

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

На правах рукописи

Куренков Дмитрий Сергеевич

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ
ХРАНИЛИЩ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБЕЗВОЖЕННЫХ ОТХОДОВ
ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ**

Специальность 2.8.3

«Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика,
маркшейдерское дело и геометрия недр»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель

к.т.н., доцент Ческидов Василий Владимирович

Москва, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ СКЛАДИРОВАНИЯ ОТХОДОВ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИХ ХРАНИЛИЩ	9
1.1 Накопители отходов горно-обогатительного производства и технологии их формирования	9
1.2 Анализ аварийных ситуаций, связанных с деформационными явлениями техногенных откосных сооружений	20
1.3 Способы, технологии транспортирования и складирования обезвоженных отходов обогащения твердых полезных ископаемых	27
1.4 Организация мониторинга откосных горнотехнических сооружений и анализ методов получения информации о состоянии техногенных массивов	43
Выводы	50
ГЛАВА 2. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОТКОСОВ И ВМЕСТИМОСТЬ ХРАНИЛИЩ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ	51
2.1 Горно-геологические условия разработки Костомукшского железорудного месторождения	51
2.2 Технологические процессы и основные объекты АО «Карельский окатыш»	56
2.3 Исследование состава и свойств отходов обогащения железистых кварцитов	62
2.4 Физико-географические факторы, определяющие условия формирования хранилищ отходов обогащения железистых кварцитов	76
2.5 Определение вместимости хранилищ отходов переработки железорудного сырья при различных физико-механических свойствах их отложений	93
2.6 Оценка устойчивости массивов глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов	106
2.7 Систематизация факторов, влияющих на технологию возведения и состояние хранилищ глубоко обезвоженных отходов переработки железорудного сырья	122
Выводы	126
ГЛАВА 3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ХРАНИЛИЩ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ В УСЛОВИЯХ АО «КАРЕЛЬСКИЙ ОКАТЫШ»	128
3.1 Способы и оборудование для обезвоживания и сгущения отходов обогащения твердых полезных ископаемых	128
3.2 Модернизация вибрационной машины для эффективного сгущения и очистки хвостовых пульп для складирования обезвоженных отходов обогащения	133
3.3 Исследование процессов классификации, сгущения и обезвоживания отходов обогащения железистых кварцитов в вибрационной машине	138

3.4 Совершенствование технологии формирования хранилищ предварительно обезвоженных отходов переработки железорудного сырья	148
Выводы	159
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ХРАНИЛИЩ ОБЕЗВОЖЕННЫХ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ	160
4.1 Классификация факторов возникновения и развития опасных горно-геологических явлений при формировании хранилищ отходов горно-обогатительных производств	160
4.2 Риск-ориентированный подход при анализе устойчивости хранилищ отходов обогащения твердых полезных ископаемых	171
4.3 Разработка модели управления безопасностью формирования хранилищ глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов и мониторинга устойчивости их откосов	176
Выводы	185
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	186
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	188
ПРИЛОЖЕНИЕ А. РАСЧЕТЫ УСТОЙЧИВОСТИ МНОГОЯРУСНЫХ МАССИВОВ, СЛОЖЕННЫХ ОБЕЗВОЖЕННЫМИ ХВОСТАМИ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ	204

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Рост численности населения Земли и интенсификация его хозяйственной деятельности сопровождается увеличением количества образующихся отходов. В настоящее время их годовые объемы неуклонно растут и превысили отметку 100 млрд т при доле участия РФ около 8,5 млрд т, при этом на обогатительные производственные процессы приходится до 1 млрд т хвостов – отходов обогащения твердых полезных ископаемых. Дальнейший рост объемов добычи минеральных ресурсов на фоне возросших экологических требований к недропользованию вызывает необходимость разработки рациональных способов размещения отходов обогатительных производств в специальные горнотехнические сооружения, в частности, полностью или частично водонасыщенные, так как аварии на них сопровождаются обычно серьезными негативными экологическими и экономическими последствиями. Данные обстоятельства предъявляют к объектам размещения отходов требование обеспечения безопасности их строительства и эксплуатации.

Преимущественно при размещении отходов обогатительных производств используются традиционные технологии гидроотвалообразования, когда хвосты размещаются в сформированные емкости намывного сооружения в виде пульпы – смеси минеральных частиц с водой. Это приводит к формированию во внутренних зонах мощной толщи водонасыщенных тонкодисперсных неуплотненных пород, специфической особенностью которых является наличие избыточного порового давления, существенно снижающего их прочностные свойства и сказывающееся на устойчивости откосов. В последние годы на обогатительных фабриках различных производств используются технологии предварительного обезвоживания хвостов с получением продукта влажностью 12–18 % и последующим формированием объектов размещения, так называемым, сухим способом, с применением автомобильной и бульдозерной техники. Целью складирования сгущенных и глубоко обезвоженных хвостов является снижение влажности техногенных отложений, что повышает вместимость хранилища, устойчивость откосов и снижает риск наступления аварийной ситуации в результате тиксотропного разжижения.

Современное горное производство требует решения новых задач, направленных на создание принципов формирования хранилищ отходов переработки рудного сырья в условиях мирового тренда к отказу от складирования водонасыщенных отложений, ограниченности территориальных ресурсов и отсутствия широкого опыта возведения таких массивов. Поэтому разработка инженерно-геологического обеспечения формирования и эксплуатации хранилищ предварительно обезвоженных отходов обогащения рудных полезных ископаемых и контроля их

состояния является актуальной научной, технологической и производственной задачей особенно для объектов черной металлургии.

Целью диссертационной работы является разработка инженерно-геологического обеспечения формирования хранилищ предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов.

Идея работы заключается в создании рациональных технологий подготовки к складированию и формирования хранилищ отходов обогащения железистых кварцитов.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие основные **задачи**:

- проведен анализ российского и зарубежного опыта формирования хранилищ водонасыщенных отходов обогащения твердых полезных ископаемых и систем контроля их состояния;
- выявлены основные факторы, влияющие на безопасные условия формирования хранилищ отходов обогащения железистых кварцитов;
- обоснованы показатели состояния хранилищ предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов;
- разработаны рациональные технологии обезвоживания отходов обогащения железистых кварцитов и их последующего складирования в хранилища;
- определена необходимая и достаточная частота измерений параметров хранилищ, сложенных глубоко обезвоженными отходами обогащения железистых кварцитов, позволяющая обеспечить экологическую безопасность их эксплуатации;
- обоснованы параметры системы мониторинга состояния хранилищ предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Учет характеристик и особенностей рельефа местности, физико-механических свойств и возможности тиксотропных превращений обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов позволяет уменьшить объемы возводимых ограждающих дамб в 1,50÷4,25 раза и сократить площади нарушаемых территорий.

2. Предварительное обезвоживание отходов обогащения железистых кварцитов до остаточной весовой влажности 10 % с использованием вибрационных установок и дальнейшее складирование отходов с применением технологии послойной укладки или укладки «по склону» обеспечивает рациональное использование земельных ресурсов, экологическую безопасность и стабильное функционирование хвостового хозяйства.

3. Разработанная классификация горно-геологических явлений в откосных горнотехнических сооружениях, сложенных отходами переработки железорудного сырья,

позволяет создать систему мониторинга и управления состоянием хранилищ предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов.

Методы исследований включают:

- анализ научно-технической информации по теме исследования, обобщение мирового и отечественного опыта формирования хранилищ отходов горного производства и контроля их состояния;
- лабораторные исследования физико-механических свойств отложений техногенных массивов и хвостовых пульп, включая такие методы, как спектроскопический, гравиметрический и инфракрасно-абсорбционный методы определения содержания элементов, рентгенофазовый анализ и мёссбаэровская спектроскопия, пикнометрический метод определения истинной плотности частиц;
- статистические методы обработки и интерпретации инженерно-геологической информации с учетом изменчивости свойств отходов обогащения железистых кварцитов;
- расчеты устойчивости откосных сооружений, сложенных отходами обогащения железистых кварцитов;
- компьютерное моделирование параметров элементов горнопромышленных природно-техногенных систем.

Научная новизна исследований:

1. Установлены зависимости изменения коэффициента запаса устойчивости массива, сформированного глубоко обезвоженными отходами обогащения железистых кварцитов, от показателей их свойств, в том числе степени водонасыщенности, и геометрических параметров хранилища.

2. Обоснованы технологические схемы формирования хранилищ предварительно обезвоженных с использованием вибрационной установки отходов обогащения железистых кварцитов с применением послойной укладки или укладки «по склону».

3. Разработана классификация горно-геологических явлений в откосных сооружениях, сложенных отходами обогащения железистых кварцитов.

4. Создана и обоснована четырехуровневая типизация характеристик горнотехнических объектов, которая позволяет разработать системы мониторинга хранилищ, сложенных глубоко обезвоженными отходами обогащения железистых кварцитов, для обеспечения экологической безопасности их эксплуатации.

Практическое значение исследований состоит в следующем:

1. Определены оптимальные формы рельефа при формировании хранилищ отходов обогащения железистых кварцитов с учетом их различной влажности для условий АО «Карельский окатыш».

2. На 10 % увеличена вместимость хранилища отходов обогащения железистых кварцитов благодаря послойной укладке или укладке «по склону» хвостов со средней весовой влажностью 10 % после их предварительного глубокого обезвоживания в вибрационной установке.

3. Разработана структура и состав системы мониторинга состояния хранилищ предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов, обеспечивающие рациональную частоту получения инженерно-геологической и гидрогеологической информации.

Апробация работы. Содержание диссертационного исследования, полученные результаты и основные научные положения докладывались на всероссийских и международных научных конференциях, симпозиумах, форумах и семинарах:

13-я Международная научная школа молодых ученых «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых» (Москва, 21–25 ноября 2016 года); Юбилейный XXV Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2017» (Москва, 23–27 января 2017 года); XV Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (Санкт-Петербург, 29–31 марта 2017 года); The XIIIth, XIVth, XVth, XVIIth International Forum-Contest of Students and Young Researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources» (Saint-Petersburg, April 19–21, 2017; April 18–20, 2018; May 13–17, 2019; May 31–June 06, 2021); 68. BHT–Freiberger Universitätsforum: Freiberg-St. Petersburger-Colloquium for Young Scientists (Germany, Freiberg, June 8–9, 2017); 70th Berg-und Hüttenmännischer Tag 2019 (Germany, Freiberg, June 5–7, 2019); XXIX Международный научный симпозиум «Неделя горняка-2021» (Москва, 25–29 января 2021 года).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования, выборе методов проведения исследований, формулировании основных научных положений, проведении анализа научно-технической литературы, лабораторных исследований, выполнении расчетных работ, анализе и обобщении полученных результатов, модернизации конструкции вибрационной машины для предварительной стадии обработки хвостовых пульп и установлении оптимальных режимов ее работы, разработке и обосновании схем формирования хранилищ предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов, разработке классификации горно-геологических явлений в откосных сооружениях, сложенных отходами переработки железорудного сырья, разработке системы мониторинга состояния хранилищ предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов.

Достоверность и обоснованность научных результатов подтверждаются:

- использованием комплекса общепризнанных научных методов исследования свойств отходов обогащения;
- удовлетворительной сходимостью полученных результатов с результатами других исследователей;
- применением методик проведения исследований с использованием сертифицированного оборудования с высокими метрологическими характеристиками.

Публикации. По теме исследования опубликовано 8 научных работ, в том числе 2 в изданиях рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, 2 – в изданиях индексируемых базами данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 98 рисунков, 31 таблицу, список литературы из 292 источников, 1 приложение.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ СКЛАДИРОВАНИЯ ОТХОДОВ ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИХ ХРАНИЛИЩ

1.1 Накопители отходов горно-обогатительного производства и технологии их формирования

Добыча и переработка полезных ископаемых сопровождается образованием значительного объема отходов как при вскрышных работах, так и при дальнейшем переделе извлеченного сырья. В результате возникает необходимость размещения (хранения и захоронения), утилизации и обезвреживания образующихся отходов, что требует отвода для этих нужд значительных территорий. В свою очередь это влечет за собой образование техногенного ландшафта, серьезное изменение геологической среды, нарушение гидрогеологических и инженерно-геологических условий в районе ведения работ, загрязнение подземных вод. В основном данные изменения в регионах добычи и переработки полезных ископаемых вызваны образованием открытых горных выработок – карьеров и разрезов, а также формированием крупных намывных и насыпных техногенных массивов, приводящих к изменениям естественных природных процессов [1-3]. Зачастую данное техногенное влияние вносит большой вклад в изменение облика территорий, чем естественные геологические процессы, так как по данным ЮНЕСКО количество ежегодно извлекаемой и перемещаемой человеком горной массы превышает 100 млрд т, при этом образуется и накапливается более 20 млрд т отходов различного вида и класса опасности [4-6].

Одной из негативных сторон деятельности горнодобывающих предприятий являются необратимые изменения территорий ведения горных работ и нарушение значительных площадей плодородных земель в результате отчуждения территорий для организации горных выработок и строительства горнотехнических сооружений. По состоянию на 1 января 2021 года в Российской Федерации в результате разработки месторождений полезных ископаемых (МПИ) нарушено более 578 тыс. га земель [7]. В среднем при добыче 1 млн т угля нарушается до 43 га земель, а при добыче и обогащении 1 млн т железных руд это значение может достигать 600 га.

За многовековую историю горнодобывающего дела только отходов обогащения полезных ископаемых к 2020 году было образовано более 223 млрд м³ (534 млрд т). При текущем мировом уровне добыче полезных ископаемых ежегодный прирост хвостов составит более 8 млрд м³ (19 млрд т) [8]. В России ежегодный объем укладки вскрышных пород и отходов обогащения в намывные горнотехнические сооружения превышает 300 млн м³, из которых годовой прирост хвостов обогащения составляет более 200 млн м³. Только в регионе Курской магнитной аномалии

(КМА) ежегодный объем вскрышных пород превышает 80 млн м³, а при работе обогатительных фабрик АО «Апатит» складывается свыше 10 млн м³ отходов обогащения апатит-нефелиновых руд. Всего в намывных сооружениях горной промышленности РФ накоплено свыше 5 млрд м³ хвостов обогащения и 1 млрд м³ воды, ежегодный объем складирования отходов обогащения руд цветных и черных металлов в мире составляет около 3 млрд м³. Также стоит отметить, что при формировании хранилищ отходов мокрого обогащения твердых полезных ископаемых используется от 40 до 65 % земельного отвода [7, 9-18].

По данным Министерства природных ресурсов и экологии РФ [7] за период 2012–2021 гг. количество образующихся отходов производства при добыче полезных ископаемых выросло на 66 % – с 4629,3 млн т в 2012 г до 7690,5 млн т в 2021 г (рисунок 1.1).

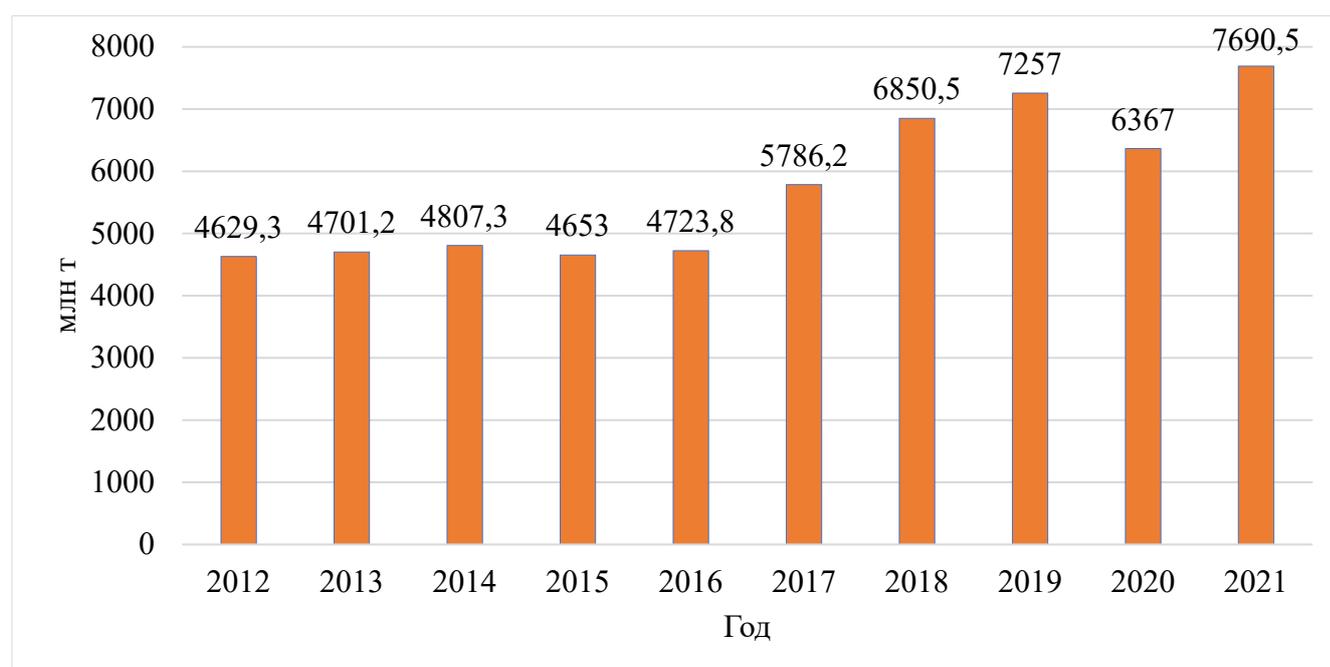


Рисунок 1.1 – Динамика образования отходов при добыче полезных ископаемых в Российской Федерации с 2012 по 2021 гг, млн т

Анализ представленной диаграммы динамики образования отходов позволяет утверждать, что в будущем количество ежегодно размещаемых в хранилища отходов будет сохраняться на прежнем высоком уровне или монотонно возрастать. Данные обстоятельства свидетельствуют о потребности горного производства в качественном обеспечении возведения и эксплуатации хранилищ отходов обогащения твердых полезных ископаемых, обеспечивающих высокий уровень безопасности формируемых техногенных массивов с учетом современных горно-геологических условий ведения горных работ и их темпе.

Вопросам обеспечения экологической безопасности при возведении техногенных массивов, технологиям формирования хранилищ отходов добычи и обогащения твердых полезных ископаемых, управлению состоянием массивов и обеспечению устойчивости откосов, инженерно-геологическому изучению техногенных массивов, оценке экологического риска при изменении состояния природно-техногенных систем, разработке методических основ мониторинга безопасности откосных горнотехнических сооружений посвящены работы Г.К. Бондарика, А.Д. Васильевой, А.М. Гальперина, В.Д. Горлова, Р.Э. Дашко, В.А. Еременко, Ю.К. Зарецкого, В.Г. Зотеева, Ю.А. Израэля, Н.А. Калашника, Ю.В. Кириченко, А.В. Киянца, В.С. Круподерова, О.Ю. Крячко, Н.А. Кутеповой, Ю.И. Кутепова, А.Г. Лутовинова, Н.Н. Маслова, В.А. Мироненко, В.В. Мосейкина, П.Н. Панюкова, М.Е. Певзнера, В.В. Ржевского, Е.В. Сергиной, К.Н. Трубецкого, В.С. Федотенко, В. Фёрстера, Г.Л. Фисенко, В.В. Ческидова, А.Д. Шерстюкова, Х.Ю. Шефа, М.В. Щёкиной, И.М. Ялтанца, Л.А. Ярг и других, а также работы зарубежных авторов F.G. Bell, A.W. Bishop, D.W. Carvalho, M.P. Davies, W. Fellenius, D.G. Fredlund, K.A. Hudson-Edwards, N.R. Morgenstern, E.E. Spencer, H. Klapperich, D. Kossoff, R. Pastork, E. Robinsky, S.K. Sarma, D. Shields, N. Tamaskovics, H. Tscheschlok, S.G. Vick.

Основной объем отходов производства и потребления в целом на территории РФ составляют отходы V класса опасности. При этом количество обезвреженных и утилизированных отходов добычи и переработки полезных ископаемых в 2021 году составило 3510,6 млн т или 45,6 % – меньше половины от суммарного объема отходов, образовавшихся за тот же год [7]. Большинство отходов горного производства в России либо захоранивается (изолируется в связи с невозможностью дальнейшей утилизации в специальных хранилищах для предотвращения попадания вредных веществ в атмосферу и гидросферу), либо временно складировается. Согласно Федеральному закону № 89-ФЗ от 24.06.1998 «Об отходах производства и потребления» [19] под хранением отходов подразумевается их размещение в специализированных объектах сроком более 11 месяцев для дальнейшей утилизации, обезвреживания или захоронения; под термином «Утилизация отходов» понимают повторное использование отходов для производства товарной продукции.

Вне зависимости от класса опасности все отходы в той или иной степени негативно влияют на состояние окружающей среды и здоровье живых организмов. Повторное использование отходов промышленного производства, их своевременное размещение и обезвреживание, в особенности отходов I и II классов, является основой рационального природопользования. В связи с этим регулятором при обращении с отходами выступает государство, обеспечивая экологически безопасное производство, развитие и рост экономики, снижение негативного влияния производства на все внутренние и внешние геосферы Земли.

Закон № 89-ФЗ и приказ Министерства природных ресурсов РФ № 536 от 04.12.2014 «Об утверждении Критериев отнесения отходов к I-V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду» регламентируют порядок обращения с отходами производства и потребления [19, 20]. В целом, отходы добычи, обогащения и переработки твердых полезных ископаемых (отходы горного производства) образуются по схеме, обобщенно представленной на рисунке 1.2 [21, 22].

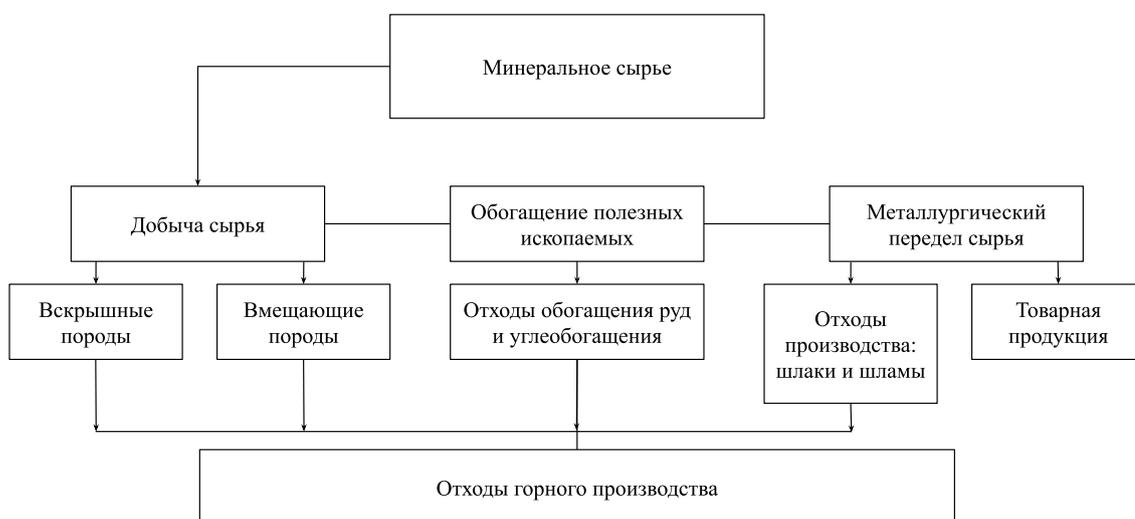


Рисунок 1.2 – Обобщенная схема образования отходов горного производства

Отходы горного производства складировываются в хранилищах – инженерных сооружениях, возводимых в процессе добычи и переработки полезных ископаемых планомерным складированием вскрышных пород или отходов обогащения. В результате образуются техногенные массивы – особые искусственно сформированные геологические тела, сложенные пустыми горными породами, отходами обогащения твердых полезных ископаемых или другими материалами антропогенного генезиса, отличающиеся по составу и имеющие различные формы, геометрические параметры и свойства [23, 24]. Проектирование, строительство и рекультивация техногенных массивов базируется на принципах рационального природопользования и экономической целесообразности, в соответствии с которыми формирование, эксплуатация и ликвидация хранилища отходов горного производства должны обеспечивать максимальную технико-экономическую эффективность при условии минимального негативного воздействия на естественную окружающую среду и минимизации нарушения экологической обстановки региона [25-27].

Существует несколько схем складирования, утилизации и захоронения отходов производства. Однако, отходы, образующиеся в колоссальных объемах в результате работы

горно-обогатительных предприятий, как правило размещаются на земной поверхности по двум схемам: складирование без возведения специальных ограждающих сооружений и складирование в специальных накопителях с формированием защитных сооружений – оградительных дамб.

Формирование техногенных массивов горно-обогатительных производств происходит по схеме [28], приведенной на рисунке 1.3. Данная схема отображает этапы жизненного цикла техногенных массивов от начала процесса добычи и переработки полезных ископаемых до момента формирования хранилищ различного вида и их дальнейшего использования.



Рисунок 1.3 – Принципиальная схема формирования техногенных массивов на предприятиях горно-обогатительного комплекса

Направленное формирование хранилищ отходов добычи и обогащения твердых полезных ископаемых производится по двум технологиям: сухое складирование и складирование с использованием гидромеханизированных технологий для гидравлического транспортирования пород или отходов обогащения полезных ископаемых. Поэтому также отметим принятую в Российской Федерации классификацию техногенных массивов, представленную на рисунке 1.4 [29]. Выделяются три основные группы: техногенные наносы, насыпные техногенные массивы и намывные техногенные массивы.



