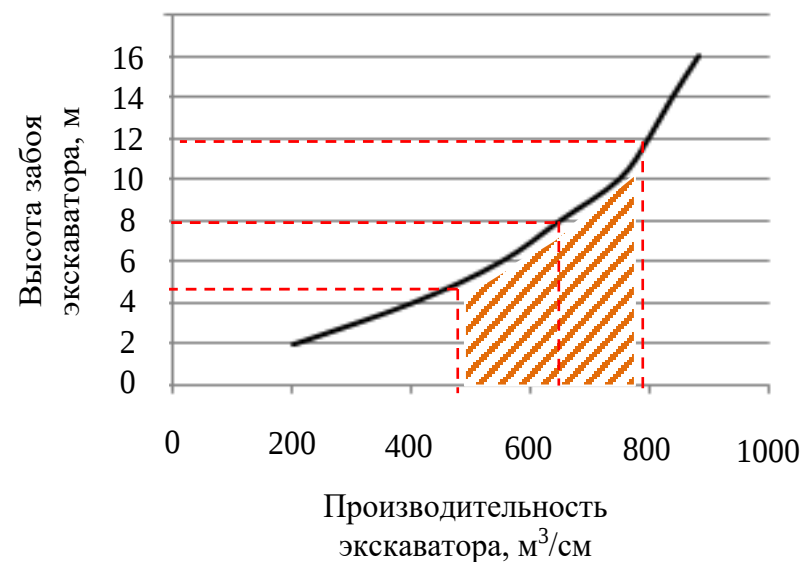


Рисунок 8 – Зависимость производительности выемочно-погрузочного оборудования от высоты забоя экскаватора