Рисунок 1.4 – Классификация техногенных массивов по способу формирования

Техногенными наносами называют массивы, образующиеся в результате хозяйственной деятельности человека, имеющие сравнительно малые мощности и простирающиеся на значительные по площади территории. К массивам данного класса можно отнести различные пыли техногенного происхождения и выбросы промышленных предприятий; техногенные массы, представленные донными отложениями (подводные свалки, стоки промышленных и коммунально-бытовых предприятий, поверхностные и подземные стоки загрязненных территорий) и искусственными грунтами или почвами (рекультивированные территории горнодобывающих регионов, территории городов, городских агломераций и территорий сельскохозяйственного освоения).

В свою очередь насыпные техногенные массивы представлены хранилищами отходов горного производства, полученными в результате вскрытия месторождений полезных ископаемых без использования средств гидромеханизации и их дальнейшего транспортирования к месту складирования; свалками твердых бытовых отходов и промышленных отходов различного происхождения. К намывным массивам относят хранилища дисперсных материалов различной крупности и генезиса, а также жидких отходов обогащения руд или их промывки, укладываемых средствами гидромеханизации; хранилища пород вскрыши, образующихся при гидровскрышных работах; хранилища золошлаковых отходов, образующихся при сжигании твердого угольного топлива в энергетической отрасли, а также другие различные хранилища жидких отходов.

Образование техногенных наносов скорее можно отнести к стихийному процессу или побочному процессу деятельности человека, не имеющему своей целью возведение специальных приемников отходов горного производства. В связи с этим в дальнейшем под процессом формирования техногенного массива будет подразумеваться только отсыпка или намыв материалов различного генезиса для их целенаправленного накопления в специализированных емкостях. Каждый из указанных способов имеет как свои преимущества, так и недостатки, которые необходимо рассмотреть более подробно. При этом требования к эксплуатации данных сооружений универсальны и в целом сводятся к обеспечению устойчивости откосов, снижению уровня пыления, минимизации инфильтрации загрязненных стоков в подземные водоносные горизонты. Несмотря на несколько различный характер воздействия отвалов и намывных массивов, в целом оба типа техногенных массивов вносят колоссальный вклад в интегральную оценку техногенной нагрузки на окружающую среду.

Все виды техногенных массивов сложены техногенными грунтами, которыми, согласно определению [30], называются искусственные насыпные, намывные или измененные на месте грунты, образовавшиеся в результате горнотехнической, инженерно-строительной, сельскохозяйственной и других видов хозяйственной и промышленной деятельности человека. При этом грунтами в широком смысле называются многокомпонентные динамично изменяющиеся системы, состоящие из твердых, жидких и газообразных компонентов, а также макро- и микроорганизмов. В соответствии с ГОСТ 25100-2020 [31], грунт – это любая горная порода, почва, осадок и техногенные минеральные образования, рассматриваемые как многокомпонентные динамичные системы и часть геологической среды, изучаемые в связи с инженерно-хозяйственной деятельностью. В отличие от природных (естественных) грунтов техногенные грунты характеризуются:

- измененными физико-механическими и химическими свойствами в результате происходящих в них процессах консолидации, уплотнения и упрочнения;
- измененным гранулометрическим составом в результате вымывания тонкодисперсных частиц;
- изменчивостью и анизотропией свойств в результате фракционирования частиц по крупности при намыве;
- наличием значительных количеств полезных элементов (черных, цветных и благородных металлов, редкоземельных элементов), что позволяет рассматривать хранилища, сложенные техногенными грунтами, новыми месторождениями полезных ископаемых.

Намывные техногенные массивы формируются посредством использования гидравлических сил воды для транспортирования материалов различной крупности:

тонкозернистых глинистых (пелитовых) пород, мелкозернистых (алевролитовых) пород, а также пород средне- и грубообломочных (псаммитовых и псефитовых) [2, 5, 32-37]. В результате применения гидромеханизированных способов вскрытия месторождений и складирования гидровскрыши, золошлаковых отходов и хвостов формируются гидроотвалы, хвостохранилища и намывные техногенные массивы в целом. Гидромеханизированная выемка и складирование пород или отходов обеспечивает экономное расходование водных ресурсов, особенно при освоении обводненных месторождений, так как в этом случае уменьшается объем дренажных работ и использования дренажных вод для нужд гидромеханизации [2, 35, 38-43]. Намывные горнотехнические сооружения представляют наибольшую опасность с экологической точки зрения, так как их формирование значительно загрязняет воздушный и водный бассейны. Также снижение устойчивости ограждающих дамб или переход массива в предельное состояние может привести к значительным социальным последствиям, уничтожению инфраструктуры вследствие затопления прилегающих территорий, заилению плодородных почв и дополнительному загрязнению подземных вод, человеческим жертвам [15, 16, 35, 44-50]. На рисунке 1.5 показана принципиальная схема возведения намывного техногенного массива хранилища отходов обогащения руд.

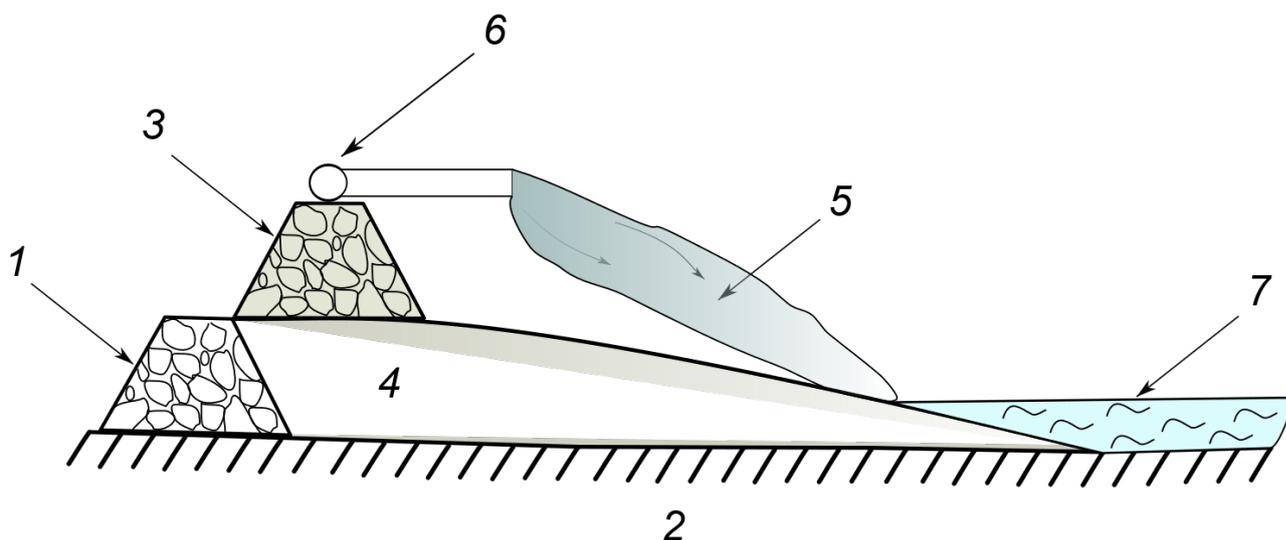


Рисунок 1.5 – Схематичное изображение формирования намывного техногенного массива

1 – первичная дамба обвалования; 2 – естественное основание сооружения;

3 – дамба вторичного обвалования; 4 – намывные хвосты (пляж); 5 – пульпа;

6 – распределительный пульпопровод; 7 – прудок-отстойник

В целом, формирующаяся емкость с отходами обогащения требует устройства защитных ограждающих дамб, препятствующих перемещению накопленных хвостов. При этом различают первичные дамбы обвалования 1, которые устраиваются на естественном основании 2, и дамбы

вторичного обвалования 3, возводимые на техногенных массах 4 в связи с необходимостью наращивания ограждающей дамбы. Пульпа 5 – смесь взвешенных в жидкости твердых частиц хвостов – подается по пульпопроводу 6, устанавливаемому на гребне дамбы.

Стоит также отметить, что выделяют 3 типа хвостохранилищ, отличающихся методом возведения защитной ограждающей дамбы (рисунок 1.6) [51, 52]. Цифрами на рисунке обозначен порядок возведения дамб в процессе наращивания высоты хранилища. Различают способ возведения дамб в сторону верхового откоса (Upstream), в сторону низового откоса (Downstream) и центральное возведение дамб (Centerline).

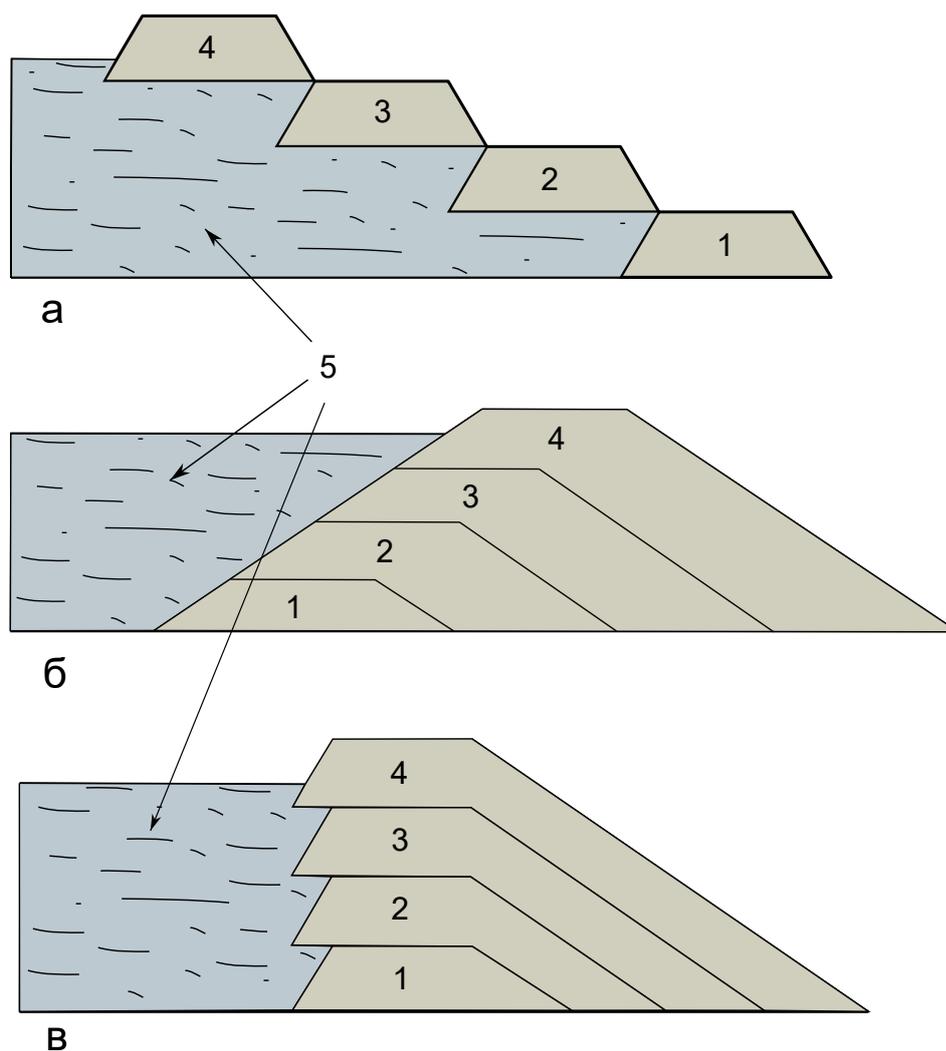


Рисунок 1.6 – Классификация хвостохранилищ по способу возведения дамб

а – возведение дамбы в сторону верхового откоса;

б – возведение дамбы в сторону низового откоса; в – центральное возведение дамбы

1 – первичная дамба обвалования; 2, 3, 4 – последующие дамбы обвалования;

5 – отходы обогащения

Явными преимуществами гидромеханизированных способов транспортирования и складирования вскрышных пород и отходов обогащения намывом в сравнении с другими способами вскрытия месторождений и отвалообразования являются высокая производительность, низкие капитальные затраты, менее высокая себестоимость операций, возможность автоматизации процессов гидротранспортирования, простота и надежность используемого оборудования. Однако, намывные горнотехнические сооружения концентрируют значительные объемы техногенных отложений, находящихся в водонасыщенном состоянии. Намывные техногенные массивы, время формирования и жизни которых может составлять десятилетия, как правило имеют слабую несущую способность своих оснований и низкий коэффициент запаса устойчивости (η или $K_{уст}$). Даже после окончания горных работ требуется значительное время для достижения намывным массивом требуемых свойств, при которых его дальнейшее использование или рекультивация становится возможным. Это связано с процессами уплотнения и консолидации намываемых техногенных масс, а также с процессом фильтрации воды через отложения, составляющие тело намывного техногенного массива [42, 53-58].

Исследования отложений намывных массивов показали, что на начальном этапе их формирования технологии обогащения не позволяли производить тонкое измельчение руд, в результате нижние слои массивов сложены более крупными хвостами обогащения, что предопределило ускоренный процесс фильтрационной консолидации всего рассматриваемого массива. Все сказанное выше позволяет сделать однозначный вывод, что увеличение скорости фильтрации воды через тело массива или внедрение дренажных элементов, отличающихся повышенным коэффициентом фильтрации, ускоряет процессы уплотнения и консолидации намывных пород, что позволяет подготавливать намывные техногенные массивы к дальнейшему использованию в более короткие сроки и повысить физико-механические свойства пород, а также повысить устойчивость откосов [40, 41, 59-72].

Проведенный анализ теории и практики гидроотвалообразования позволяет сформулировать основные требования к возведению и эксплуатации намывных горнотехнических сооружений для достижения высокого природоохранного, экологического и экономического эффекта. К основным аспектам данной тематики можно отнести:

1. Рациональное использование территорий за счет объединения гидроотвалов и хвостохранилищ в единый комплекс сооружений и возможность использования данных территорий для других хозяйственных целей.

2. Геомеханическое обоснование мероприятий по интенсификации процессов консолидации намывных масс, повышению несущей способности намывных массивов и увеличению устойчивости откосов.

3. Внедрение инновационных технологий формирования намывных техногенных массивов для повышения вместимости хранилищ отходов горного производства, снижения землеемкости отвальных работ, ускорения рекультивационных мероприятий.

4. Разработка водоохранных мероприятий за счет повышения эффективности водооборота при намывных работах и повторного полного использования осветленных вод.

5. Внедрение комплексных систем мониторинга состояния намывных горнотехнических сооружений, позволяющих осуществлять оперативный контроль устойчивости откосов.

Далее рассмотрим преимущества и недостатки возведения техногенных массивов насыпным способом. В горной промышленности по данной технологии, как правило, производится укладка вскрышных и пустых пород, отходов углеобогащения, зол и пылей. Наиболее распространенный вид насыпных техногенных массивов в отрасли – отвалы, которые обладают следующими специфическими особенностями [10, 73]:

- структурными и текстурными нарушениями, обуславливающими пониженную прочность техногенных массивов в сравнении с естественными откосами;
- фракционированием пород отвала и самовыполаживанием откосов;
- существенным изменением физико-механических характеристик отвальных пород со временем;
- возникновением и развитием в породах отвалов и их оснований порового давления вследствие их увлажнения, что приводит к активизации негативных горно-геологических процессов.

Как и намывные техногенные массивы, отвалы пород могут являться источниками загрязнения атмосферы, гидросферы и биосферы. Например, угольные отвалы склоны к самовозгоранию вследствие свободного доступа атмосферного воздуха к мельчайшим угольным частицам, развития в теле отвала окислительных процессов, приводящих к выделению теплоты и способствующих саморазогреванию пород. Вклад в ускорение процесса самовоспламенения вносит присутствие определенных минеральных примесей (серосодержащих), рост температуры окружающей среды, а также влага, особенно в случае стадийности периодов увлажнения и высыхания пород отвала. Горение угольных отвалов способствует активизации лесных пожаров с сопутствующей потерей ценных территорий, загрязнению рек оседающими пылеватыми частицами (сажа, зола), служит мощнейшим источником углекислого газа. Содержание вредных микроэлементов в золе угля, особенно легковозгоняемых при повышенной температуре тяжелых металлов и полуметаллов (свинец, кадмий, ртуть, висмут, мышьяк и другие), может стать причиной серьезного вреда для здоровья людей, проживающих в непосредственной близости от отвалов, отравления водных объектов и растительности [74-83]. В целом насыпным техногенным

массивам любого происхождения присуще более активное пыление и загрязнение почвенного покрова продуктами ветровой эрозии, более вероятны проседания поверхности под отвалом и в районе ведения работ в случае ошибки при выборе площадки для размещения отвала [84-91].

Также отвалообразование отсыпкой пород является более дорогостоящим по сравнению с намывным способом вследствие низкой производительности процесса, использования экскаваторной, автомобильной и железнодорожной техники для перемещения породных масс. Однако к существенным плюсам насыпных техногенных массивов можно отнести их большую устойчивость и высокий коэффициент запаса устойчивости откосов из-за отсутствия водонасыщенных пород в теле массива. Ввиду отсутствия избыточного количества воды насыпные массивы обладают большей вместимостью вследствие возможности устройства больших генеральных углов откосов, рекультивация отвалов производится в более короткие сроки.

Суммируя все вышесказанное можно сделать вывод о том, что каждая из технологий формирования техногенных массивов и, в частности, хранилищ отходов добычи и обогащения твердых полезных ископаемых, имеет как свои преимущества, так и очевидные недостатки. В связи с этим научный и практический интерес представляют технологии возведения хранилищ отходов горного производства, в которых максимально учтены все положительные характеристики каждого из способов складирования отходов и минимизированы их негативные составляющие. С этой точки зрения комбинированная технология возведения техногенных массивов, в которой транспортирование отходов обогащения твердых полезных ископаемых осуществляется гидромеханизированным способом, а складирование материалов совершается отсыпкой, представляется наиболее рациональной, экономически целесообразной и экологически безопасной.

1.2 Анализ аварийных ситуаций, связанных с деформационными явлениями техногенных откосных сооружений

Несмотря на постоянное повышение качества процесса возведения хранилищ отходов горного производства и роста эффективности контроля их состояния не удалось достичь полного предотвращения аварийных ситуаций при формировании и эксплуатации техногенных массивов. Разрушения ограждающих дамб хранилищ отходов горного производства происходят по крайней мере с момента начала их формирования, однако с уверенностью можно сказать, что масштаб последствий техногенных катастроф сегодня стал неизмеримо больше в связи с ростом объемов складированных отходов, а также их повышенной опасностью. Наиболее распространенной

причиной аварий намывных техногенных массивов является частичное или полное разрушение ограждающих дамб [92-99].

В последние годы наиболее крупные аварии на хвостохранилищах происходили в Бразилии. 25 января 2019 г. произошло разрушение ограждающей дамбы № 1 на предприятии Córrego de Feijão mine (Брумадинью, Бразилия), приведшее к высвобождению практически всего объема накопленных отходов (более 12 млн м³ хвостов обогащения железных руд) и ставшее причиной гибели как минимум 300 человек. Негативные экологические последствия разрушения затронули водный бассейн и почвенный покров, привели к сильному загрязнению реки взвешенными твердыми частицами и повышенной смертности живых организмов, причем показатели качества воды ухудшились через несколько месяцев по сравнению с начальным периодом после катастрофы [100-103]. Также были разрушены многочисленные объекты инфраструктуры и жилые дома. Данные обстоятельства говорят о долгосрочных последствиях аварии, ликвидировать которые удастся не сразу.

Разрушенная дамба высотой 86 м была возведена способом «в сторону верхового откоса», при этом работы по заполнению хранилища были остановлены в июле 2016 года. Единого мнения о причинах катастрофы нет, но многочисленные исследователи утверждают, что отсутствие необходимого мониторинга устойчивости дамбы внесло решающий вклад. Основными факторами разрушения стали снижение фильтрационных свойств техногенных отложений из-за недостатков дренажной системы, развитие фильтрационной эрозии и последующее разжижение отложений вследствие обводнения массива, что привело массив в предельное состояние. Спусковым механизмом аварии явились интенсивные осадки в конце 2018 года и воздействие вибраций при бурении на массиве мониторинговых скважин, послужившие причиной перехода хвостовых отложений в состояние повышенной текучести [104-107]. Последствия разрушения хранилища отходов обогащения железных руд в г. Брумадинью представлены на рисунке 1.7 [108].



Рисунок 1.7 – Последствия аварии на хвостохранилище в г. Брумадинью (Бразилия)

Другая крупная авария в Бразилии произошла 5 ноября 2015 года на Samarco Mineração S.A. (г. Мариана) и также связана с разрушением хранилища отходов обогащения железных руд. По объему утечки отходов (от 43,7 млн м³ до 60 млн м³) данный инцидент является крупнейшим в истории Бразилии. Поток жидких хвостов, преодолев расстояние 620 км, достиг Атлантического океана, вызвав обширное загрязнение его вод и другие серьезные экологические и экономические последствия для страны. Оцененный ущерб составил 6,7 млрд долл, а на полную ликвидацию последствий (очистка местности и загрязненных рек) уйдет больше 100 лет. Причины катастрофы во многом схожи с аварией в Брумадинью и, в том числе, связаны с заполнением хранилища сверх максимальной вместимости. Однако снижение вязкости хвостов было вызвано двумя небольшими землетрясениями малой магнитуды, произошедшими в тот же день менее чем за два часа до аварии [109-114].

Знаковой аварией, произошедшей в Центральной Европе в октябре 2010 г., является разрушение дамбы хранилища красных шламов на алюминиевом заводе, принадлежащем MAI Magyar Alumínium (г. Айка, Венгрия). Отходы производства алюминия являются высокоопасными и токсичными, поэтому данное происшествие по праву считается крупнейшей экологической катастрофой, когда-либо происходившей в Европе [115-117]. Прорыв дамбы

привел к выпуску более 1 млн м³ высокотоксичных отходов, в результате чего волна шламов высотой 1,5 м затопила нижележащие населенные пункты и вызвала экологическое бедствие на территории 40 км². Шлам вылился в реку Дунай и создал угрозу загрязнения Черного моря. Погибли 10 человек, химические ожоги красным шламом получили более 100 человек. Причиной разлива красных шламов назвали разрушение массива в точке фильтрации вод в результате формирования избыточного порового давления [118-121]. На рисунке 1.8 представлен результат разрушения защитной ограждающей дамбы отходов алюминиевого производства в Венгрии [122].



Рисунок 1.8 – Прорыв хранилища красных шламов в г. Айка (Венгрия)

В Российской Федерации за последние 25 лет также происходили масштабные чрезвычайные ситуации техногенного характера, связанные с авариями в результате деформаций массивов хранилищ отходов горного производства и их разрушением. Авария хранилища отходов добычи золота 29 августа 2009 года Карамкенского горно-обогатительного комбината (ГОК) в г. Карамкен вызвало мощный грязевой поток, разрушившего населенные пункты и ставшего причиной сильного загрязнения грунтовых вод взвешенными частицами и токсичными элементами, приведшего к человеческим жертвам. Суммарный экономический вред был оценен в 150 млн рублей, объем излившихся хвостов составил от 280 до 1200 тыс. м³. Специалисты, проводившие анализ причин происшествия, указывают на синергетический эффект

гидрогеологических, климатических, технологических и человеческого факторов при наступлении аварийной ситуации. Среди них можно выделить нахождение хранилища в условиях многолетней мерзлоты, активизация фильтрационных процессов, разжижение хвостов из-за работы тяжелой техники на гребне дамбы и дестабилизации многолетнемерзлых грунтов, отсутствие технического обслуживания объекта и средств мониторинга его состояния [123].

Переполнение трехсекционного хвостохранилища ОАО «Качканарский ГОК «Ванадий» в ноябре 1999 года стало причиной прорыва ограждающей дамбы с выносом, по разным оценкам, от 5 до 20 млн м³ отходов обогащения. Авария произошла вследствие выхода из строя водосбросных сооружений, в результате чего образовалось несколько проранов между отсеками хвостохранилища шириной около 100 м и начался излив 5 млн м³ воды в Промежуточный отсек с последующим переливом через гребни дамб. Затоплению грязевыми потоками подверглись окрестности, были размыты дороги и разрушены мосты, нарушено электроснабжение. Ущерб оценен в несколько сотен миллионов рублей [124].

Стоит отметить аварии и критические ситуации, имевшие место в СССР. Так авария 1956 года на хвостохранилище Каджаранского медно-молибденового комбината (Армения) была вызвана недостаточной пропускной способностью коллектора, вызвавшего разрушение отсечной плотины и излив 600 тыс. м³ отходов обогащения. Наличие в основании намывного массива сильно сжимаемых грунтов вызвало в 1963 году активные просадки оснований хвостохранилища на Камыш-Бурунском железорудном комбинате. Аварии на объекте удалось избежать за счет сброса жидких хвостов в Керченский пролив, что в любом случае имело негативные экологические последствия. Произошедший в 1964 году значительный по объему оползень на гидроотвале Лебединского ГОКа стал следствием наличия таких условий, как слабые грунты основания и намывных дамб, просчет при наращивании высоты гидроотвала, что в результате привело к возрастанию гидростатического давления в теле массива. Прорыв дамбы гидроотвала «Балка Чуфичева» в 1981 году также был вызван возросшим более чем в 2 раза гидростатическим давлением. Отсутствие грамотных проектных решений, инструкций по эксплуатации массива, контроля соблюдения технологии ведения работ стало причиной разрушения в 1966 году части хвостохранилища в Хабаровском крае. Оттаивание замкнутых в тело дамбы линз льда способствовало активизации деформационных процессов вследствие отсутствия контроля фильтрационного режима эксплуатации массива [124-126].

Проанализировав аварии на намывных массивах, стоит обратить внимание и на причины деформаций отвальных массивов, так как их разрушение также зачастую вызвано гидрогеологическими факторами. Так в апреле 2015 года произошло сползание 27,5 млн м³ отвальных пород разреза «Заречный» (ОАО «СУЭК-Кузбасс»), вызвавшее уничтожение

прилегающей инфраструктуры, перекрытие водотоков и подтопление населенных пунктов с оценкой ущерба в 8 млрд рублей. Впоследствии специалистами было установлено наличие техногенного водоносного горизонта в теле отвала, послужившего фактором возникновения и развития оползневых процессов. Также в Кузбассе, оползень на отвале разреза «Виноградовский», содержащего более 90 млн м³ пород, был вызван обводнением тела массива, что стало причиной снижения устойчивости откосного сооружения. Неучтенные гидрогеологические факторы при обосновании параметров хранилища отходов стали причиной деформаций отвала «Южный» (разрез «Талдинский») в результате повышенного инфильтрационного питания, что также привело к формированию в теле массива техногенного водоносного горизонта и развития оползней, оплываний, фильтрационного выноса [127].

Одной из последних крупных аварий на горнотехническом сооружении, ставшей причиной гибели как минимум 126 человек, стало обрушение отвала в г. Хпакан (Мьянма), произошедшее 2 июля 2020 г на предприятии по добыче жадеита (нефрита) и вызвавшее образование потока грязи и воды высотой 6 м в результате схода техногенных отложений в озеро. Причиной разрушения хранилища отходов изначально назвали проливные дожди, однако исследования 2021 г не подтвердили данную версию, так как количество атмосферных осадков на территории ведения горных работ составило всего 80 % от среднегодовой нормы. Это позволило заключить, что массив даже при нормальных погодных условиях находился в предельном состоянии. Основным фактором аварии признали неправильную геометрию техногенного массива (крутые углы откосов) и фильтрацию воды через тело массива, что в сумме с низкими прочностными свойствами техногенных отложений привело к периодическим локальным оползням, эрозии откоса и в итоге к катастрофе [128]. Примечательно, что за период с 2015 по 2020 гг на данном объекте произошло еще 4 аварии, суммарно унесшие жизни 231 человека (из них 114 числятся пропавшими без вести) и все они были связаны с разрушениями хранилища отходов по схожим причинам [129].

Как было указано выше, причиной разрушений хранилищ отходов могут стать сейсмические явления, а именно землетрясения, что явилось причиной аварий на ряде намывных сооружений Южной Америки и Восточной Азии (Ujina, Pica, Tamarugal Province, Tarapacá Region, Chile (4 августа 2016 г); Amatista, Nazca, Peru (12 ноября 1996 г.); Veta de Agua No.1 и Cerro Negro No.4, Chile (3 марта 1985 г.); Mochikoshi No.1, Japan (14 января 1978 г.) и другие аварии в Чили, Перу и Японии). Данная причина аварий свойственна регионам, находящимся на границах тектонических плит. Несмотря на кажущуюся ведущую роль подземных толчков в развитии деформационных процессов в массиве, в подавляющем большинстве случаев фактором наступления аварийной ситуации стоит считать именно разжижение намывных масс в результате

воздействия колебаний [130-133]. Указанное обстоятельство должно приниматься во внимание с позиции воздействия вибраций и колебаний земной поверхности в процессе формирования и эксплуатации намывного техногенного массива, а также при его исследованиях, так как хвосты обогащения ряда твердых полезных являются тиксотропными жидкостями, то есть обладают способностью снижать свою вязкость в результате механического воздействия.

Анализ других крупных аварийных ситуаций на хранилищах отходов горного производства показал, что причины разрушения сооружений были во многом идентичны уже описанным выше. Среди исследованных инцидентов наиболее значимыми являлись:

- авария 28.03.2020 года на китайском предприятии Yichun Luming Mining Co., Ltd, утечка 2,53 млн м³ отходов;
- авария 04.08.2014 года на канадской Mount Polley mine (Imperial Metals Corp.), утечка 7,3 млн м³ хвостов;
- авария 01.08.2014 года на филиппинской Padcal mine (Philex Mining Corp.), утечка 20,6 млн м³ хвостов;
- авария 10.01.2007 года в г. Мирай, Бразилия (Mineração Rio Pomba Cataguases Ltda), утечка более 2 млн м³ красных шламов;
- авария 08.09.2000 года на шведской Aitik mine (Boliden Ltd.), утечка 2,5 млн м³ хвостов.

Менее масштабные аварии с прорывом жидких отходов обогащения в объеме до 500 тыс. м³ также в преобладающем большинстве случаев становились результатом нарушения устойчивости дамб и просадок оснований сооружений из-за гидрогеологических факторов, при этом за период с 1960 г. по 2021 г. проливные дожди стали причиной аварий различного масштаба в 30 случаях. Наиболее часто разрушениям были подвержены дамбы, намытые по технологии «в сторону верхового откоса», являющегося наиболее дешевым способом возведения массива.

Таким образом, проведенный анализ произошедших аварий на различных намывных объектах горнодобывающего комплекса свидетельствует, что основными причинами аварийных ситуаций являются нарушение технологии ведения намывных работ и отсутствие контроля состояния массива, ошибки при проектировании и обосновании параметров намывного сооружения, неправильный выбор материалов защитных ограждающих дамб, снижение устойчивости откосных сооружений, переполнение хранилища отходов, деформация дамб и оснований техногенных массивов, неисправность и разрушения водосборных систем, пониженные фильтрационные свойства техногенных отложений и материалов дамб и другие. Однако главным фактором развития аварийных ситуаций, связанных с деформациями, в подавляющем большинстве случаев становится наличие колоссального количества воды в теле техногенного массива. В результате техногенные отложения, слагающие массив, становятся

водонасыщенными, что является причиной формирования техногенного водоносного горизонта, образования избыточного порового давления и роста гидростатического давления в итоге приводящее к разрушению сооружения. Последствия разрушений хранилищ отходов горного производства носят региональный характер и катастрофичны, приводят к изливу в окружающую среду жидких отходов в объеме от сотен тысяч до десятков миллионов кубических метров, загрязнению десятков квадратных километров территорий за пределами района ведения горных работ, гибели сотен человек. Устранение последствий таких аварий требует многомиллионных вложений и значительных временных затрат.

1.3 Способы, технологии транспортирования и складирования обезвоженных отходов обогащения твердых полезных ископаемых

Большое количество техногенных аварий на объектах хвостового хозяйства в мире, произошедшее за короткое время, вынуждает реагировать на подобные инциденты с целью предотвращения будущих катастроф. Комиссии, созданные для расследования аварий, пришли к выводу, что сегодня для эффективного и безопасного формирования и эксплуатации хвостохранилищ необходимо активное внедрение в данную сферу наилучших доступных технологий (НДТ), при которых «приемлемый» уровень вероятности аварии недопустим. Например, комитет Европейского института по связям с общественностью (IEERP) в Канаде после разрушения хвостохранилища на Mount Polley сформулировал следующие основные требования к формированию хранилищ отходов твердых полезных ископаемых в соответствии с принципами НДТ [134-136]:

- устранение свободной воды (прудовой зоны) с поверхности хвостохранилища;
- обеспечение условий дренажа, при которых складированные хвосты не переходят в водонасыщенное состояние;
- повышение плотности укладки хвостов при их складировании в хранилища.

Несмотря на то, что в 2018 году всего лишь 5 % мировых отходов переработки рудного сырья складировалось с использованием технологий предварительного обезвоживания, к 2025 году эта доля вырастет до 13 % (согласно исследованию, проведенному компанией Metso:Outotec) [137]. Поэтому рассмотрим возможные альтернативные способы транспортирования и поверхностного складирования отходов обогащения твердых полезных ископаемых в хранилища, а именно:

- хвостов, стущенных до высокой плотности пульпы (или мокрое складирование);
- хвостов пастообразных (полусухое складирование);

- хвостов глубоко обезвоженных – с остаточной весовой влажностью не более 15 % (сухое складирование).

Технологии сгущения хвостовых пульп известны с 70-х годов XX-го века. Впервые технология укладки сгущенных хвостов была применена в 1973 г. на медно-цинковом горнодобывающем предприятии Kidd Creek в Канаде. В дальнейшем на нескольких предприятиях Западной Австралии были успешно реализованы проекты по сгущению отходов обогащения. В литературе описание размещения обезвоженных до 60 % твердого хвостов (здесь и далее указаны весовые проценты) впервые было сделано D. Shields в 1974 г., впоследствии концепция укладки сгущенных отходов обогащения была развита E. Robinsky в 1979 г. [138-140].

В целом процесс сгущения хвостов представляет собой механическое обезвоживание пульп с низким содержанием твердых частиц. Обычно это достигается использованием высокопроизводительных сгустителей высокой степени сжатия, фильтр-прессов, гидроциклонов или комбинации указанных установок. В результате сгущения повышается плотность пульпы и она начинает вести себя как высоковязкая жидкость, чем значительно отличается от рядовой пульпы с низким содержанием твердого. Это приводит к тому, что сгущенные отходы обогащения при выпуске и последующем растекании формируют поверхность с уклоном от 1–3 до 6 градусов [141, 142]. При выпуске сгущенных хвостов в хвостохранилище они формируют однородную (гомогенную) массу, не подверженную сегрегации частиц. Оставшаяся в хвостах жидкость отжимается и собирается в прудке-отстойнике у основания хвостохранилища. Общий вид хранилища сгущенных хвостов обогащения приведен на рисунке 1.9 [139].

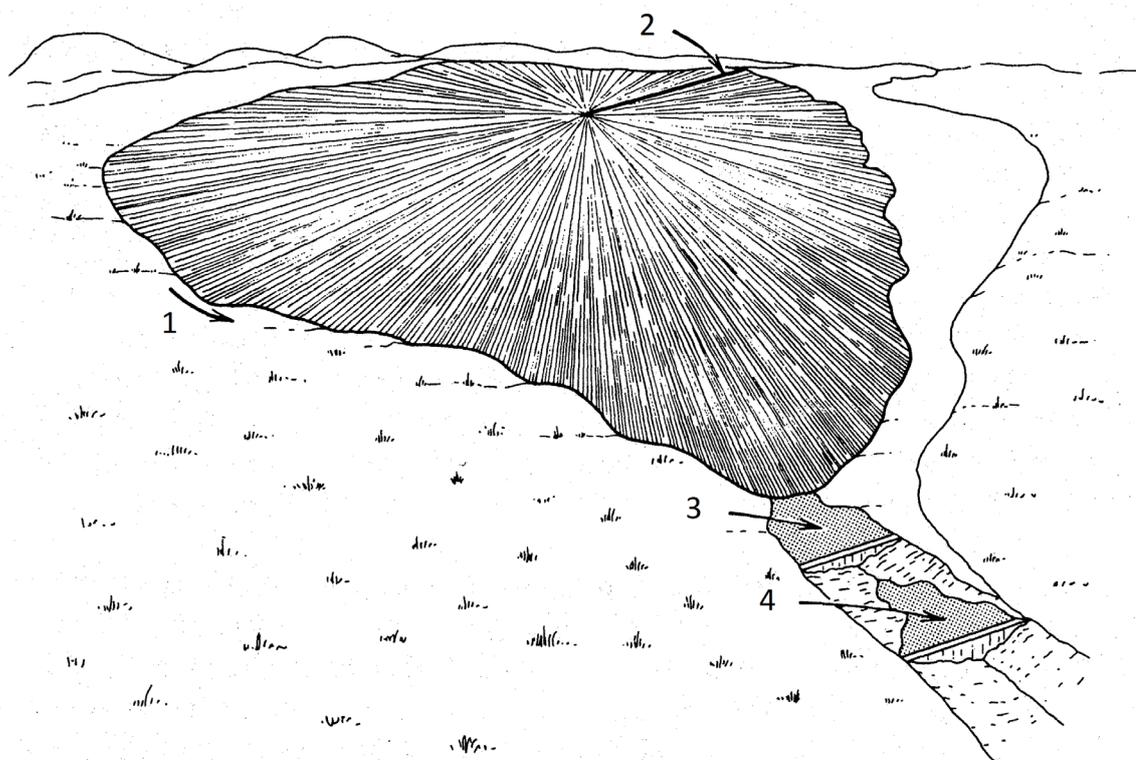


Рисунок 1.9 – Схематичное изображение складирования сгущенных хвостов обогащения
твердых полезных ископаемых

1 – направление поверхностного стока; 2 – выпуск сгущенных хвостов;
3 – прудок-отстойник; 4 – очищенная вода

Стоит отличать сгущенные хвосты от пастообразных, так как последние имеют более высокую степень обезвоживания и для их перекачивания в хранилища зачастую требуется более мощное оборудование. За рубежом принято, что сгущенными называют хвосты с содержанием твердого в пульпе от 50 до 70 % и их транспортирование возможно с помощью центробежных насосов. Сразу следует указать, что в иностранной литературе рядовой пульпой называются пульпы с содержанием твердого от 25 до 45 %, в то время как в российской литературе пульпы с плотностью в данном диапазоне могут рассматриваться в качестве сгущенных. Общий вид пульп, сгущенных до пастообразного состояния приведен на рисунке 1.10.



Рисунок 1.10 – Общий вид хвостовых пульп, сгущенных до состояния пасты

Пастообразными хвостами можно назвать отходы, обезвоженные до такой степени, что они не имеют критической скорости потока при транспортировании, не сегрегируют при укладке, содержание в них твердого находится в диапазоне от 70 до 85 %, а количество отжимаемой воды не превышает 10 % от общего объема [143, 144]. Для перекачки паст используются мощные объемные насосы. При складировании пастообразные хвосты формируют конус с углами откоса от 3 до 10 градусов [141]. Однако, для большей эффективности процесса сгущения и отделения воды при получении паст используют различные флокулянты и коагулянты, которые также влияют на поведение пасты во время перекачивания и выпуска в хвостохранилище. Пастовое сгущение возможно для материалов с высокой долей глинистых, крупных и мелких пылеватых, а также тонких и мелких песчаных частиц (не менее трети частиц размером до 20 мкм), а повышенная вязкость пастообразных хвостов существенно ограничивает максимальное расстояние их транспортирования [145].

В общем случае транспортирование в хвостохранилища сгущенных и пастообразных отходов осуществляется гидравлическим способом. Для этого используются грязевые, шламовые, центробежные, поршневые, мембрано-поршневые и бустерные насосы. Однако на некоторых предприятиях [146] используют автотранспорт, что является более дорогим способом по сравнению с гидротранспортом. Правильный расчет гидравлических характеристик гидротранспортирования сгущенных и пастообразных хвостов занимает существенное место при проектировании комплексов сгущения, что представляет дополнительные определенные трудности.

В настоящее время на мировом рынке хвостовые и пастовые сгустители представлены такими крупными производителями, как «WesTech Inc.» (США), «Metso:Outotec» (Финляндия) и

«FLSmidth» (Дания) (в частности на АО «Карельский окатыш») установлены сгустители Supaflo от Outotec). В целом внедрение комплексов сгущения в производственный процесс широко распространено на горнодобывающих предприятиях Южной Америки (Чили и Перу), Северной Америки (Канада и США) и в Австралии. Также комплексы сгущения установлены или находятся на стадии проектирования в Греции, Финляндии, Иране, Танзании.

В России до конца 2000-х годов не существовало проектов по глубокому сгущению и обезвоживанию пульпы. Начало было положено компанией WesTech Inc., которая в 2010 г. предложила проект пастового сгущения для ЗАО «Полюс», осуществив поставку первого в РФ оборудования, которое и сегодня является крупнейшим сгустителем на территории СНГ. Компанией Outotec разработан и внедрен проект по пастовому сгущению на Учалинском ГОКе, ОАО «Уралмеханобр» реализует проект пастового сгущения на Гайском ГОКе [147-149]. Если в мире в целом подобные проекты исчисляются десятками, то в Российской Федерации известно всего 4 примера внедрения технологий сгущения хвостовых пульп. Но уже сейчас можно говорить о росте интереса российских компаний к данным технологиям, в частности таких как «АЛРОСА», «Полюсзолото», «Полиметалл», «РМК».

Складирование на земной поверхности сгущенных и пастообразных отходов мало отличается от традиционных способов формирования хвостохранилища. Главное отличие заключается в технологической цепочке, в которую добавляется дополнительное оборудование – сгуститель, а также в применении насосов другого типа, о чем было сказано ранее. Укладка сгущенных хвостов и паст зачастую осуществляется центральным выпуском из распределительной башни с образованием конуса (рисунок 1.11), но также распространен традиционный линейный выпуск с наращиванием дамб (рисунок 1.12). На причины выбора способа складирования влияют характеристики грунтов оснований, наличие необходимого объема материалов для наращивания дамб, ограниченность территории, сроки строительства.

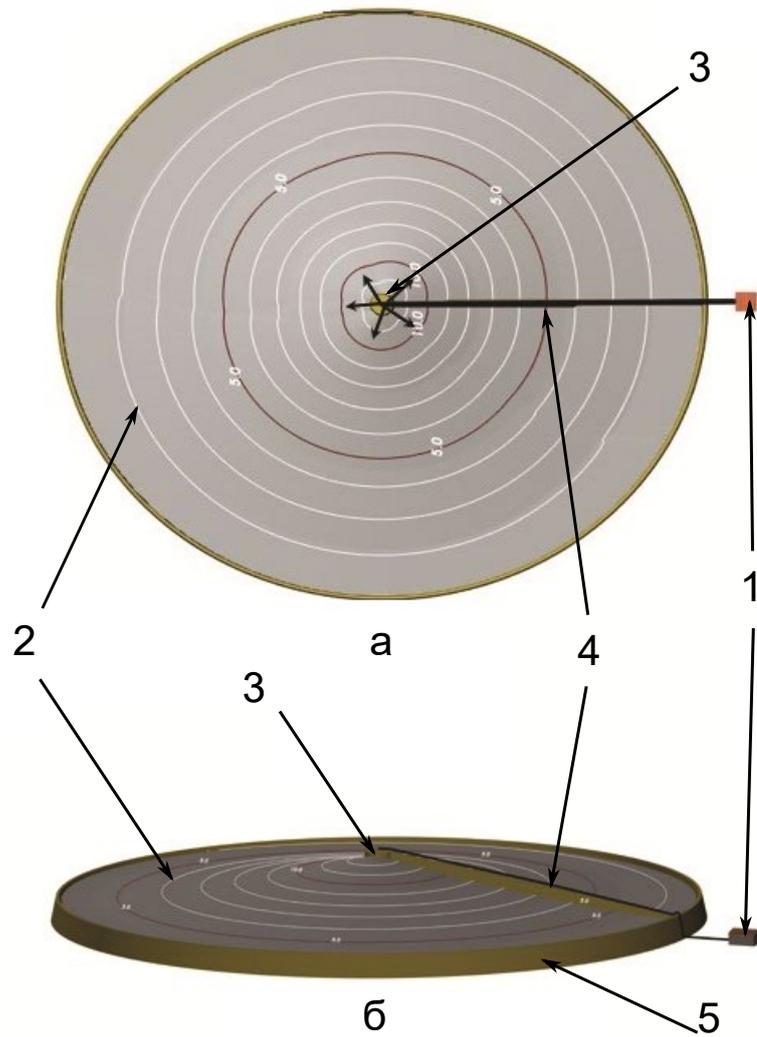


Рисунок 1.11 – Схема складирования сгущенных и пастообразных отходов с центральным выпуском пульпы

а – вид хранилища в плане; б – изометрический вид хранилища

1 – насосная станция; 2 – хвосты; 3 – распределительная башня; 4 – пульпопровод;

5 – ограждающая дамба

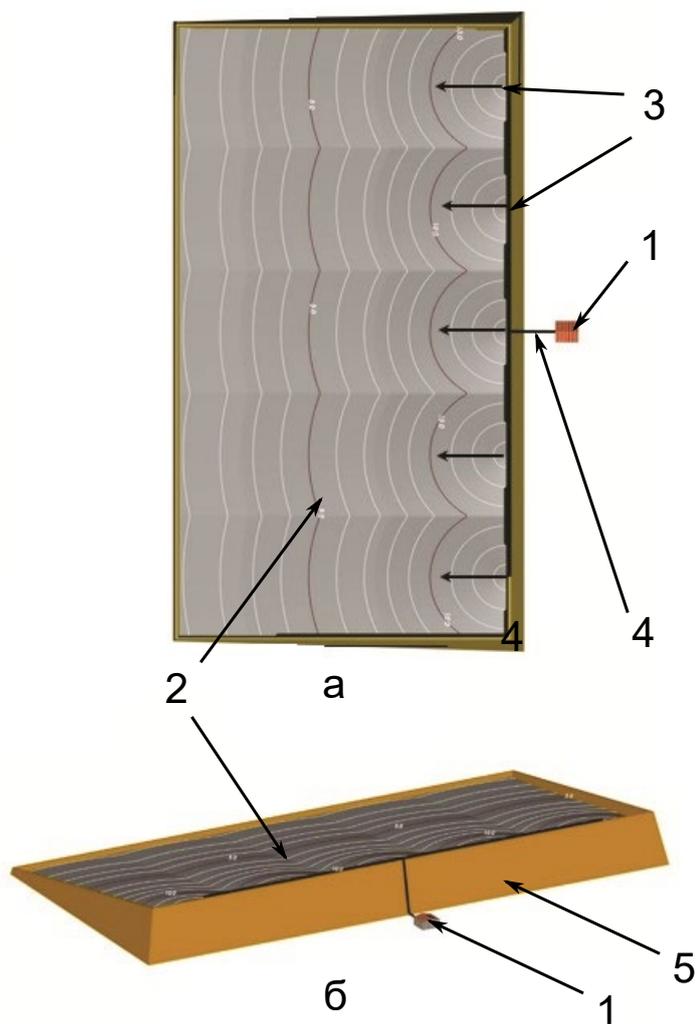


Рисунок 1.12 – Схема складирования сгущенных и пастообразных отходов с линейным выпуском пульпы

а – вид хранилища в плане; б – изометрический вид хранилища

1 – насосная станция; 2 – хвосты; 3 – выпуск пульпы; 4 – пульпопровод;

5 – ограждающая дамба

В итоге, к преимуществам внедрения складирования сгущенных и пастообразных отходов однозначно стоит отнести следующее:

- отсутствует необходимость возведения головной дамбы хвостохранилища, в ряде случаев достаточно сооружения ограждающих дамб – снижение объема работ и количества материалов;
- более низкий риск или полное исключение возможности разрушения хранилища по причине гидродинамических аварий вследствие снижения высоты дамб и величины гидростатического давления в массиве;

- снижение объема водопотерь в результате фильтрации и испарения и повышение объема использования оборотных вод, что актуально для регионов с засушливым климатом;
- повышение вместимости хвостохранилища в результате повышения плотности укладываемых хвостов и увеличения крутизны откоса дамбы, следовательно сокращение площади нарушаемых территорий;
- консолидация уложенных техногенных масс происходит в более короткие сроки, соответственно возможно начать рекультивацию хвостохранилища раньше.

Среди недостатков можно отметить следующее:

- более высокие эксплуатационные расходы, связанные как с затратами на транспортирование плотных пульп, так и на их обезвоживание;
- более высокие капитальные затраты для сооружения комплексов по сгущению;
- использование химических реактивов для достижения требуемых свойств пульпы;
- необходимость детального изучения водно-физических, физико-механических, химических и других характеристик обезвоживаемых материалов для эффективной перекачки пульп;
- зависимость способности к сгущению и максимальной степени обезвоживания от типа руд, состава и свойств хвостов.

В большей степени недостатки сгущения связаны с процессами обезвоживания и перекачки хвостов, трудозатратными гидравлическими расчетами, свойствами пульп. С точки зрения устойчивости массива и экологической безопасности формируемых хранилищ существенные недостатки складирования сгущенных и пастообразных хвостов отсутствуют. Также можно заключить, что на отечественных предприятиях под сгущением понимается увеличение плотности пульпы до значений, при которых содержание твердых частиц в получаемой «сгущенной» пульпе несколько выше, чем в пульпе рядовой. В иностранных компаниях принята строгая категоризация хвостов обогащения по содержанию твердого и применяемого оборудования для транспортирования отходов в хранилища.

Складирование глубоко обезвоженных («сухих») хвостов обогащения радикально отличается от технологий укладки сгущенных пульп и паст. Данные хвосты представляют собой материал, подвергшийся глубокому обезвоживанию на ленточных, дисковых и барабанных фильтрах, пресс-фильтрах и вакуумных фильтрах до содержания твердого 85 % и выше. «Сухие» хвосты являются конечным звеном так называемого Tailings Continuum, иллюстрирующего совокупность всех видов хвостов по влажности и отображающего принятую промышленностью терминологию (рисунок 1.13) [150, 151].

Согласно рисунку 1.13 глубоко обезвоженные хвосты или «кек» можно разделить на влажные, находящиеся в водонасыщенном состоянии, и собственно сухие, находящиеся в состоянии близком к водонасыщенному. Гидравлическое транспортирование таких хвостов невозможно из-за их очень низкой влажности, поэтому для доставки к хранилищу используют конвейерный или автомобильный транспорт [152-154]. Термин «сухие хвосты» не совсем корректен, так как после обезвоживания в них содержится остаточная влага, поэтому наиболее правильным будет термин «глубоко обезвоженные хвосты» или в рамках данной работы «глубоко обезвоженные отходы обогащения железистых кварцитов», «глубоко обезвоженные хвосты железистых кварцитов».

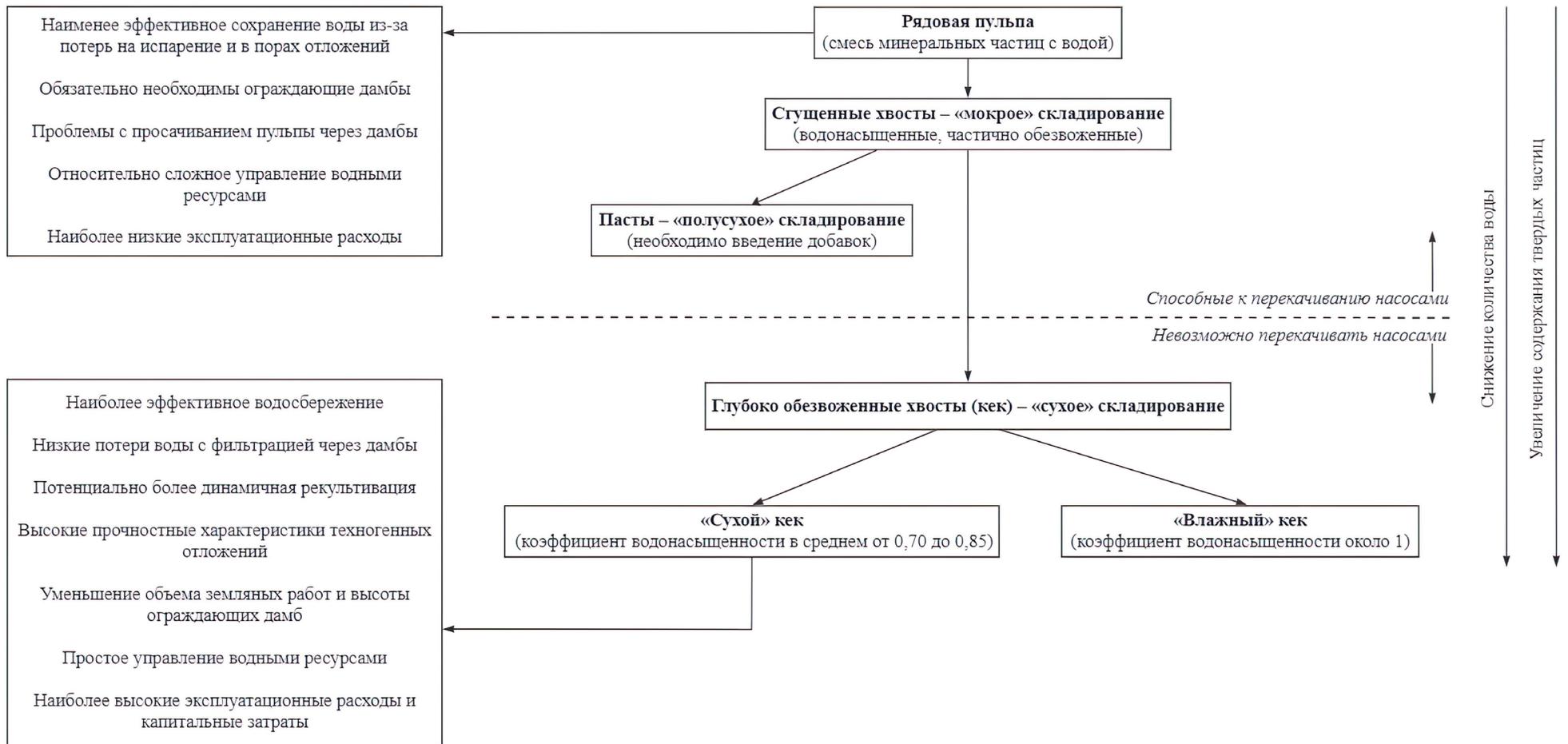


Рисунок 1.13 – Tailings Continuum

Как и в случае с пастовым сгущением, глубокому обезвоживанию традиционными широко распространенными способами можно подвергнуть не каждый материал. На это будет влиять как крупность частиц, так и содержание мелких глинистых составляющих, гипса или битумов [52, 150, 155, 156]. В таблице 1.1 приведена классификация отходов обогащения по содержанию твердых частиц и степени обезвоживания в соответствии с Tailings Continuum.

Таблица 1.1 – Классификация хвостов горно-обогатительных предприятий по содержанию твердых частиц и степени обезвоживания

<i>Характеристики</i>	<i>Вид хвостов</i>			
	<i>Рядовые пульпы</i>	<i>Сгущенные хвосты</i>	<i>Пастообразные хвосты</i>	<i>Глубоко обезвоженные хвосты</i>
Содержание твердых частиц в пульпе, % _{масс}	25–45 3–15*	50–70 15–45*	70–85	-
Весовая влажность <i>W</i> , %	-	-	-	Менее 18 %

*диапазон значений на предприятиях РФ

Остановимся на способах складирования глубоко обезвоженных хвостов, так как именно технология является одним из предметов диссертационного исследования. К перспективным и энергоэффективным способам складирования такого материала стоит отнести использование для этой цели телескопических конвейеров-стакеров (рисунки 1.14 и 1.15). Их преимуществом является возможность увеличения радиуса выпуска хвостов и относительная легкость в перемещении при смене площадки складирования. После формирования первого слоя хвостов производится их уплотнение бульдозерной техникой, что в сочетании с уплотнением массива за счет собственной массы позволяет размещать оборудование на уплотненном слое с отсыпкой второго и последующих ярусов.



Рисунок 1.14 – Телескопический конвейер-стакер



Рисунок 1.15 – Радиальный телескопический конвейер-стакер

Однако наиболее удобными являются системы мобильных конвейеров-стакеров, состоящие из комбинации различных горизонтальных конвейерных элементов, питателей и укладчиков обезвоженного материала (рисунки 1.16 и 1.17). С их помощью можно равномерно заполнять выделенную площадку складирования с последующим переустройством системы для наращивания ярусов хранилища. Производительность таких систем по укладке материалов может достигать 12 тысяч тонн в час (в пересчете на сухую массу), что удовлетворяет нуждам практически всех российских горнодобывающих предприятий.



Рисунок 1.16 – Мобильный конвейер-стакер



Рисунок 1.17 – Мобильная система конвейеров

Использование автотранспорта подразумевает дополнительные операции, такие как разгрузку отходов, их планировку и уплотнение. Для выполнения всего спектра операций необходимо использование самосвалов для транспортирования отходов, погрузчиков и экскаваторов, уплотнительных машин и бульдозеров, специальных укладчиков. Если для небольших предприятий с малым объемом образующихся отходов использование автомобильной техники может быть оправданно, то для крупных предприятий полного цикла

конвейерная транспортировка глубоко обезвоженных хвостов практически во всех случаях приносит большую выгоду в долгосрочной перспективе, особенно при значительном удалении хранилища от обогатительной фабрики. Однако одним из ограничивающих факторов введения конвейерного транспорта является возможное намерзание обезвоженного материала на ленту в условиях холодного климата и отрицательных температур, что накладывает строгие требования к влажности складываемого материала.

Автомобильный способ транспортирования отличается высокой энергозатратностью, ограниченной производительностью, зависимостью затрат на перевозку от стоимости топлива и его потребления машинами, высоким уровнем пылеобразования и дополнительным загрязнением окружающей среды выхлопными газами. Несмотря на более высокие начальные капитальные затраты для организации конвейерного складирования, для размещения глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов автором в данной работе принято решение использовать конвейерный транспорт, так как в итоге такой подход снижает стоимость владения оборудованием на протяжении всего жизненного цикла предприятия.

Независимо от способа доставки глубоко обезвоженных хвостов их складирование не вызывает выраженной сегрегации частиц по крупности с обособлением полезных минералов в разных зонах, что потенциально позволяет рассматривать такие хранилища как техногенное месторождение ТПИ с одинаковыми свойствами во всем массиве и снизить затраты на инженерно-геологические исследования и районирование массива. При выпуске рядовых пульп как в наливном, так и в намывном хвостохранилище происходит образование различных зон – пляжной, промежуточной и прудковой (ядерной), в каждой из которых вероятно преобладание минералов определенного состава, а размер частиц закономерно снижается от места выпуска к прудковой зоне (рисунок 1.18). При «сухом» складировании вся масса хвостов уже гомогенизирована на момент выпуска и поэтому не происходит разделения ни по минеральному составу, ни по крупности вследствие отсутствия свойств текучести у данного материала (рисунок 1.19).

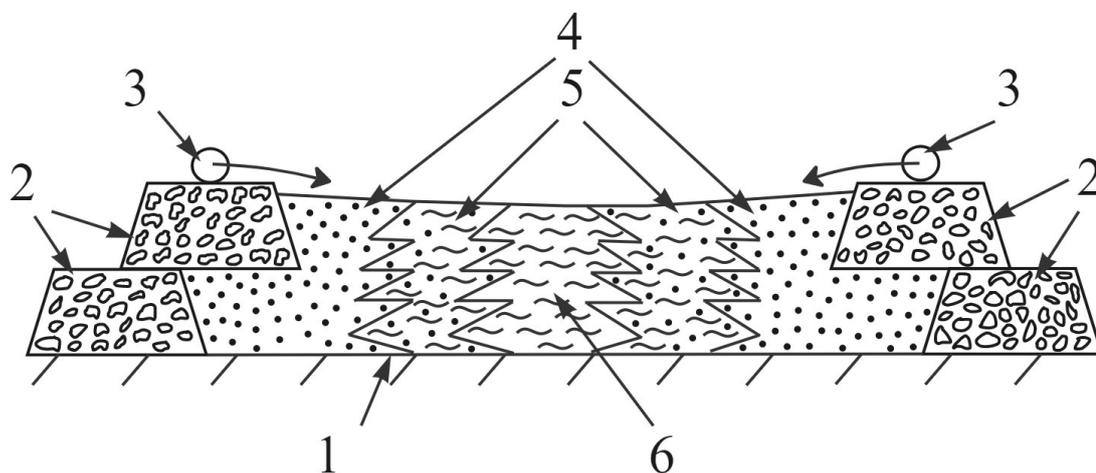


Рисунок 1.18 – Схематичное изображение выпуска пульпы в намывное хвостохранилище

- 1 – основание хранилища; 2 – ограждающие дамбы; 3 – пульпопровод;
4 – пляжная зона; 5 – промежуточная зона; 6 – прудковая зона

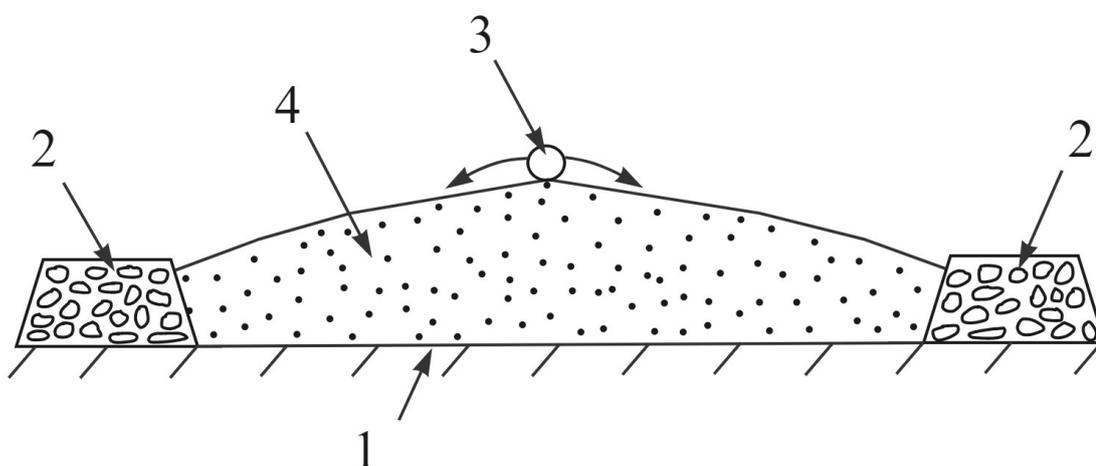


Рисунок 1.19 – Схематичное изображения складирования глубоко обезвоженных хвостов

- 1 – основание хранилища; 2 – ограждающие дамбы; 3 – выпуск хвостов;
4 – тело массива (однородный материал)

Максимальный безопасный угол откоса хранилища глубоко обезвоженных отходов обогащения определяется их физико-механическими свойствами – углом внутреннего трения, сцеплением и плотностью. Однако уже сейчас можно заключить, что складирование песчаных мелко- и среднезернистых хвостов позволяет существенно увеличить высоту откоса и соответственно снизить площадь нарушаемой территории при сохранении вместимости хвостохранилища (рисунок 1.20).

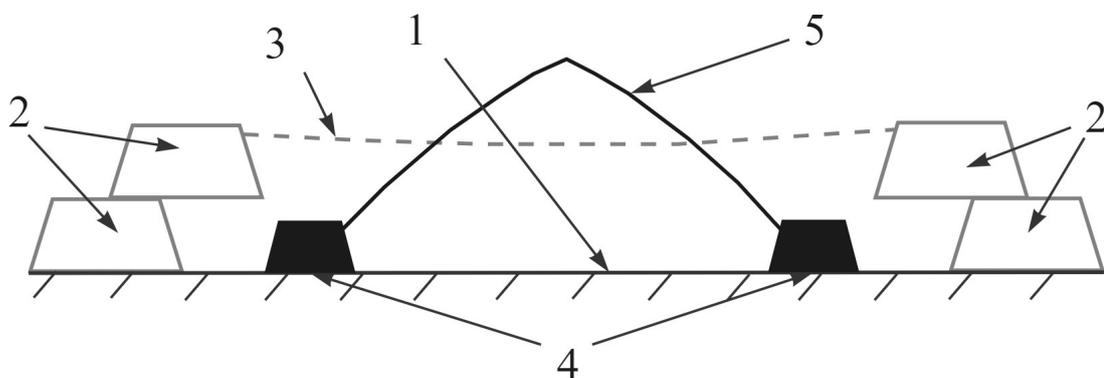


Рисунок 1.20 – Сравнение параметров намывного хранилища и хранилища глубоко обезвоженных хвостов

- 1 – основания хранилищ; 2 – ограждающие дамбы намывного хранилища;
 3 – тело намывного хранилища; 4 – ограждающие дамбы хранилища глубоко обезвоженных хвостов; 5 – тело хранилища глубоко обезвоженных хвостов

Из рисунка видно, что высота ограждающих дамб и занимаемая площадь «сухого» хранилища меньше в сравнении с намывным массивом, а вместимость одинакова. В большинстве случаев при организации таких хранилищ отсутствует необходимость возведения головной и защитных ограждающих дамб, что еще больше снижает землеемкость работ и затраты на процесс. Также к вышеперечисленным преимуществам складирования обезвоженных отходов стоит добавить, что укладка глубоко обезвоженных хвостов обеспечивает:

- надежное решение вопроса водоснабжения обогатительных фабрик за счет практического полного возврата в обратное использование воды;
- снижение риска инфильтрации загрязняющих веществ в грунтовые воды;
- уложенный материал не находится в состоянии полного водонасыщения, что сводит риск масштабного прорыва хвостов в результате их разжижения и перехода в состояние повышенной текучести практически к нулю.

Главными недостатками сухого складирования являются еще более высокие эксплуатационные расходы, чем при пастовом складировании, и пыление массивов, характерное для регионов с аридным климатом.

Несмотря на то, что методы сгущения и глубокого обезвоживания отходов обогащения известны в мире несколько десятилетий и хорошо изучены, в Российской Федерации до сих пор наиболее распространенным способом складирования хвостов остается традиционный метод выпуска в намывное хвостохранилище пульпы с низким содержанием твердой фракции. Скорее всего это связано с тем, что технологии намыва применяются с середины XX века и понятны технологам отечественных предприятий, конструкции хвостохранилищ и проекты их развития

создавались именно для размещения рядовых пульп еще во времена СССР и до сих пор нет стимула к пересмотру проектов, отсутствует желание инвестировать большие средства в новые безопасные способы складирования отходов, отсутствует дефицит водных ресурсов в основных горнодобывающих регионах. Однако главным фактором является совершенно разное устройство западных стран и СССР, что не позволило одновременно с ними исследовать технологии сгущения и складирования обезвоженных отходов обогащения ТПИ.

Сгущение и глубокое обезвоживание пульп активно применяется при обогащении в странах Северной и Южной Америки, позволяет экономить водные и земельные ресурсы, снижает риск техногенных катастроф. Предпосылками к этому в свое время стали выдвинутые экологами жесткие требования к безопасности хранения хвостов, высокая цена за использование нарушаемых территорий и сложность их получения в пользование для строительства новых отсеков хранилищ, стремление сократить расходы. В существующих реалиях и общемировых тенденциях российским предприятиям стоит начать отказываться от намыва пульп с низкой плотностью и внедрять технологии возведения хранилищ сгущенных и глубоко обезвоженных отходов обогащения твердых полезных ископаемых.

1.4 Организация мониторинга откосных горнотехнических сооружений и анализ методов получения информации о состоянии техногенных массивов

Приоритетным направлением развития горнодобывающей отрасли в условиях увеличения глубины разрабатываемых карьеров, усложнения горно-геологических условий добычи полезных ископаемых, усиливающегося техногенного воздействия на окружающую природную среду в целом является разработка принципов и методов прогнозирования изменения состояния горнопромышленных природно-техногенных систем (ГПТС), формирующихся в результате хозяйственной деятельности человека, а также управление состоянием подобных объектов с использованием оптимальных параметров технологий. До сих пор эксплуатация современных откосных горнотехнических сооружений связана с высокими промышленными и экологическими рисками (что было показано в разделе 1.2), так как вероятность аварийных ситуаций сохраняется, а масштаб их последствий может иметь региональный характер.

Необходимость проведения оперативного контроля состояния техногенных массивов закреплена в российских законодательных актах и нормативных документах: ФЗ №116 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», ФЗ №117 «О безопасности гидротехнических сооружений», ФЗ №174 «Об экологической экспертизе», «Правила безопасности при эксплуатации хвостовых, шламовых и гидроотвальных хозяйств» [157-160].

При переводе с латинского слова «монитор» становится понятным назначение и функционал всех мониторинговых систем, ведь дословно это слово означает наблюдение, напоминание или предостережение. В соответствии с определением мониторингом называется комплексная система регламентированных периодических наблюдений элементов природной или техногенной среды (или природно-техногенной системы в целом) с определенной целью и по заранее разработанной программе [161-164]. В ГОСТ Р 22.1.02-95 [165] дается определение мониторингу опасных природных явлений и процессов как системе регулярно проводимых по разработанной программе наблюдений и контроля с целью предупреждения возникновения чрезвычайных ситуаций или для снижения ущерба за счет вовремя разработанных и реализованных мероприятий.

Утилитарной целью мониторинга применительно к объектам добычи можно назвать безопасное функционирование основных элементов ГПТС за счет выявления негативных изменений среды, обнаружения мест активизации опасных горно-геологических процессов, а также факторов, вызывающих переход системы в критическое состояние. Кроме того, мониторинг организуется для прогноза и управления состоянием системы или объекта, построения сценариев последствий в случае наступления аварийной ситуации. Различают два вида мониторинга – мониторинг параметров (наблюдение за отдельными параметрами системы) и мониторинг состояния, главной целью которого становится наблюдение за характеристиками объекта в режиме реального времени и определение момента перехода системы в предельное состояние. Однако, относительно состава мониторинга существует несколько точек зрения [166-168] среди которых можно выделить первую, утверждающую, что мониторинг обязательно включает в себя контроль состояния и факторов опасных процессов, а также анализ и прогнозирование сценариев развития наблюдаемого опасного процесса и его последствий, и вторую точку зрения, вводящую понятие управления состоянием системы. Кроме этого, можно выделить следующие типы мониторинга по своему назначению [169]:

1. Прогнозный мониторинг, направленный на подготовку к наступлению аварийной ситуации или иного события за счет краткосрочного, среднесрочного или долгосрочного планирования, что позволяет разработать превентивные плановые мероприятия.

2. Охранный мониторинг, целью которого становится оповещение в случае идентификации начала развития опасного процесса и позволяющий принять оперативные меры для минимизации последствий опасного процесса в течение нескольких минут или секунд.

Сегодня на предприятиях ощущается острый дефицит инженерно-геологических, геоэкологических, гидрогеологических, геомеханических и других видов данных, являющихся жизненно необходимыми для качественного обеспечения функционирования горнотехнического

сооружения. Нехватка информации является результатом отсутствия необходимого контроля и, как следствие, сильно затрудняет прогнозирование изменения параметров состояния ГПТС. В свою очередь, это делает трудновыполнимой одну из главных задач при возведении и эксплуатации хранилищ отходов обогатительных производств – обеспечение их устойчивости. Своевременное реагирование на критическое изменение состояния ГПТС в высокой степени зависит от достоверности данных об условиях и причинах, вызывающих возникновение потенциальной аварийной ситуации. Систематизация информации о свойствах горных пород позволит уточнить критерии риска возникновения аварийной ситуации и разработать системы мониторинга состояния, в которых осуществляется расчет необходимой частоты измерения свойств и параметров состояния горнотехнических объектов (ГТО).

В соответствии с действующей нормативно-правовой базой основными задачами комплексного мониторинга на горнодобывающих предприятиях являются:

1. Прогнозирование изменения состояния объектов горных работ и связанных с ними компонентов окружающей среды в результате добычи полезного ископаемого и формирования хранилищ отходов горного производства.

2. Регулярные наблюдения за составными элементами геологической среды и эксплуатируемыми горнотехническими сооружениями.

3. Оценка пространственно-временных изменений состояния геологической среды на основе полученных данных.

4. Разработка рекомендаций по предотвращению наступления негативных изменений состояния геологической среды.

Структура и состав мониторинга на горнотехнических объектах, размещение пунктов сбора информации и вид собираемых данных определяются на основании типа месторождения, геологических и гидрогеологических условий разработки, сейсмической активности региона, вида техногенного массива и ряда других факторов. Инженерно-геологические наблюдения на оползнеопасных участках должны включать полевые опытные работы и лабораторные испытания для определения изменения показателей свойств горных пород и техногенных отложений во времени.

Проведенный анализ аварийных ситуаций показал, что одной из основных задач обеспечения безопасного функционирования формирующихся и уже эксплуатируемых хвостохранилищ является контроль и прогноз порового давления в массивах водонасыщенных отложений. Поровое давление создает напор в воде и ее фильтрацию, что приводит к уплотнению техногенных отложений и повышению их физико-механических свойств, следовательно, по величине давления можно судить о возможном поведении массива. С другой стороны,

избыточное поровое давление существенно снижает прочность техногенных отложений, что приводит к уменьшению коэффициента устойчивости откосного сооружения. Это видно из представленного ниже принципа эффективных напряжений К. Терцаги:

$$\tau_{сдв} = (\sigma_n - P_{изб}) \cdot tg\varphi' + C', \quad (1.1)$$

где $\tau_{сдв}$ – предел прочности на сдвиг;

$\sigma_n = P$ – полное нормальное давление (напряжение);

φ' и C' – угол внутреннего трения и сцепление соответственно.

Поэтому, для измерения гидростатического и избыточного давления в тело массива и основание намывных сооружений необходимо закладывать датчики порового давления. Кроме того, качественное обеспечение устойчивости массива достигается комплексным зондированием приоткосных зон и использованием пьезодинамометров на различных этапах формирования массива.

Более эффективный контроль состояния горнотехнического сооружения достигается путем повышения качества сбора информации об объекте, а также ее хранения, анализа и интерпретации. В рамках данных мероприятий можно выделить два перспективных направления [170]:

1. Сбор и анализ инженерно-геологической информации, наиболее качественно описывающей пространственно-временную изменчивость свойств массивов горных пород и техногенных отложений.

2. Мониторинг и прогноз состояния территорий промышленных объектов для своевременного контроля и принятия необходимых управленческих решений для безаварийного функционирования ГПТС.

В практике современной геомеханики и инженерной геологии моделирование поведения техногенных массивов производится при изменении сейсмической, гидрогеологической, инженерно-геологической, геомеханической и климатической обстановки, что позволяет сформулировать критерии оползневой опасности [171]. Отличительная особенность такого подхода – возможность учета изменения состояния породного массива во времени и пространстве при изменении характеристик одного или нескольких факторов одновременно. На основе данного подхода разработан ряд частных рекомендаций по проектированию систем мониторинга состояния техногенных массивов, которые обеспечивают быстрое оповещение в случае достижения критического уровня показателя той или иной характеристики, а также принятие решений по ликвидации предаварийной ситуации [45, 54, 73, 171-176].

Например, на угольных разрезах ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» на сегодняшний день внедрена система многоуровневого комплексного мониторинга состояния грунтовых оснований горнотехнических сооружений, позволяющая повысить точность наблюдений для объектов большой площади и снизить риск аварийных ситуаций. Система включает в себя глобальный аэрофотографический мониторинг для выявления оползнеопасных зон, региональный геолого-маркшейдерский мониторинг с целью прогноза устойчивости откосных сооружений, локальный электрофизический мониторинг гидрогеологических аномалий, а также компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния массива и расчет коэффициента запаса устойчивости [173].

С развитием телекоммуникационных технологий, все большее распространение получают системы дистанционного контроля удаленных объектов и управления ими с помощью спутниковой или сотовой связи, отличающейся низкой стоимостью и простотой использования. Данные системы применяются для удаленного контроля состояния намывных массивов, обеспечивают оперативное определение величины гидростатического давления в теле ограждающих дамб и давления в поровой воде, позволяют в режиме реального времени оценивать состояние дамб хвостохранилища путем определения коэффициента запаса устойчивости [174-176]. Эффективный контроль за состоянием отвальных насыпей, дамб гидроотвалов и хвостохранилищ осуществляется комплексными методами получения информации о состоянии системы отвал-основание, которые включают зондирование приоткосных зон, использование стационарных датчиков-пьезодинамометров, заложенных по расчетным профилям в теле и основании откосного горнотехнического сооружения на различных этапах его формирования [172].

Другое направление, связанное с определением состояния горнотехнических сооружений – мониторинг деформаций. Контроль осуществляется путем определения сдвижения реперов наблюдательной станции от их начального положения и сравнением координат реперов каждой последующей серии с предыдущей серией. Например, на Соколовском и Сарбайском карьерах АО «ССГПО» инструментальные маркшейдерско-геодезические наблюдения за устойчивостью карьерных откосов выполняются с использованием роботизированных электронных тахеометров, GPS-систем, 3D-лазерного сканирования [172, 177, 178].

Для определения сдвиговых деформаций массива рекомендованы методы аэрофотосъемки и космической съемки. Несмотря на более чем 50-ти летний опыт применения аэрофотосъемки при ведении горных работ [172, 179-182], в настоящее время применение GPS-технологий более целесообразно, так как позволяет повысить точность результатов измерений и

уменьшить трудозатраты по причине исключения необходимости создания геодезических сетей сгущения.

В условиях увеличения объемов добычи сырья и необходимости уменьшения объемов вскрышных пород особое внимание уделяется геомеханическому контролю состояния откосных сооружений. Целью такого контроля является своевременное и оперативное получение информации о физико-механических свойствах горных пород и их напряженно-деформированном состоянии; структурных особенностях прибортового массива и его прочностных свойствах, а также учет геологических, гидрогеологических, структурно-тектонических особенностей массива; анализ влияния технологических параметров на геомеханические процессы, происходящие в прибортовом массиве и т.д.

Комплексные исследования позволяют выполнить оценку и прогноз происходящих в массиве геомеханических процессах и разработать рекомендации по параметрам откосов для безопасного ведения горных работ и обеспечения устойчивости водонасыщенных массивов. Данная система наблюдений носит название гидрогеомеханический мониторинг, характеризующаяся постоянными наблюдениями за характеристиками откосных сооружений и оперативным управлением состоянием ГПТС на основе получаемых данных о свойствах отложений.

Гидрогеомеханический мониторинг осуществляется для обеспечения устойчивости бортов карьера, а также техногенных массивов. Гидрогеомеханический контроль предназначен для получения актуальной и достоверной информации о физико-механических свойствах горных пород, гидрогеологических условий и напряженно-деформированного состояния массивов. Важность гео- и гидромеханического мониторинга состояния откосных сооружений заключается в возможности своевременного предупреждения негативных горно-геологических явлений и, в частности, оползневых процессов.

Анализ ряда литературных источников позволяет выделить основные задачи гео- и гидрогеомеханического контроля состояния откосных горнотехнических сооружений [15, 51, 71, 172, 183, 184]. В задачи мониторинга входит:

- мониторинг деформаций бортов и уступов и изучение динамики развития геомеханических процессов для определения критических скоростей деформаций;
- определение напряжений в массиве и прочностных характеристик пород;
- проектирование противодеформационных мероприятий;
- расчеты коэффициентов запаса устойчивости откосных сооружений;
- определение положения депрессионной кривой в обводненных массивах;

- изучение отвального сооружения и определение свойств, грансостава отложений массива и грунтов оснований;
- установление несущей способности оснований дамб;
- установление соответствия реальных условий отвалообразования проектным.

Данные мероприятия можно отнести к мониторингу экзогенных процессов, под которым понимается многофункциональная постоянно действующая система наблюдений, прогнозов и предупреждений о потенциально аварийной ситуации. Создание такой системы подразумевает выполнение целого комплекса гидрогеологических и инженерно-геологических работ для оперативного контроля и управления наблюдаемой ГПТС.

При проектировании и развертывании мониторинговых систем наибольшее внимание должно уделяться следующим принципиальным вопросам и требованиям:

1. Комплексность и широта мониторинга. Системы наблюдений по отношению к данному параметру можно разделить на узкоцелевые и многокомпонентные. Первые ориентированы на определенный процесс, происходящий в массиве, или непосредственно на сам горнотехнический объект, безопасность которого целиком определяется зарождением и развитием контролируемого процесса. Многокомпонентные мониторинговые системы охватывают несколько многообразных процессов или факторов, провоцирующих определенные негативные горно-геологические явления.

2. Средства и методы мониторинга, которые выбираются в зависимости от знания и понимания основных индикаторов экзогенных геологических процессов (ЭГП) и вызывающих их природных и/или техногенных факторов, а также технических и технологических возможностей систематического наблюдения за этими индикаторами и их оценки. Индикаторы ЭГП могут быть как прямыми, получаемыми в результате непосредственных наблюдений за конкретным параметром или процессом и количественным измерением данного параметра, или косвенными, полученными на основе анализа физических полей, имеющих взаимосвязь с полями геологических параметров через определенные эмпирические зависимости [185, 186].

3. Эффективность и долгосрочность мониторинговых систем.

4. Минимизация информационных средств и оптимизация собираемых данных для достижения необходимого и достаточного минимума и полноты информации.

Таким образом, основным назначением мониторинга является оперативное получение представительной и достоверной информации об изучаемом объекте за счет знания и контроля индикаторов опасных процессов и обусловленных ими изменений состояния объекта и корректировка параметров, влияющих на объект. Однако среди недостатков имеющихся способов контроля состояния техногенных массивов следует выделить зависимость моделей

организации мониторинга от типа наблюдаемого объекта, что требует проведения большого количества исследований для определения схемы контроля и количества собираемой информации. Выделение общих характеристик и зависимостей, присущих большинству техногенных массивов, позволит разработать обобщенную модель организации комплексного мониторинга состояния и тем самым сократить вероятность ошибки или просчета за счет адаптации модели к конкретной ГПТС.

Выводы

1. В современных условиях происходит ежегодный рост образующихся отходов обогащения твердых полезных ископаемых, что определяет необходимость разработки и внедрения новых технологий их складирования в хранилища с учетом минимизации площади нарушаемых земель и обеспечением высокого уровня экологической безопасности.
2. Хранилища отходов обогащения твердых полезных ископаемых представлены преимущественно хвостохранилищами намывного типа, формирование и эксплуатация которых определяет высокие экономические и экологические риски.
3. В Российской Федерации складирование сгущенных или глубоко обезвоженных отходов обогащения твердых полезных ископаемых осуществляется в единичных случаях, однако в мировой горнодобывающей промышленности сформировалась тенденция к снижению доли укладки пульп с низким содержанием твердого.
4. Анализ аварийных ситуаций показал, что основной причиной разрушения ограждающих дамб хвостохранилищ является формирование техногенного водоносного горизонта в теле массива, что обуславливает увеличение гидростатического давления, разжижение уложенных хвостов и существенное снижение показателей физико-механических свойств техногенных отложений.
5. В современной отечественной практике добычи и первичной переработки полезных ископаемых практически отсутствует опыт формирования хранилищ глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов, в результате чего отсутствуют принципы инженерно-геологического и гидрогеологического обоснования их складирования.
6. Для хранилищ, сформированными глубоко обезвоженными отходами переработки железорудного сырья, принципы организации систем мониторинга состояния отсутствуют.

ГЛАВА 2. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ОТКОСОВ И ВМЕСТИМОСТЬ ХРАНИЛИЩ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ

Изучение влияния различных факторов на состояние массива отходов переработки железорудного сырья проводилось для условий горно-обогатительного комбината АО «Карельский окатыш», принадлежащего ПАО «Северсталь». Горные работы ведутся с 1982 г. на базе Костомукшского железорудного месторождения, представленного магнетитовыми железистыми кварцитами, кристаллическими сланцами различного состава и геллефлинтами. Основными изученными материалами являлись отходы обогащения руд железистых кварцитов – хвосты мокрой магнитной сепарации (ММС). Железистые кварциты являются наиболее распространенным промышленным типом железных руд в РФ. Кроме того, проектом развития хвостового хозяйства ГОКа предусмотрено внедрение технологий сгущения хвостов с их последующим складированием в Новый отсек хвостохранилища. Этим и вызван интерес к изучению отходов обогащения данного предприятия с целью обоснования возможности их обезвоживания и безопасного складирования в формируемые хранилища.

2.1 Горно-геологические условия разработки Костомукшского железорудного месторождения

Общие сведения. АО «Карельский окатыш» (ранее Костомукшский горно-обогатительный комбинат) – предприятие по добыче, обогащению и окомкованию железных руд, расположенное в республике Карелия в 30 км от границы с Финляндией, 200 км до Белого моря и 360 км до Петрозаводска – столицы республики. Основная производимая продукция – неофлюсованные и офлюсованные железорудные окатыши, железорудный концентрат. На долю АО «Карельский окатыш» приходится более 20 % производимых в России железорудных окатышей, что дает право занимать этому предприятию одно из ведущих мест по выпуску данной продукции. Основной промышленный центр – г. Костомукша. Проектная мощность комбината составляет: добыча сырой руды – 24 млн т, выпуск концентрата – 9,45 млн т, выпуск окатышей – 9 млн т. Обзорная карта расположения основных объектов предприятия приведена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Обзорная карта расположения основных объектов АО «Карельский окатыш»

- 1 – Костомукшский железорудный карьер; 2 – горно-обогатительный комбинат;
3 – хвостохранилище

Открытие и первое определение промышленных запасов месторождения было сделано в 1946 году. По состоянию на начало 2018 года запасы магнетитовых руд составляют 989 млн т при среднем содержании железа 31,7 %, железа магнетитового 25,9 %, 0,25 % серы и 0,17 % фосфора в рудах [187, 188]. Месторождение является крупнейшим по запасам железистых кварцитов на северо-западе России. Добыча полезного ископаемого ведется открытым способом.

Рельеф. Территория ведения горных работ находится в центральной и восточной частях одноимённого рудного поля, расположенного в северо-западной части Западно-Карельской возвышенности. Возвышенность представляет собой всхолмленную равнину с общим

понижением отметок поверхности с запада на восток и северо-восток. Рельеф сложный, среднехолмистый и сильно расчлененный. Отдельные возвышенности достигают высоты 30–50 м. Абсолютные отметки поверхности составляют от 150 м до 250 м. С учетом формирующегося техногенного ландшафта за счет ведения отвальных работ абсолютная отметка может увеличиваться до 280 м. Отмечается наличие большого числа озер, заболоченных участков и болот.

Преимущественно рельеф денудационно-тектонический с характерным приподнятием массивов, разделенных линейными понижениями. Решающую роль в формировании рельефа сыграли тектонические смещения и деятельность ледника. Местами наблюдается выход на поверхность коренных пород, представленных гранитами, гранито-гнейсами и гранодиоритами. Понижения приурочены к древним разломам, в которых сформировались долины рек, крупные озерные котловины и заболоченные низины [189]. Специфической особенностью района является обилие поверхностных вод, вызванное как климатическими факторами, так и характером рельефа. Значительное количество осадков при их относительной низкой степени испарения и наличие глубоких впадин при общей равнинности территории вызывает скопление водотоков в низинах, сток с которых затруднен.

Климат. Предприятие располагается в районе, относящемся к Крайнему Северу. При этом климат умеренно-континентальный с элементами морского. По ГОСТ 16350-80 [190] климат является умеренным. Общие черты климата определяются характером циркуляции атмосферы, влияние на его формирование оказывает близость предприятия к североатлантическому погодообразующему региону. В течение года преобладает перенос воздушных масс с запада на восток. Регулярное попадание в зоны воздействия циклонов сказывается на выпадении атмосферных осадков различной интенсивности и характера, в результате чего погодные условия неустойчивы.

Зима относительно мягкая, с обилием снеговых осадков и частыми оттепелями, в среднем длится 4 месяца со второй декады ноября по первую декаду марта. Теплый сезон в среднем продолжается 3 месяца с конца мая по конец августа, лето умеренно теплое и дождливое. Весна продолжительная, с частыми возвратами холодов. Осень затяжная, с ранними заморозками. Наиболее теплым месяцем в году является июль со среднемесячной температурой воздуха плюс 16 °С, самым холодным – январь со средней температурой минус 12 °С. Годовая амплитуда среднемесячного температурного режима составляет 28 °С, среднегодовая температура воздуха – плюс 1,5 °С. Климатические показатели температуры г. Костомукши по месяцам приведены в таблице 2.1 [191].

Таблица 2.1 – Температура воздуха в г. Костомукше

Показатель	Месяц											
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Макс., °С	-8	-7	-1	+5	+12	+17	+20	+17	+11	+4	-2	-6
Мин., °С	-16	-15	-11	-4	+2	+8	+10	+8	+4	-1	-7	-13
Среднее, °С	-12	-11	-6	0	+7	+13	+16	+13	+8	+2	-5	-9

Осадки в течение года выпадают неравномерно. Среднегодовая многолетняя величина осадков составляет 588 мм. Большая часть осадков приходится на теплое время года с мая по сентябрь, когда выпадает до 55 % годовой нормы осадков, при этом только за период с июня по август эта величина достигает 37 %. Влажный сезон в среднем длится 6,5 месяцев с конца апреля по середину ноября. За этот период вероятность выпадения более 1 мм осадков составляет 27 % [191]. Наиболее дождливый месяц – июль с примерно 12 влажными днями, за месяц в среднем выпадает 79 мм осадков. Наименьшее количество жидких осадков выпадает в феврале – около 2 мм. Более сухой сезон длится в среднем 5,5 месяцев с середины ноября по конец апреля. Месяц с наименьшим количеством атмосферных осадков (27 мм) – март. Среднее максимальное количество осадков в сутки за весь период наблюдений выпадает в июле – 23 мм, минимальное в феврале (6 мм). Абсолютный суточный максимум осадков в 118 мм наблюдался 23 июля 1991.

Характер осадков также различен. Наиболее типичным видом атмосферных осадков с апреля по вторую декаду ноября является дождь. В период с 20-х чисел ноября по начало апреля характерны твердые осадки в виде снега. Устойчивый снежный покров формируется с конца октября, а его разрушение начинается после середины апреля. Максимальной мощности снежный покров достигает в марте. По снегосъемкам в поле и лесу мощность покрова составляет соответственно 106 и 139 мм. В соответствии с СП 20.13330.2011 [192] территория ведения работ относится к снеговому району IV. Вес снегового покрова на 1 м² поверхности составляет 2,4 кПа. Смешанный характер осадков, когда происходит одновременное выпадение снега с дождем, наблюдается в среднем всего на протяжении 5 дней в начале апреля [191].

Геологическое строение. В геологическом строении рассматриваемого региона принимают участие верхнеархейские породы и четвертичные отложения, перекрывающие породы архея на площади более 90 %. Докембрийские железо-кремнистые формации образуют прерывистый ряд сложнопостроенных и протяженных синклинальных структур [193]. Дочетвертичные отложения представлены нюкозерской, контоксской и гимольской сериями лопия [194, 195]. Породы нижней, нюкозерской, серии имеют мощность от 100 до 1000 м и представлены гнейсами, интенсивно мигматизированными гранитами, прорванными жилами и

дайками магматических пород. Редко встречаются прослой кварцитов.

Контокская (средняя) серия преимущественно сложена вулканогенными породами – основными вулканитами, метавулканитами основного состава и ультраосновными метакоматиитами. С вулканитами ассоциируют магнетитовые кварциты. Мощность серии от 100 до 3000 м.

В основании гимольской (верхней) серии залегают метаморфизованные полимиктовые конгломераты, гравелиты и граувакки, которые сменяются железистыми кварцитами, сланцами различного состава и метаморфизованными ритмичнослоистыми сланцами флишевого типа в верхней свите серии [195]. Суммарная мощность серии от 180 до 2340 м.

Четвертичные отложения представлены торфяно-болотными образованиями и рыхлыми аллювиальными, ледниковыми и моренными осадками. В положительных формах рельефа четвертичные отложения в основном представлены валунными песками и супесями, в отрицательных – песками и глинами ледникового происхождения.

В основании отложений залегает валунно-галечная морена мощностью от 1,6 до 8,0 м. Межледниковые отложения представлены глинами, супесями, суглинками и песками. Ледниковые отложения представлены валунными песками, супесями и суглинками мощностью до 20 м. Максимальная мощность четвертичных отложений – 30 м при средней мощности 8 м.

Гидрогеологические условия. На месторождении выделяются два водоносных комплекса подземных вод – комплекс рыхлых четвертичных отложений с поровыми водами и комплекс кристаллических пород верхнего архея, содержащий трещинные и жильные воды. Водоносные комплексы четвертичных отложений распространены повсеместно и включают в себя ледниковые воды и воды торфяных отложений. Воды безнапорные, глубина залегания от поверхности составляет 0-5 м. Питание осуществляется преимущественно за счет поступления воды из пульпопроводов, инфильтрации атмосферных осадков и притока из нижележащих водоносных горизонтов.

Водовмещающие грунты представлены техногенными отложениями четвертичного возраста (пески и супеси), биогенными торфяно-болотистыми образованиями и ледниковыми песчано-гравийными отложениями (морена). Средняя мощность биогенных отложений составляет 2-3 м, они характеризуются высокой влагоемкостью и слабой водоотдачей. Мощность ледниковых отложений меняется от 3 до 20 м, их водообильность и водопроницаемость низкая – коэффициент фильтрации составляет от 0,04 до 2,6 м/сутки.

Водоносный комплекс кристаллических пород распространен на глубине несколько десятков метров от поверхности. Наиболее водообильными являются породы верхних горизонтов до глубины 40-50 м, где наблюдается наиболее интенсивная трещиноватость.

Водоносный комплекс также характеризуется слабой водообильностью и низкой водопроницаемостью. Коэффициент фильтрации пород комплекса от 0,002 до 2,5 м/сутки.

Характеристика руд. Костомукшское железорудное месторождение – комплекс сложно переслаивающихся верхнеархейских метаморфизованных кристаллических пород. Месторождение связано с комплексом докембрийских формаций [196]. Рудоносная толща залегает на амфиболовых сланцах, амфиболитах, углеродсодержащих сланцах рувинварской свиты контоксской серии лопия, перекрывается кварц-биотитовыми и биотит-кварцевыми сланцами с гранатом, ставролитом, андалузитом [197]. Руды относятся к типу магнетитовых кварцитов. Магнетитовые рудные слои содержат до 70 % железа, нерудные слои на 80–90 % состоят из кварца [198, 199].

Руды Костомукшского железорудного месторождения имеют тонкополосчатую структуру с тонковкрапленным магнетитом. По минеральному составу на месторождении выделяют три типа руд: силикат-магнетитовые; магнетит-силикатные; силикатные-магнетитсодержащие. По показателю обогатимости выделено три сорта руд:

- 1 сорт – показатель обогатимости более 67 %;
- 2 сорт – показатель обогатимости 63–67 %;
- 3 сорт – показатель обогатимости 63 %.

2.2 Технологические процессы и основные объекты АО «Карельский окатыш»

Добываемая в карьере рудная масса из забоя доставляется самосвалами на перегрузочные склады, откуда транспортируется железной дорогой на дробильно-обогатительную фабрику (ДОФ). Целевой продукт фабрики – высококачественный железорудный концентрат. Обогащение руд на предприятии достигается последовательным трехстадийным дроблением и измельчением с классификацией в гидроциклонах, трехстадийной мокрой магнитной сепарацией и дешламацией. Магнитный метод обогащения основан на использовании различия в магнитных свойствах подлежащих разделению компонентов руды или материала. Магнитное обогащение осуществляется в магнитных сепараторах, в рабочей зоне которых создается магнитное поле [200].

На показатели обогащения оказывают влияние плотность минералов, крупность и форма частиц руды. Представленные на Костомукшском железорудном месторождении минералы можно классифицировать по их магнитным свойствам:

- сильномагнитные минералы (ферромагнитные), извлекаемые на магнитных сепараторах с магнитным полем напряженностью до 120 кА/м – магнетит Fe_3O_4 , маггемит $\gamma-Fe_2O_3$, титаномагнетит $Fe(Ti)Fe_2O_4$, франклинит $(Zn, Mn)Fe_2O_4$, пирротин FeS_{1-x} ;

- слабомагнитные минералы (парамагнитные), извлекаемые на магнитных сепараторах с полем напряженностью до 1500 кА/м (сильное поле), к ним относят оксиды, гидроксиды, карбонаты железа и марганца, вольфрамит $(\text{Mn, Fe})[\text{WO}_4]$, ильменит FeTiO_3 , биотит $\text{K}(\text{Mg, Fe})_3[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$, минералы группы гранатов (альмандин $\text{Fe}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$) и др.;
- немагнитные материалы (диамагнитные), неизвлекаемые в магнитную фракцию, к ним относятся кварц SiO_2 , кальцит CaCO_3 , касситерит SnO_2 , апатит $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{F, OH})_2$ и др.

Трехстадийная схема дробления руды обеспечивает максимальную крупность руды после 1-й стадии 350 мм, после 2-й стадии 100 мм, после 3-й стадии 15 мм. По техническим условиям исходная крупность руды не должна быть более 1000 мм. Первая стадия дробления осуществляется в конусных дробилках ККД-1500/180, количество которых на предприятии составляет 2 шт. Производительность одной дробилки до 4500 т/ч. Далее дробленая руда крупностью 0–350 мм подается пластинчатыми питателями на конвейеры, транспортирующие ее в бункера среднего дробления. Вторая стадия дробления осуществляется в конусных дробилках КСД-3000Т ДУ (на предприятии 4 шт). Дробилки второй стадии работают в открытом цикле с грохотами модели SHR-24-10,5×2. Производительность дробилки находится в пределах 900–1250 т/ч. На третью стадию подается руда крупностью 0–100 мм, дробление происходит в дробилках Sandvik H8800 (7 шт) и КМД-3000Т2 (1 шт), работающих в замкнутом цикле с грохотами SKH 12,5×2 КМ и ГИТ-71Н. Производительность дробилок поддерживается на уровне 450–650 т/ч.

После третьей стадии дробления руда с содержанием класса плюс 15 мм не более 10 % подается на первую стадию измельчения, производимую в 12 стержневых мельницах модели МСЦ 3850×5500 с полезным объемом 59 м³ (длина стержней 5400 мм, диаметр 100 мм). На выходе мельница должна обеспечивать крупность руды в пределах 0–2 мм с содержанием класса плюс 2 мм не более 10 %, содержание твердого в сливе мельницы – 70 %. Производительность мельниц данного вида составляет от 280 до 345 т/ч (в расчете на влажный концентрат). Слив стержневых мельниц поступает на 1-ю стадию мокрой магнитной сепарации, осуществляемой в двух сепараторах ПБМ-П-120×300 с противоточной ванной. Первая стадия ММС позволяет удалить до 50 % пустой породы.

Питанием мельниц 2-й стадии измельчения является промпродукт ММС-I. Измельчение помольными шарами диаметром 40 мм осуществляется в мельницах МШЦ 4500×6000, работающих в замкнутом цикле с гидроциклонами Cavex 650 CVX. В сливе мельницы содержание твердого находится в пределах 68–72 %. На 3-ю стадию измельчения подаются пески основной и контрольной классификаций. Загрузка мельниц осуществляется шарами диаметром 25–30 мм из расчета 27–30 % заполнения объема мельницы. В сливе мельницы массовая доля

твердого составляет 60–65 %, содержание класса минус 0,050 мм 60–65 %.

После операций дробления и измельчения следует магнитная сепарация, в результате которой получают промпродукт ММС-III, содержащий не менее 65 % железа. На рисунке 2.2 представлена схема производства концентрата и образования отходов обогащения железной руды. Кругами на схеме показаны стадии дробления и измельчения руды с последующей мокрой магнитной сепарацией.

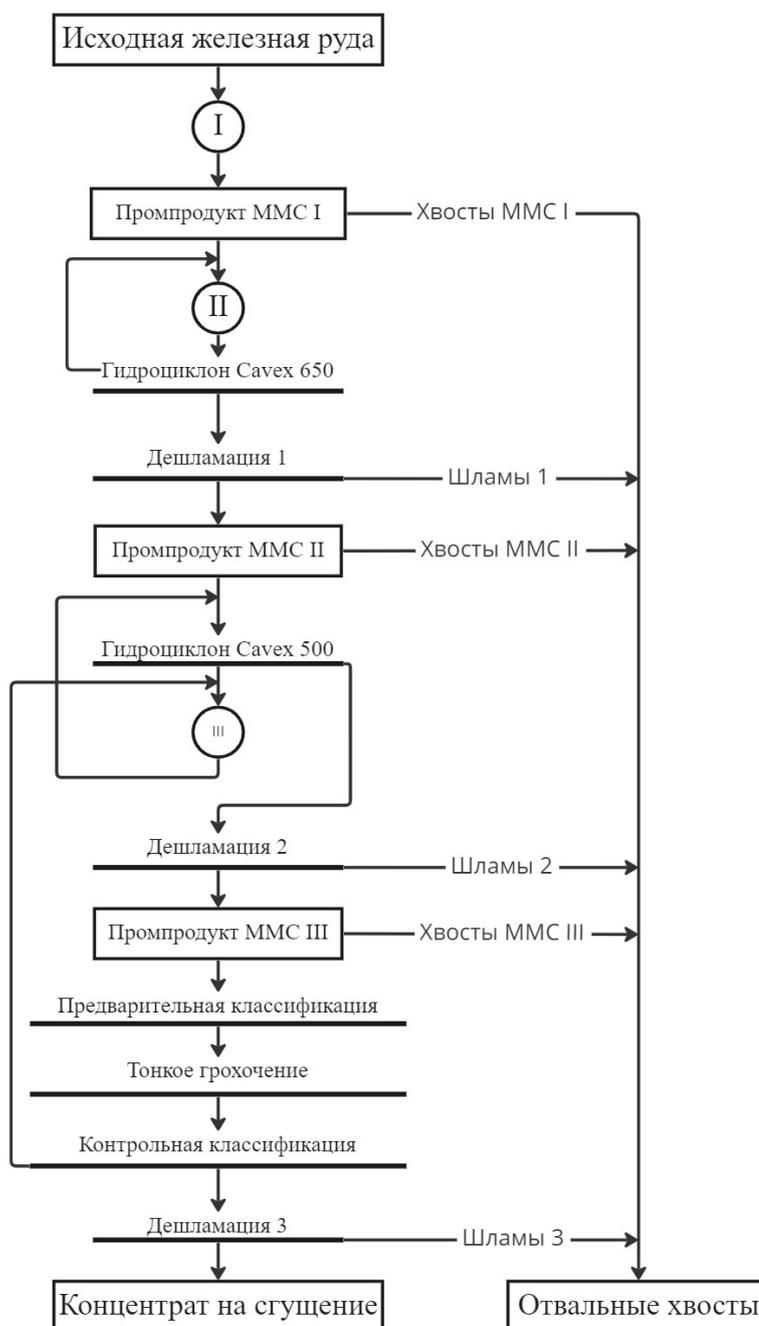


Рисунок 2.2 – Схема производства концентрата и образования отходов обогащения на АО «Карельский окатыш»

Полученный концентрат направляется в корпус сгущения, где происходит отделение влаги и сгущение продукта до 60–66 % твердого на радиальных сгустителях. Далее концентрат насосами 12ГрК перекачивается в отделение фильтрования Управления производства концентрата и окатышей (УПКиО), где получают готовый продукт. Готовый концентрат подается в бункеры, в которых происходит его смешивание с флюсами, связующим (бентонитом) и другими необходимыми добавками с получением шихты для производства окатышей. Готовая шихта подается в барабанные окомкователи, работающие в замкнутом цикле с грохотами. Полученные кондиционные сырые окатыши класса 8–16 мм загружаются на обжиговые конвейерные машины, на выходе из которых получают окисленные обожженные окатыши – товарная продукция предприятия.

В результате переработки железной руды на ДОФ предприятия образуются хвосты ММС, которые в составе пульпы, также содержащей сливы дешламаторов, направляются в хвостохранилище для складирования. Пульпы по хвостовому тоннелю самотеком поступают в зумпфы пульпонасосной станции, откуда часть хвостов грунтовыми насосами напрямую подается на хвостохранилище, а часть идет на сгущение. После сгущения хвосты перекачиваются на хвостохранилище.

Хвостохранилище относится к овражно-балочному типу, по способу заполнения и формирования ограждающих дамб является намывным. Образовано в озере и предназначено как для размещения отходов обогащения, так и для осветления воды с целью ее возврата в оборот на технологические нужды предприятия. Расположено в 3 км к востоку от обогатительной фабрики. Общая площадь, занимаемая хвостохранилищем – 39 км². Проектная вместимость составляет около 500 млн м³ хвостов (сухих), с учетом ввода Нового отсека, площадью 9,8 км², объем складированных хвостов составит 855 млн м³.

Комплекс сооружений хвостового хозяйства АО «Карельский окатыш» включает в себя следующие сооружения и системы [189]:

1. Система гидротранспорта хвостов ММС. Обеспечивает прием исходной пульпы, подачу рядовой и сгущенной пульпы на хвостохранилище.

2. Система складирования хвостов ММС. Обеспечивает формирование емкости хранилища, необходимой для размещения требуемого объема хвостов в составе пульпы.

3. Система оборотного водоснабжения. Обеспечивает аккумуляцию и осветление пульп и стоков, а также возврат воды из отстойного пруда хвостохранилища на технологические нужды ДОФ и цеха производства окатышей.

4. Система охраны окружающей среды. Обеспечивает водоотведение поверхностных стоков, сброс дебалансных вод из отстойного пруда и очистку сбрасываемой из

хвостохранилища воды.

5. Система контрольно-измерительной аппаратуры. Обеспечивает контроль за уровнем воздействия сооружений хвостохранилища на окружающую среду и изменение качества подземных вод.

Сооружения системы гидротранспорта хвостов обеспечивают подачу пульпы на хвостохранилище. В состав системы гидротранспорта также входят 2 комплекса сгущения суммарной производительностью до 40000 м³/ч по исходной пульпе. Спроектированные для повышения концентрации твердого в пульпе с 4–6 % до 35–45 % комплексы сгущения позволяют организовать внутрифабричную систему водооборота и снизить эксплуатационные затраты на обратное снабжение через хвостохранилище. Подача сгущенной пульпы на хвостохранилище осуществляется по 4 распределительным пульповодам (из имеющихся 8).

Намывная технология формирования хвостохранилища требует возведения специальных сооружений – ограждающих дамб и плотин. Система складирования хвостов включает 6 ограждающих дамб хвостохранилища, 1 пионерную плотину и 2 плотины. Основное назначение сооружений – создание емкости хвостохранилища для размещения отходов обогащения. Данные дамбы и плотины сложены из моренного или скального грунта и представляют из себя однородные насыпные каменно-земляные сооружения.

В процессе увеличения объема складирования хвостов возникает необходимость возведения дополнительных дамб, выполняющих функции как по увеличению емкости в накопителе, так и для защиты имеющихся дамб. Вторичные дамбы на хвостохранилище АО «Карельский окатыш» выполнены из намывного материала – крупнозернистой части хвостовых отложений, и представлены вторичной дамбой Южного, Западного и Северного бортов хвостохранилища.

Система оборотного водоснабжения предназначена для возврата осветленной воды из пруда-отстойника хвостохранилища на технологические нужды дробильно-обогажительной фабрики или цеха производства железорудных окатышей. Емкость пруда-отстойника сформирована ограждающими дамбами и при нормальном подпорном уровне имеет объем около 152 млн м³ при площади 13,3 млн м².

Система охраны окружающей среды направлена на снижение техногенной нагрузки на природные объекты, для чего на предприятии организованы отдельные системы водосбросных и очистных сооружений, системы водоотведения поверхностного стока от хвостохранилища. Система контрольно-измерительной аппаратуры предназначена для наблюдения за уровнем воздействия хвостохранилища на окружающую среду для оценки влияния техногенных объектов на природные характеристики биосферы, атмосферы и гидросферы. Мониторинг состояния и

тяжести воздействия техногенных сооружений достигается установкой датчиков осадок и смещения массивов, уровней депрессионной кривой в теле массивов, уровня зеркала воды в пруде-отстойнике и химического состава сбросных вод.

На рисунке 2.3 показано расположение основных откосных сооружений хвостохранилища. Красным цветом показан контур Нового отсека на начальном этапе его формирования. В соответствии с проектом Новый отсек формируется на надводном пляже существующего хвостохранилища и не требует выделения дополнительных территорий.



Рисунок 2.3 – Схема расположения основных откосных сооружений с проектным контуром
Нового отсека хвостохранилища

- 1 – плотина № 1 и 1а; 2 – пионерная плотина; 3 – дамба № 3; 4 – вторичная дамба;
5 – дамба № 2; 6 – дамба № 1; 7 – отсечная дамба; 8 – разделительная дамба

Конструктивно откосные сооружения представляют собой как насыпные каменно-земляные дамбы из скального и моренного грунта, так и намывные дамбы, сложенные крупнозернистой фракцией хвостов. Средние значения заложения верхового и низового откоса дамб – 1 : 1,5, плотин – от 1 : 2 до 1 : 3.

2.3 Исследование состава и свойств отходов обогащения железистых кварцитов

Как было подробно описано ранее, железистые кварциты – метаморфические горные породы с характерным тонкослоистым строением чередующихся рудных и нерудных минералов. Данная порода состоит из кварца, как главной формы нахождения оксида кремния, и магнетита как главного рудного минерала.

Исследуемые материалы в основном представлены средне- и мелкозернистыми частицами со значительной долей для данного типа хвостов обогащения крупно- и грубозернистых частиц. Также встречаются металлические включения, представленные фракциями от помольных шаров и стержней вследствие используемой на предприятии технологии дробления и тонкого измельчения руд. Гранулометрический состав твердой фазы хвостов, определенный ситовым анализом в соответствии с ГОСТ 12536-2014 [201], представлен в таблице 2.2.

Анализ грансостава позволяет заключить, что большую часть хвостов (около 94,5 %) составляют песчаные частицы (диапазон размеров 2,00÷0,05 мм), в то время как пылеватые (0,050÷0,005 мм) и глинистые (<0,005 мм) частицы суммарно содержатся в количестве около 5,5 %. Определить более точно соотношение пылеватых и глинистых частиц было невозможно из-за выбранного метода определения гранулометрического состава. Таким образом, в соответствии с ГОСТ 25100-2020 [31] отходы обогащения железистых кварцитов могут быть отнесены к мелкозернистым пескам (содержание частиц с размером больше 0,10 мм превышает 75 %), преимущественно состоящими из песков мелких (34,73 %), средних (25,92 %) и тонкозернистых (около 22 %)

Таблица 2.2 – Гранулометрический состав отходов обогащения руд железистых кварцитов

Класс, мм	+1,000	0,500-1,000	0,250-0,500	0,100-0,250	0,071-0,100	0,045-0,071	-0,045	Сумма
%	2,56	8,47	25,92	34,73	10,08	12,74	5,50	100,00

Средневзвешенный диаметр частиц рассчитывался по формуле:

$$d_{\text{средний}} = \frac{\sum x_i \cdot d_i}{100}, \quad (2.1)$$

где x_i – массовая доля частиц i -го класса, %;

d_i – диаметр частиц определенного класса, мм.

Средневзвешенный диаметр частиц в исследованных хвостах обогащения составил $d_{\text{средний}} = 0,266$ мм. По результатам определения гранулометрического состава хвостов обогащения руд железистых кварцитов была построена кривая неоднородности грансостава

исследуемых материалов (рисунок 2.4). Количественным показателем гранулометрической кривой является коэффициент неоднородности K_n , определяемый как отношение:

$$K_n = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (2.2)$$

где d_{60} и d_{10} – диаметр всех частиц, содержащихся в породе в количестве 60 % и 10 % соответственно (контролирующий и эффективный диаметры).

Для однородных грунтов данный показатель стремится к 1 и чем ближе коэффициент к 1, тем однороднее грунт. При величине коэффициента больше 3 грунт является неоднородным по составу. По кривой гранулометрического состава исследуемых хвостов обогащения контролирующий и эффективный диаметры составили 0,2305 мм и 0,0525 мм соответственно.

Тогда $K_n = \frac{0,2305}{0,0525} = 4,39$ – данный материал является неоднородным по составу [203].

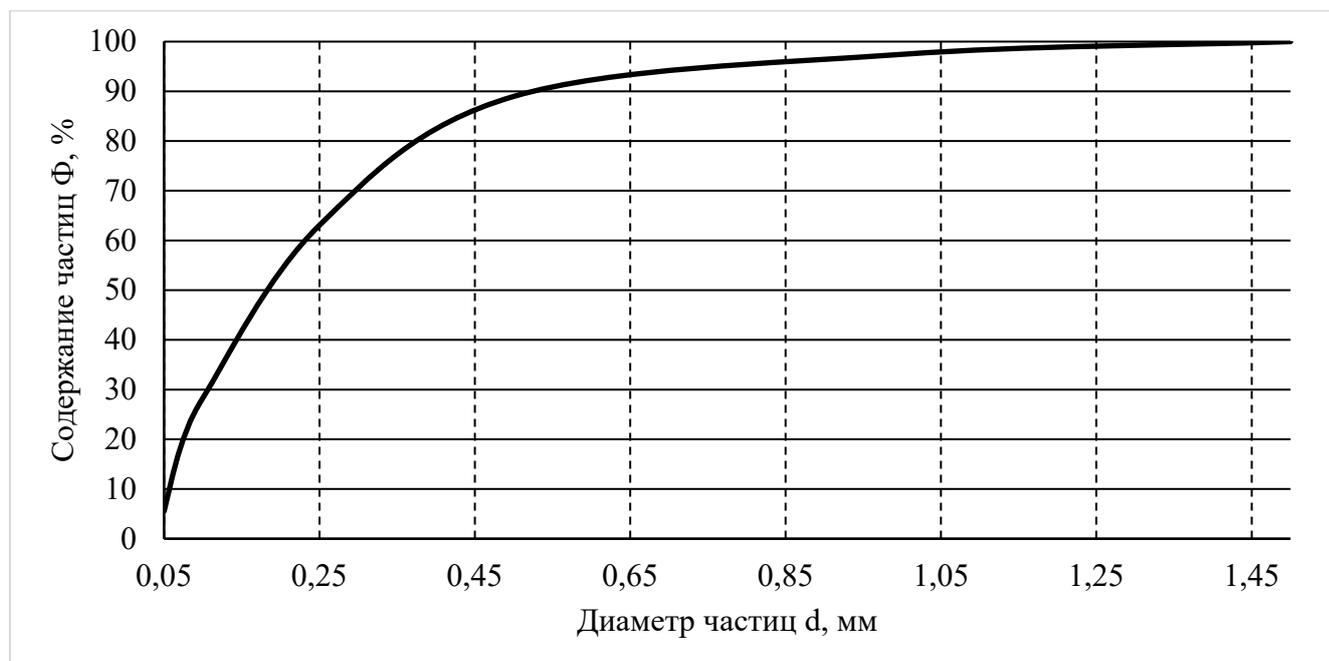


Рисунок 2.4 – Кривая неоднородности гранулометрического состава отходов обогащения железистых кварцитов

Средняя измеренная плотность минеральных частиц хвостов $\rho_{хв. ист} = 2750 \text{ кг/м}^3$, плотность хвостов в сухом состоянии составляет $\rho_{хв. сух} = 1450 \text{ кг/м}^3$. Для определения истинной плотности материала образцов в виде порошка и плотности монолитных образцов, включающих закрытые поры, использовался автоматический гелиевый пикнометр Ассурус 1340. Методика проведения измерений заключалась в следующем.

1. Производилось взвешивание измерительной кюветы гелиевого пикнометра.
2. В кювету вносилась навеска образца и выполнялось новое взвешивание.

3. По результатам взвешиваний рассчитывалась масса навески образца.

4. Измерительная кювета помещалась в пикнометр и в автоматическом режиме десятикратно выполнялось измерение.

Перед каждым измерением кювета промывалась дистиллированной водой на ультразвуковой бане и высушивалась, после чего пикнометр градуировался с использованием аттестованных образцов объема.

Также был проведен анализ химического состава исследуемых материалов и произведен качественный анализ минерального состава. Пробоподготовка образцов, предварительно высушенных до воздушно-сухого состояния, заключалась в следующем. Представительная проба хвостов обогащения массой 1 кг отбиралась в результате квартования. Далее производилось квартование представительной пробы до получения остатка массой 15÷20 г, который подвергался дополнительному измельчению на гидравлическом прессе до фракции минус 2 мм и затем в дисковом истирателе измельчался до фракции минус 0,1 мм. Подготовленный тонкодисперсный материал из нескольких проб истирался 3 раза для усреднения состава. Полученная навеска измельченного материала массой 5 г дополнительно истиралась в агатовой ступке до получения фракции минус 0,071 мм и отправлялась на анализ.

Определение химического состава хвостов обогащения железистых кварцитов производилось методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой. Данным методом возможно определить содержание основных элементов исследуемого материала кроме углерода, серы и кремния. Измерения проводились на спектрометре iCAP 6300 Radial View, преимуществом которого является возможность одновременно получать и фиксировать все спектральные линии определяемых элементов за счет использования решетки Эшелле и полупроводникового твердотельного детектора. Метод основан на анализе проб из их растворов, для чего исследуемый материал сначала сплавлялся в муфельной печи в смеси с гидроксидом калия при 650 °С, а затем выщелачивался и полностью растворялся в соляной кислоте.

Содержание кремния определялось гравиметрическим способом. Для определения количества углерода и серы в хвостах применялся инфракрасно-абсорбционный метод анализа на приборе CS-230 И. В основе метода лежит сжигание навески пробы в токе кислорода при 1700 °С с последующим определением количества образовавшихся диоксидов углерода и серы измерением поглощенного данными газами инфракрасного излучения.

Определение минеральных составляющих хвостов обогащения производилось с использованием рентгенофазового анализа (метод рентгеновской дифракции или XRD) и мёссбауэровской спектроскопии, последний из которых позволяет определять валентную форму

нахождения железа в железосодержащих материалах. Было определено, что основной составляющей хвостов обогащения руд железистых кварцитов является кварц. Другие составляющие представлены кремнеземом, входящим в состав различных кремнийсодержащих минералов, таких как силикаты, глиноземом (алюмосиликаты), а также оксидами магния, марганца, железа, оксидами щелочных металлов. Кроме кварца можно выделить присутствие таких минералов как слюды и железные слюдки (глауконит, биотит), щелочные амфиболы (грюнерит, актинолит, родусит) и железистые амфиболы (кумингтонит), полевые шпаты, пироксены и щелочные пироксены, хлориты, карбонаты (кальцит, доломит, сидерит и сидероплезит), а также глинистые минералы. Из рудных минералов выделяются магнетит, гематит, гидрогематит и мартит. Источниками вредных примесей – серы и фосфора – являются пирит, пирротин и апатит. В таблице 2.3 представлен химический состав отходов обогащения железистых кварцитов. Содержание общего железа $Fe_{\text{общ}} = 10,48 \%$, потери при прокаливании при $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ в муфельной печи – $2,97 \%$.

Таблица 2.3 – Химический состав отходов обогащения железистых кварцитов

Элемент в форме оксида	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O + K ₂ O
%	5,14	9,26	71,14	3,11	3,98	1,82	0,31	0,22	2,05

Для моделирования поведения массива обезвоженных хвостов обогащения железистых кварцитов необходимо знание основных водно-физических характеристик материала. Расчет производился на 1000 г влажных хвостов ($q_{\text{хв. } 10\%} = 1000 \text{ г}$) с весовой влажностью $W = 10 \%$. Масса хвостов после высушивания $q_{\text{хв. сух}} = 909,1 \text{ г}$, плотность минеральных частиц $\rho_{\text{хв. уст}} = 2750 \text{ кг/м}^3$, плотность хвостов в сухом состоянии $\rho_{\text{хв. сух}} = 1450 \text{ кг/м}^3$. Объем навески хвостов $V_{\text{хв. } 10\%}$ при влажности $W = 10 \%$ составил $626,97 \text{ см}^3$.

Определим $\rho_{\text{хв. } 10\%}$ – плотность хвостов с остаточной влажностью 10% :

$$\rho_{\text{хв. } 10\%} = \frac{q_{\text{хв. } 10\%}}{V_{\text{хв. } 10\%}} = \frac{1000}{626,97} = 1,59 \text{ г/см}^3 \text{ или } 1590 \text{ кг/м}^3$$

Пористость n (отношение пор к единице объема навески) можно найти из следующего выражения:

$$n = \frac{\rho_{\text{хв. ист}} - \rho_{\text{хв. сух}}}{\rho_{\text{хв. ист}}} = \frac{2,75 - 1,45}{2,75} = 0,4727 \text{ или } 47,27 \%$$

Коэффициент пористости e (отношение объема пор навески к объему твердой части):

$$e = \frac{n}{1 - n} = \frac{0,4727}{1 - 0,4727} = 0,896$$

Объемная влажность W_o (отношение объема воды, заполняющей поры, к объему сухой навески):

$$W_o = \frac{W \cdot \rho_{\text{хв.сух}}}{\rho_{\text{воды}}} = \frac{10 \cdot 1,45}{1,0} = 0,145 \text{ или } 14,5 \%$$

Коэффициент водонасыщения S_r (отношение объема воды в навеске к объему пор):

$$S_r = \frac{W \cdot \rho_{\text{хв.ист}}}{\rho_{\text{воды}} \cdot e} = \frac{0,10 \cdot 2,75}{1,0 \cdot 0,896} = 0,307$$

По результатам расчета коэффициента водонасыщения обезвоженных до 10 % хвостов их следует отнести к маловлажным грунтам (согласно ГОСТ 25100-2020 [31]).

Полная влагоемкость:

$$W_{sat} = \frac{e \cdot \rho_{\text{воды}}}{\rho_{\text{хв.ист}}} = \frac{0,896 \cdot 1,0}{2,75} = 0,3258 \text{ или } 32,58 \%$$

Также в соответствии с ГОСТ 22733-2016 [203] производилось определение оптимальной весовой влажности W_{opt} отходов обогащения железистых кварцитов – величины влажности материала, при котором достигается его максимальная плотность в сухом состоянии. Метод испытаний заключался в уплотнении образца хвостов падающим грузом с постоянной высоты (стандартное уплотнение) с последовательным увеличением их влажности, схема прибора приведена на рисунке 2.5.

Для проведения первого испытания предварительно высушенная до воздушно-сухого состояния проба хвостов была увлажнена до 6 % (согласно рекомендациям ГОСТ). Шаг увеличения влажности испытуемых хвостов в следующих испытаниях составлял 1 %. Испытание проводилось либо до момента начала отжатия воды или выделения разжиженных хвостов через соединения формы, либо до начала уменьшения массы и плотности образца с повышением влажности, но не менее 5 раз.

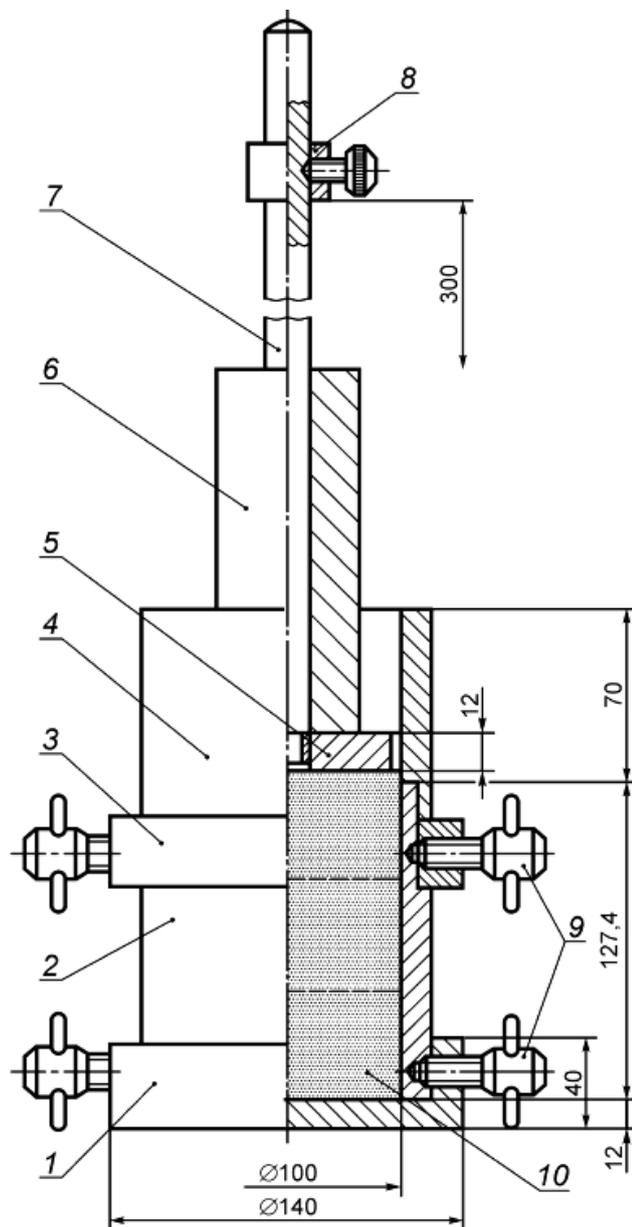


Рисунок 2.5 – Схема прибора для стандартного уплотнения грунтов
 1 – поддон; 2 – разъемная форма; 3 – зажимное кольцо; 4 – насадка;
 5 – наковальня; 6 – груз массой 2,5 кг; 7 – направляющая штанга;
 8 – ограничительное кольцо; 9 – зажимные винты; 10 – образец хвостов

Расчет количества воды Q , необходимой для увлажнения хвостов до заданного значения, производился по формуле:

$$Q = \frac{m_p'}{1+0,01w_g} \cdot 0,01(w_i - w_g), \quad (2.3)$$

где m_p – масса отобранной пробы, кг;

w_i – влажность хвостов для испытания, %;

w_g – влажность хвостов в воздушно-сухом состоянии, %.

Определение плотности хвостов ρ_i в процессе испытаний производилось по формуле:

$$\rho_i = \frac{m_i - m_c}{V}, \quad (2.4)$$

где m_i – масса формы с уплотненным грунтом, кг;

m_c – масса формы без грунта, кг;

V – объем формы, м³.

В результате последовательного определения значений плотности и влажности хвостов рассчитывались значения плотности сухого материала по формуле:

$$\rho_{di} = \frac{\rho_i}{1 + 0,01w_i} \quad (2.5)$$

где ρ_i – плотность хвостов, кг/м³;

w_i – влажность хвостов при очередном испытании, %;

Построенный по результатам испытаний график зависимости плотности сухих хвостов от влажности представлен на рисунке 2.6. Значение оптимальной весовой влажности определялось графически по величине максимальной плотности сухих хвостов и соответствующей данной плотности влажности. Результаты показали, что максимальная плотность хвостов в сухом состоянии, равная 1790,0 кг/м³, достигается при весовой влажности $W_{opt} = 11,2$ %. Знание этого параметра позволяет проектировать работы по повышению плотности укладки глубоко обезвоженных хвостов в хранилище с минимальными энергетическими затратами.

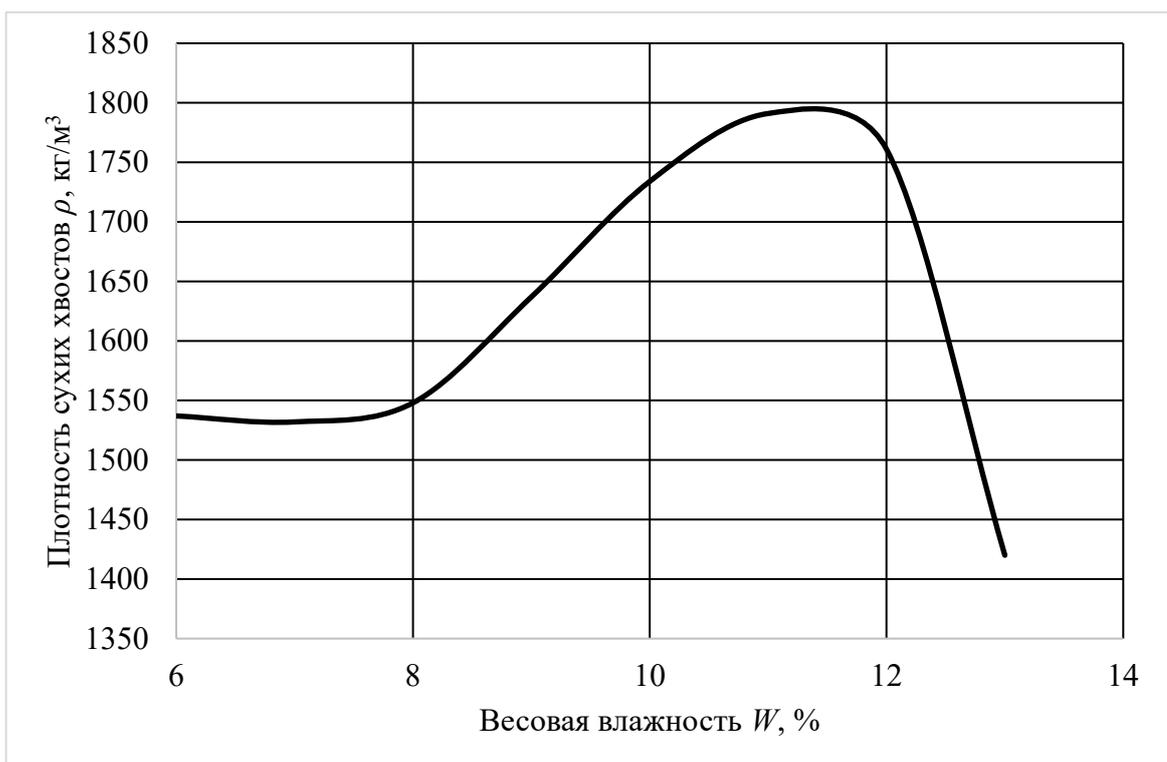


Рисунок 2.6 – График зависимости плотности сухих хвостов от весовой влажности

По полученным физическим характеристикам хвостов рассчитаем коэффициент фильтрации K_{Φ} хвостов обогащения железистых кварцитов. Согласно ГОСТ 25584-2016 [204], коэффициентом фильтрации называют скорость фильтрации воды при градиенте напора, равном единице, и линейном законе фильтрации. Для расчета воспользуемся эмпирической формулой В.А. Крюгера [205] которая дает наилучшие результаты для исследуемого типа материалов:

$$K_{\Phi} = 240 \cdot \frac{n}{(100-n)^2} \cdot d_q^2, \quad (2.6)$$

где n – пористость, %;

d_q – действующий диаметр грунта по В.А. Крюгеру, мм.

Действующий диаметр определяется В.А. Крюгером как:

$$\frac{1}{d_q} = \frac{q_1}{d_1} + \frac{q_2}{d_2} + \frac{q_3}{d_3} + \dots + \frac{q_n}{d_n}, \quad (2.7)$$

где q_1, q_2, \dots, q_n – доля отдельных фракций частиц в составе хвостов;

d_1, d_2, \dots, d_n – средние диаметры частиц в составе соответствующих фракций.

В результате расчета было получено, что $d_q = 0,266$ мм. Тогда коэффициент фильтрации K_{Φ} будет равен 0,29 м/сут – исследуемые отходы обогащения являются слабопроницаемыми. Рассчитанное значение коэффициента фильтрации хорошо коррелирует с известными значениями (от 0,0015 м/сут до 0,5790 м/сут), полученными для различных обезвоженных и уплотненных материалов, складываемых в хранилища отходов обогащения твердых полезных ископаемых [206-208].

Для оценки поведения массива глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов необходимо знание деформационных свойств техногенных отложений (грунтов), слагающих массив. Одной из таких характеристик является сжимаемость – способность грунта уменьшаться в объеме (давать осадку) под действием внешней нагрузки (давления) без возможности бокового расширения. В результате внешнего воздействия происходит изменение пористости грунта вследствие сдвига частиц и заполнения ими порового пространства, изменения толщины водно-коллоидных оболочек минеральных частиц и ползучести скелета грунта. Происходящее при этом уплотнение грунта достигается уменьшением объема пор за счет вытеснения защемленного в них воздуха и отжимания воды [209].

Сжимаемость глубоко обезвоженных хвостов является чрезвычайно важной характеристикой, определяющей конструкцию хранилища, его конфигурацию и темп формирования массива. Кроме того, на сжимаемость влияет коэффициент водонасыщения техногенных отложений массива, который в свою очередь зависит от пористости. По различным данным глубокое обезвоживание хвостов в промышленных масштабах сегодня не позволяет существенно снизить коэффициент водонасыщения складываемых грунтов, так как этот коэффициент колеблется в диапазоне от 0,5 до 0,75. Предлагаемая в работе технология обработки

хвостов обогащения железистых кварцитов в вибрационной машине позволяет получать материал со значением S_f равным 0,3, что потенциально позволяет обеспечивать формирование и эксплуатацию такого хранилища без перехода отложений массива в водонасыщенное состояние.

Уплотнение (деформация) техногенного грунта под действием сплошной постоянной нагрузки без возможности бокового расширения называется компрессией грунтов. Испытания проводились в компрессионном приборе – одометре, принципиальная схема которого приведена на рисунке 2.7. Нагрузка в виде гирь прикладывалась ступенчато, начиная с величины $P_1 = 0,05$ МПа, $P_2 = 0,1$ МПа и далее с шагом 0,1 МПа до конечной нагрузки $P_6 = 0,5$ МПа. Далее для удобства расчета примем, что $0,1$ МПа = $1,0$ кг/см². Перед каждым увеличением нагрузки индикаторы измерения деформаций устанавливались в нулевое положение, время приложения нагрузки составляло 3 минуты, первоначальная высота образца – 45 мм, начальный коэффициент пористости $e_0 = 0,896$.

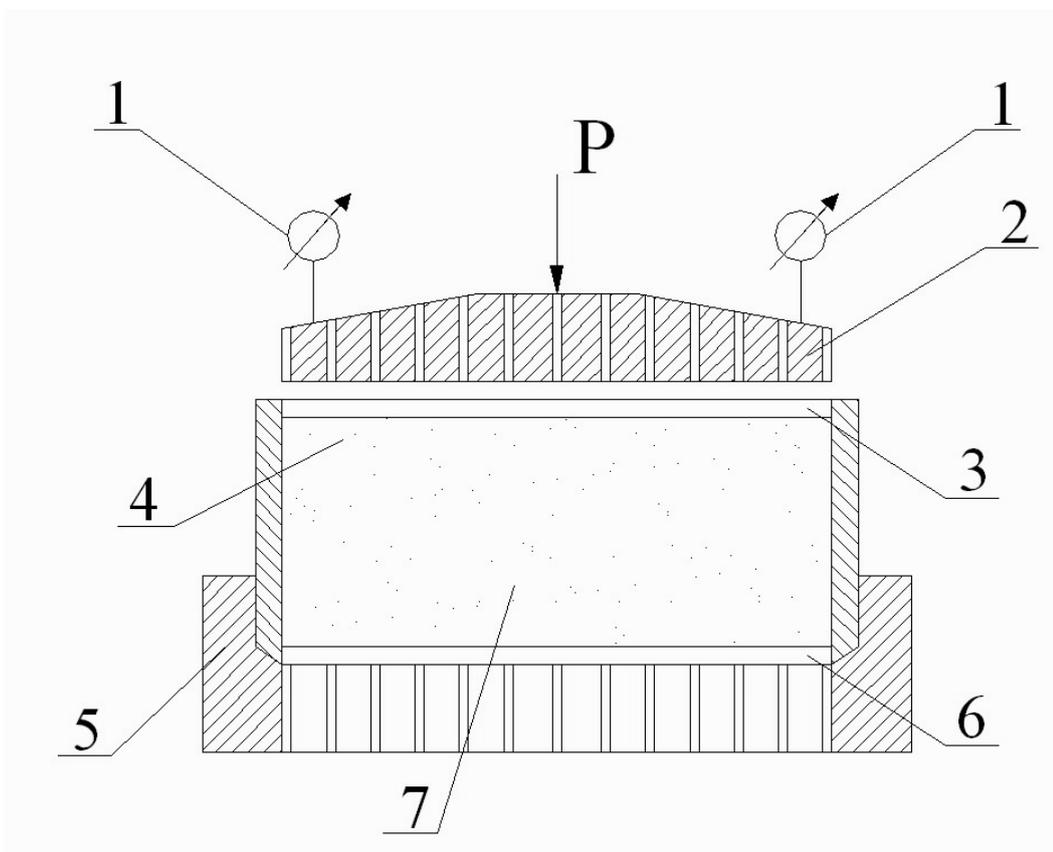


Рисунок 2.7 – Принципиальная схема компрессионного прибора (одометра)

- 1 – индикаторы для измерения вертикальных деформаций; 2 – штамп;
3, 6 – фильтровальная бумага; 4 – режущее кольцо; 5 – днище прибора с перфорацией для
фильтрации воды; 7 – образец грунта (хвостов)

Получаемая в результате проведения испытаний зависимость коэффициента пористости e от величины уплотняющей нагрузки P называется компрессионной зависимостью и отображается в виде компрессионной кривой. Уравнение кривой имеет вид:

$$e_i = e_o - \frac{\Delta h}{h} \cdot (1 + e_o), \quad (2.8)$$

где e_i – коэффициент пористости при давлении P_i ;

h – высота образца, мм;

Δh – изменение высоты образца после приложения нагрузки (деформация грунта), мм.

Коэффициенты пористости хвостов при различных значениях нагрузки приведены в таблице 2.4. В таблице 2.5 приведены значения относительного изменения коэффициента пористости хвостов при нагрузке. Среднее значение при нагрузке в диапазоне от 0,05 МПа до 0,5 МПа составило 6,29 %. Компрессионная кривая по полученным значениям таблицы 2.4 представлена на рисунке 2.8.

Таблица 2.4 – Результаты определения компрессионных характеристик хвостов

<i>Параметр</i>	<i>Значение параметра</i>					
$\frac{\Delta h}{h_0}, \%$	1,71	2,40	3,09	3,38	3,58	3,62
Нагрузка P , МПа	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Коэффициент пористости e	0,864	0,850	0,837	0,832	0,828	0,827

Таблица 2.5 – Относительное изменение коэффициента пористости хвостов

<i>Параметр</i>	<i>Значение параметра</i>					
Нагрузка P , МПа	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Изменение коэффициента пористости, %	3,57	5,13	6,58	7,14	7,59	7,70

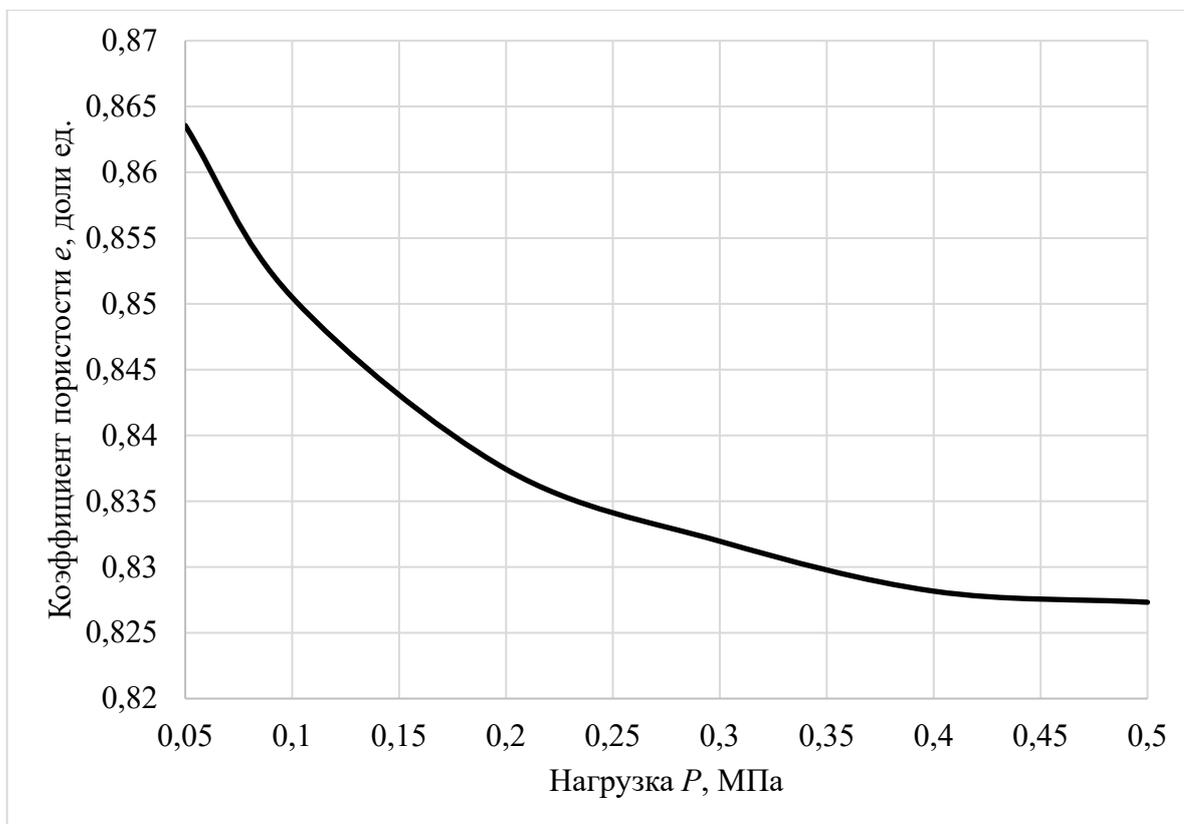


Рисунок 2.8 – Компрессионная кривая хвостов

Построение компрессионной кривой необходимо для графического определения коэффициента сжимаемости грунта a , выражаемого как:

$$a = \frac{e_1 - e_2}{P_{max} - P_{min}}, \quad (2.9)$$

где e_1 и e_2 – значения коэффициентов пористости при минимальной нагрузке P_{min} и максимальной P_{max} соответственно. Для корректности расчета коэффициента сжимаемости необходимо перевести из МПа в кг/см². В работе в качестве минимальной и максимальной нагрузки были выбраны значения 1 кг/см² и 3 кг/см², соответствующие 0,1 МПа и 0,3 МПа. Тогда коэффициент сжимаемости a будет равен:

$$a = \frac{0,850 - 0,832}{3 - 1} = 0,00927 \text{ см}^2/\text{кг} \text{ или } 9,27 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}^{-1}$$

По значению коэффициент сжимаемости грунты разделяют на сильносжимаемые ($a > 0,05 \text{ см}^2/\text{кг}$), среднесжимаемые ($a = 0,01 - 0,05 \text{ см}^2/\text{кг}$) и слабосжимаемые ($a < 0,01 \text{ см}^2/\text{кг}$). Результаты показывают, что исследуемые хвосты представляют собой слабосжимаемые грунты. Однако на практике широко используется коэффициент относительной сжимаемости, показывающий изменение объема образца при воздействии единицы давления:

$$a_0 = \frac{a}{1 + e_0} = \frac{0,00927}{1 + 0,896} = 0,00489 \text{ см}^2/\text{кг} \text{ или } 4,89 \cdot 10^{-4} \text{ МПа}^{-1}$$

По результатам проведенных исследований выявлено, что низкая сжимаемость грунтов при формировании хранилища глубоко обезвоженных хвостов существенно уменьшает риск снижения пористости до значений, при которых отложения массива быстро переходят в водонасыщенное состояние.

При проектировании хранилища обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов необходимо знание угла естественного откоса складированного материала с целью определения максимально допустимых углов откосных элементов массива. Углом естественного откоса α сыпучих материалов называют угол, образованный поверхностью откоса свободно насыпанного материала с горизонтальной поверхностью. Этот угол не зависит от высоты массива. Для определения угла естественного откоса обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов проводились лабораторные испытания методом насыпки воронкой на горизонтальную поверхность. Схема установки представлена на рисунке 2.9.

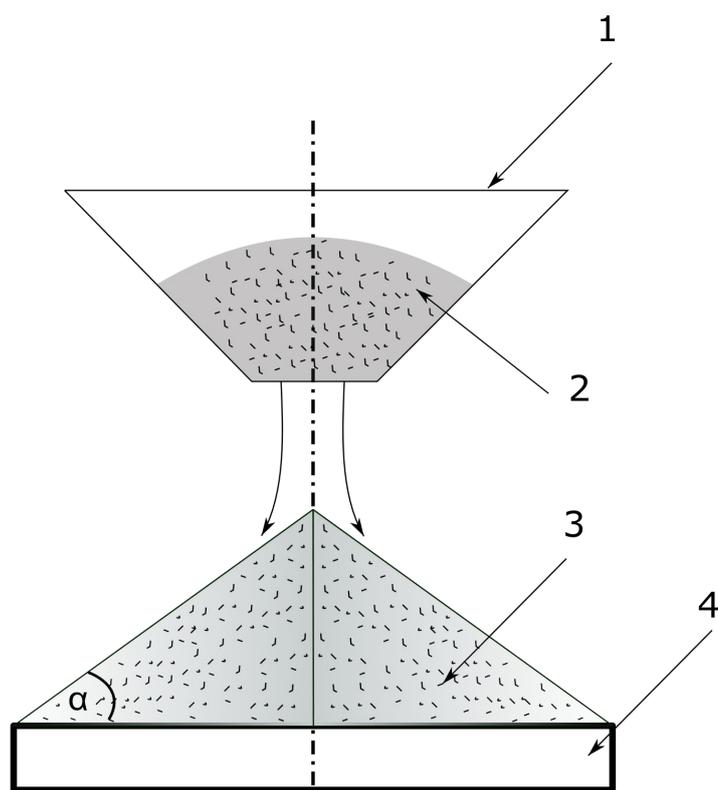


Рисунок 2.9 – Схема установки для определения угла естественного откоса отходов обогащения железистых кварцитов

1 – воронка; 2 – хвосты; 3 – свободно насыпанные хвосты; 4 – горизонтальная поверхность

Всего было проведено по 3 серии испытаний для сухих хвостов и влажных хвостов с $W = 10\%$. Средние значения α составили $31,7^\circ$ в сухом состоянии и $33,4^\circ$ во влажном. Знание угла естественного откоса исследуемого материала позволяет оценить такие параметры

формируемого хранилища отходов, как максимальную вместимость, высоту, занимаемую хвостохранилищем площадь. Однако для расчета устойчивости формируемого массива необходимо использовать такой показатель физико-механических свойств хвостов, как коэффициент внутреннего трения $tg\varphi$ или угол внутреннего трения φ . Данный показатель зависит от гранулометрического и минералогического состава хвостов, объемного веса скелета, формы частиц. Коэффициент внутреннего трения, являющийся по сути функцией крупности хвостов $d_{средний}$ и их пористости n , был определен по эмпирической формуле [210]:

$$tg\varphi = \frac{d_{cp}}{0,01 + 0,4d_{cp}} \cdot \left[1 - \frac{n \cdot (0,011 + 1,55d_{cp})}{d_{cp}} \right] \quad (2.10)$$

Подставив полученные ранее значения среднего диаметра и пористости, было получено, что угол внутреннего трения хвостов с массовой влажностью 10 % составляет $\varphi = 29,52^\circ$.

В рамках изучения влияния свойств пород на состояние техногенного массива стоит уделить особое внимание и характеристикам отходов горного производства при их поступлении в хранилище. Одним из характерных свойств рассматриваемых хвостовых пульп является вязкость, определяющая свойства пульпы при ее течении в пульпопроводе и поведение после выпуска в хвостохранилище. По вязкостным свойствам пульпы отходов обогащения твердых полезных ископаемых зачастую принадлежат к бингамовским пластикам, которые являются неньютоновскими жидкостями, характеризующиеся уравнением:

$$\tau = \tau_0 + \eta_P \frac{dU}{dn}, \quad (2.11)$$

где τ – напряжение сдвига (сила, необходимая для преодоления внутреннего трения между двумя слоями жидкости площадью S);

$\frac{dU}{dn}$ – градиент скорости сдвига;

η_P – пластическая вязкость;

τ_0 – начальное напряжение сдвига (предел текучести).

В покое такие пластические жидкости обладают достаточной прочностью внутренних связей и требуется приложить определенное усилие, чтобы вывести пульпу из состояния равновесия, в связи с чем характерная реологическая кривая течения бингамовской пластики не проходит через начало координат и в целом имеет вид прямой (рисунок 2.10). Величина касательного напряжения, при котором бингамовская жидкость начинает двигаться, называется предельным напряжением сдвига.

Объяснение поведения бингамовских пластиков исходит из предположения о наличии у покоящейся жидкости пространственной структуры, достаточно жесткой, чтобы сопротивляться любому напряжению, не превосходящему по величине τ_0 . Если напряжение превышает τ_0 то структура полностью разрушается и система ведет себя как обычная ньютоновская жидкость при

напряжениях сдвига $\tau - \tau_0$. Когда же напряжение сдвига становится меньше τ_0 структура снова восстанавливается.

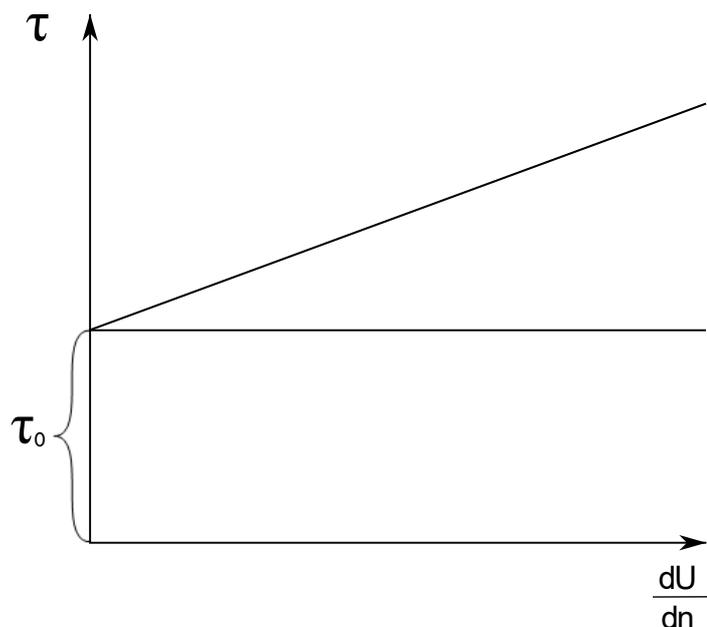


Рисунок 2.10 – Характерная реологическая кривая течения бингамовской жидкости

Для объяснения данного свойства необходимо рассмотреть состав хвостовых пульп. По своему компонентному составу пульпы являются многофазной системой, включающей дисперсионную среду, твердую дисперсную фазу и различные газы. В качестве дисперсионной среды используется вода с различной степенью минерализации и показателем pH , что зависит от состава используемых природных вод и технологии обогащения полезного ископаемого. Присутствующие в пульпах глинистые частицы обладают свойством создавать объемные структурные решетки, которые способны сопротивляться внешнему разрушающему воздействию за счет своей механической прочности. Коллоидный размер глинистых частиц ($<0,005$ мм) определяет способность твердых частиц пульпы перемещаться во всем объеме дисперсионной среды под воздействием теплового Броуновского движения. Коагуляционный и точечный типы контактов между частицами определяют способность хвостовых пульп удерживать во взвешенном состоянии твердые частицы за счет создания пространственной упругой структуры пульп. Механизм создания данной структуры также определяет и такое свойство пульп, как тиксотропия, то есть способность создавать структурную решетку в покое и разрушаться при внешнем воздействии.

Интенсивность внешнего воздействия и прочность структурной решетки, зависящая от присутствия в пульпах (особенно в сгущенных пульпах) коллоидных частиц и их концентрации,

определяет глубину и скорость разрушения структуры. Однако полное разрушение структуры концентрированной пульпы, состоящей преимущественно из глинистых частиц, труднодостижимо, так как рост интенсивности внешнего механического воздействия вызывает и увеличение числа разрушенных коагуляционных контактов, и число вновь образующихся возможных связей. В итоге при достижении равенства скоростей разрушения структуры и образования новых связей наступает динамическое равновесие. Это свойство особенно важно учитывать при оценке устойчивости техногенного массива, так как водонасыщенные техногенные отложения могут перейти в состояние повышенной текучести в результате механических воздействий, вызванных вибрациями при бурении скважин, взрывных работах на карьере, движении техники или подземных толчках.

Анализ свойств и состава отходов обогащения железистых кварцитов показал, что исследованные хвосты, представляющие собой мелкозернистые пески с низкой долей глинистых и коллоидных частиц, с малой долей вероятности будут вести себя как бингамовская пластика и переходить в подвижное состояние при внешнем воздействии.

2.4 Физико-географические факторы, определяющие условия формирования хранилищ отходов обогащения железистых кварцитов

К природным факторам в целом были отнесены физико-географические, инженерно-геологические и гидрогеологические условия формирования хранилища отходов переработки железорудного сырья (отходов обогащения железных руд). В данном пункте подробно рассмотрено влияние рельефа территории возведения хранилищ. Выбранный способ построения моделей в главе – каркасное моделирование. Результатом моделирования является получение каркасов – трехмерных цифровых моделей поверхности (ЦМП) или солидов (замкнутых объектов имеющих объем), полученных триангуляцией и состоящих из набора взаимосвязанных треугольников.

Для построения модели хранилища на первом этапе было выполнено создание топографической поверхности участка территории ведения горных работ. Были рассмотрены наиболее типичные для условий АО «Карельский окатыш» формы рельефа. С помощью географической информационной системы QGIS создавались изолинии высот, которые затем были преобразованы в набор точек для импорта в горно-геологическую информационную систему (ГГИС) Micromine Origin & Beyond 2022.5 с целью создания цифровой модели поверхности. На рисунке 2.11 показан исследованный участок на обзорной карте предприятия. Участок имеет размеры 19,60 км на 34,64 км и площадь 678,94 км².

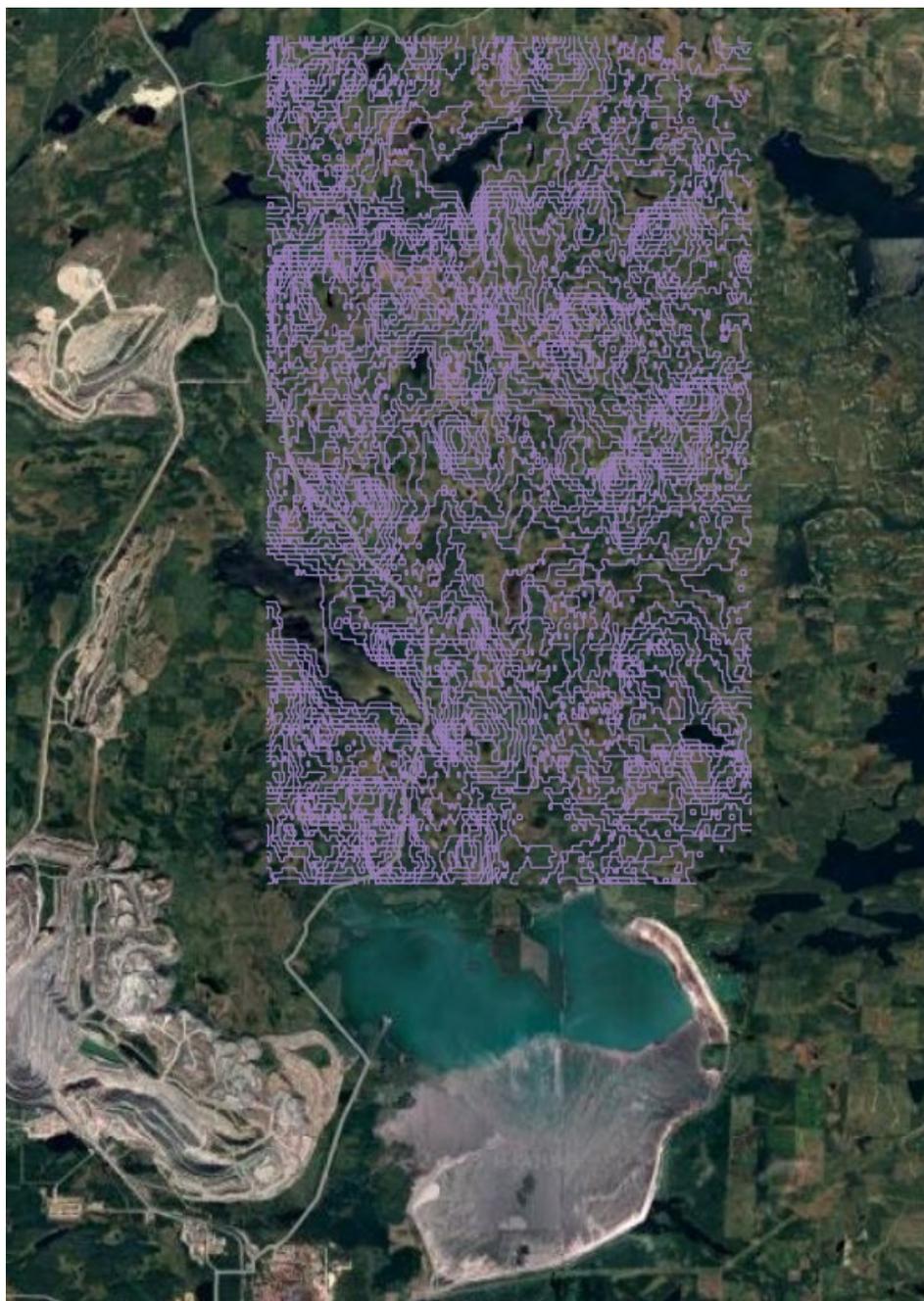


Рисунок 2.11 – Изолинии поверхности выбранного участка в QGIS

После импорта точечных данных в Micromine было выполнено построение ЦМП с использованием модуля условного моделирования. На рисунке 2.12 представлен вид сверху полученного каркаса поверхности исследованной территории.

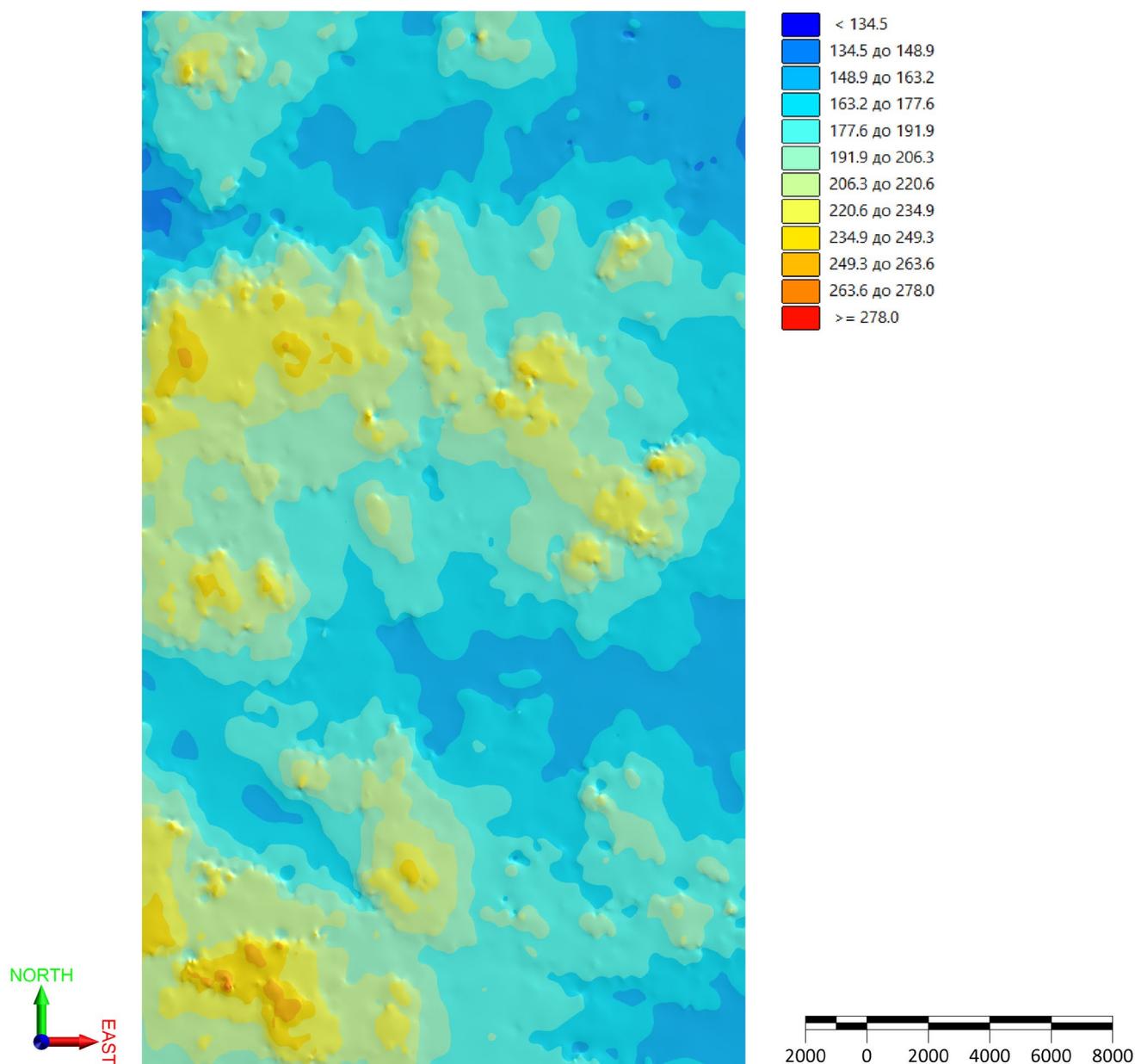


Рисунок 2.12 – Поверхность каркаса исследованного участка складирования отходов обогащения железистых кварцитов в Micromine Origin & Beyond 2022.5

Минимальные и максимальные значения абсолютной высоты составили 134,5 и 278 м соответственно. Понижение абсолютных отметок наблюдается с запада на восток. Для организации хранилища предварительно обезвоженных отходов обогащения железных руд целесообразно рассмотреть варианты их размещения в сторону понижения отметок рельефа, но не в котловинах. Это позволит избежать сбора большей части стоков в теле массива и переувлажнения массива в наиболее низкой точке – основании. На рисунке 2.13 представлена часть исследованного участка с созданными изолиниями поверхности на основе ЦМП.

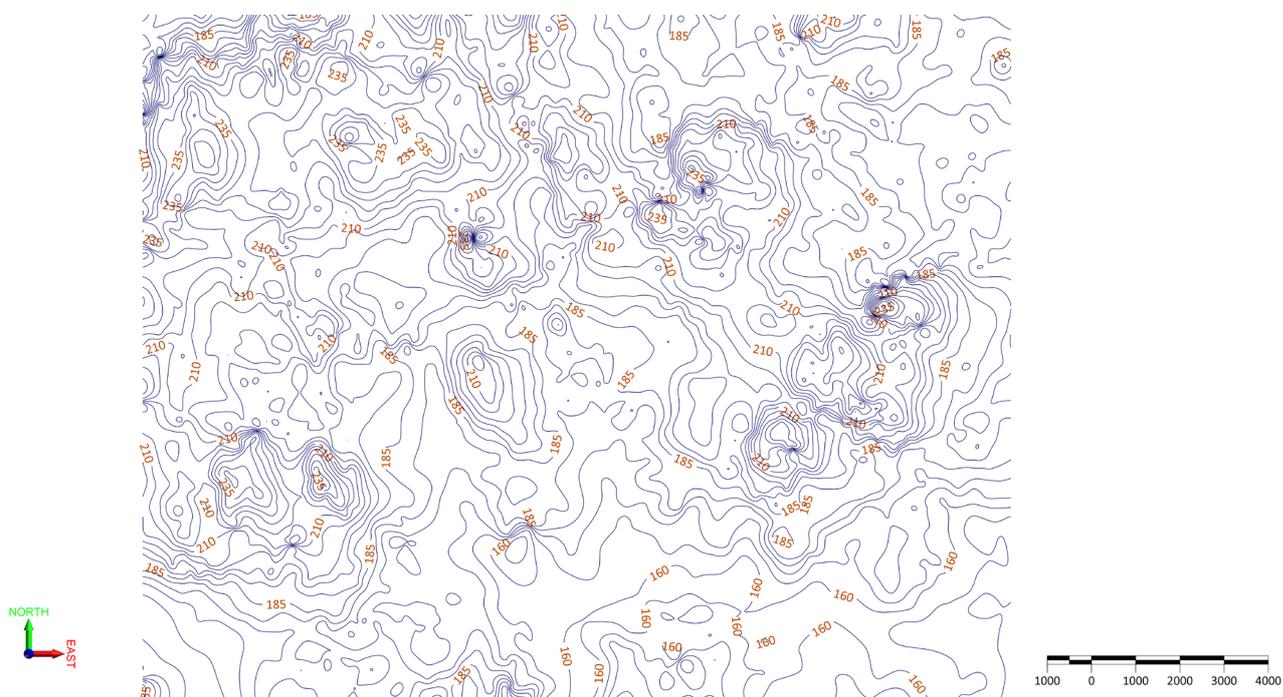


Рисунок 2.13 – Изолинии поверхности центральной части исследованного участка

Были смоделированы 4 варианта размещения хранилища площадью 39 км² каждое. Для упрощения условий моделирования хранилища в плане представляют собой квадрат со стороной 6425 м. Основные характеристики территории размещения хранилищ приведены в таблице 2.6, контуры оснований хранилищ показаны на рисунке 2.14.

Таблица 2.6 – Основные характеристики рельефа территории размещения хранилищ

<i>Характеристики рельефа оснований хранилищ</i>	<i>Номер хранилища</i>			
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Минимальная абсолютная отметка высоты, м	178	154	170	155
Максимальная абсолютная отметка высоты, м	252	213	278	210
Перепад абсолютных высот, м	74	59	108	55
Средняя минимальная абсолютная отметка высоты, м	190	160	210	160
Средняя максимальная абсолютная отметка высоты, м	225	175	240	190
Перепад абсолютных средних высот, м	35	15	30	30

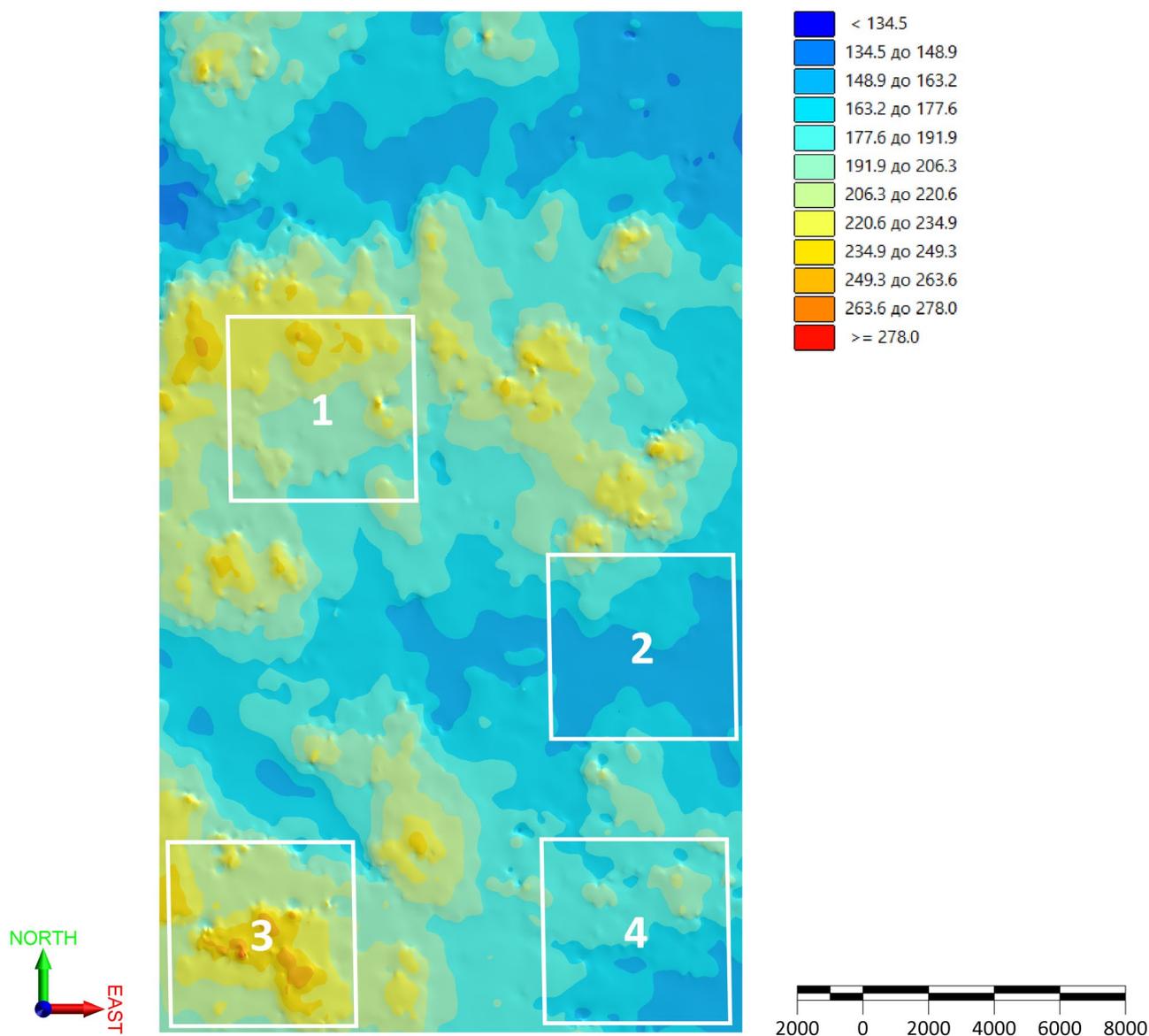


Рисунок 2.14 – Контуры оснований хранилищ отходов обогащения железных руд

Приведем краткое описание территории размещения каждого из моделируемых хранилищ:

- рельеф площадки размещения хранилища 1 характеризуется отчетливым понижением отметок поверхности с севера на юг, среднее значение абсолютной высоты участка – 207,5 м;
- хранилище 2 расположено в отрицательной форме рельефа, однако плавное понижение отметок с запада на восток на данном участке не позволяет рассматривать данный рельеф как котловину (перепад 5–6 м, на рисунке 2.12 не отображено из-за выбранного интервала штриховки). Среднее значение абсолютной высоты участка – 167,5 м;

- в центральной части площадки хранилища 3 наблюдаются максимальные отметки высоты, понижение рельефа идет преимущественно на северо-восток и юго-запад от центральной точки. Среднее значение абсолютной высоты участка – 225,0 м;
- планомерное понижение рельефа она юго-восток отчетливо наблюдается на участке размещения хранилища 4. Среднее значение абсолютной высоты участка – 175,0 м.

Для создания ЦМП площадки размещения отходов производилась операция усечения созданных изолиний поверхности контуром оснований хранилищ. Перед этим изолинии были преобразованы в файл стрингов, имеющего расширение *.str*, что упрощает работу и делает возможным выполнение последующих этапов моделирования.

Так как изначальный контуры оснований представляет собой плоскость и не соответствует рельефу поверхности, с помощью инструмента «Новый стринг» производилось построение новых контуров оснований посредством последовательного соединения усеченных стрингов изолиний по краевым точкам. Итоговые ЦМП площадок формирования хранилищ показаны на рисунке 2.15.

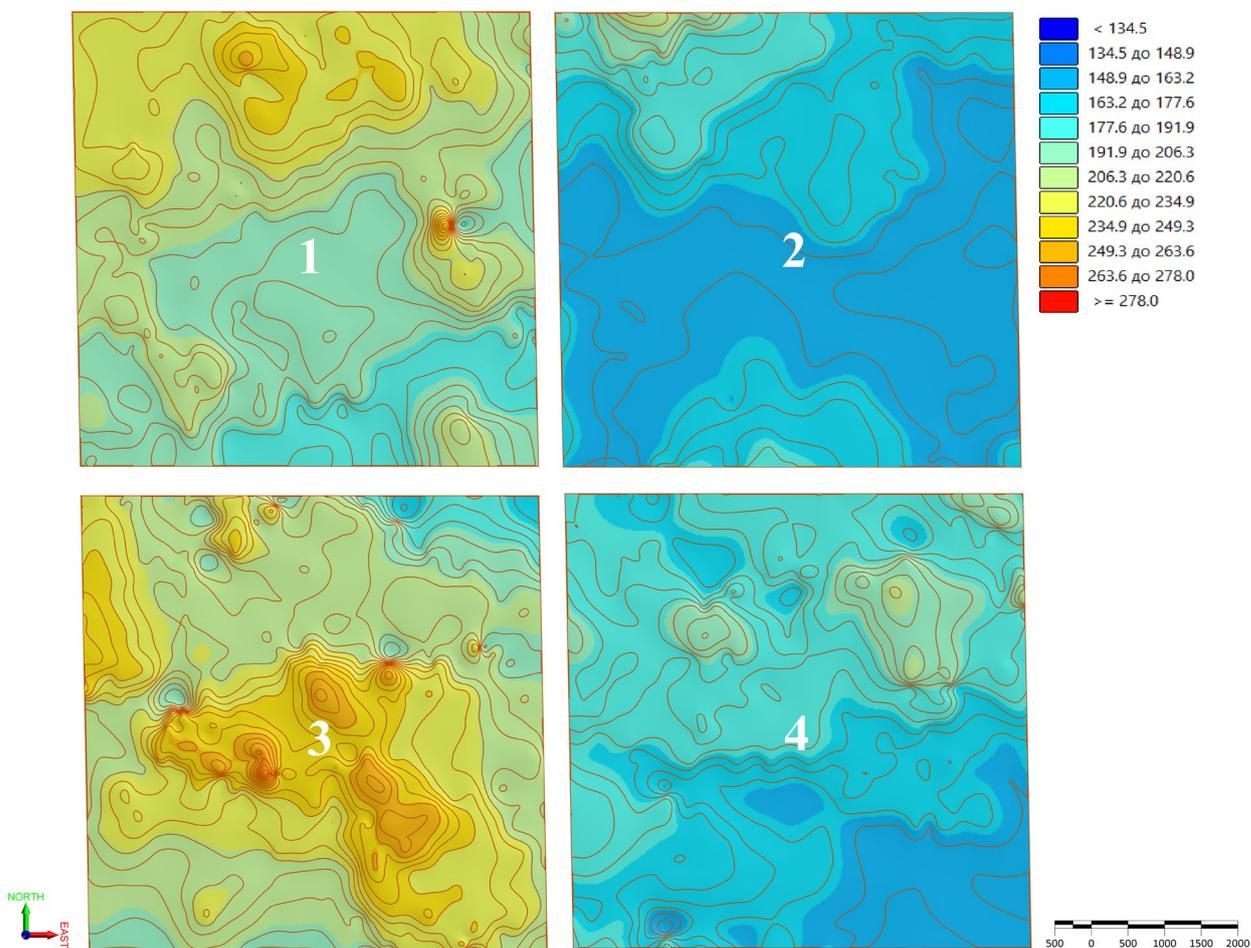


Рисунок 2.15 – Цифровые модели поверхности оснований хранилищ с нанесенными изолиниями поверхности

При создании моделей всех хранилищ были использованы единые параметры моделирования. Оценивался объем каркасной модели каждого из хранилищ, что служило основой для анализа влияния фактора рельефа. Для приближения моделей к реальным условиям возведения техногенных массивов производилось также моделирование со всех сторон ограждающих дамб, формирующих емкость хранилища. Для упрощения модели в качестве ограждающей дамбы был принят наиболее высокий откос существующего хвостохранилища АО «Карельский окатыш» – вторичная дамба Южного борта высотой 30,93 м (округлим до 31 м). Другие параметры дамбы выбирались также на основе проектной документации [189]: ширина по гребню – 13 м, крутизна генерального откоса дамбы – не менее 1 : 5, крутизна внутреннего откоса – не менее 1 : 2.

При создании каркасов на каждом шаге объединения стрингов получаемая поверхность каркаса проверялась на правильность соединения и неверную триангуляцию, ошибки исправлялись. В итоге получался верный с математической точки зрения каркас, в котором отсутствовали неверные соединения и пересечения треугольников. Для вычисления объема каркаса необходимо было закрыть незамкнутые срезы модели, такой каркас носит название «Солид».

На первом шаге производилось моделирование ограждающих дамб с 4-х сторон хранилища. Изначально при моделировании дамбы представляли собой в разрезе трапеции, имеющие длину нижнего основания 234 м, верхнего основания 13 м, и внутренние углы 11,3° (генеральный угол) и 26,6° (угол внутреннего откоса). Нижнее основание не повторяло рельеф, поэтому в Microtoppe при помощи функции пересечений каркасов была произведена операция усечения каркасов дамб полученной ЦМП, именуемая «Солид над поверхностью». В таблице 2.7 показаны объемы дамб до и после операции усечения ЦМП. На рисунке 2.16 показана разница дамб в разрезе. Черным цветом обозначен контуры исходной дамбы, розовым – дамба после усечения ЦМП. Результаты построения дамб хранилищ рассмотренных 4-х вариантов рельефа представлены на рисунке 2.17.

Таблица 2.7 – Сравнение объемов ограждающих дамб, усеченных и неусеченных ЦМП

<i>№ хранилища</i>	<i>Объем дамб до усечения, млн м³</i>	<i>Объем дамб после усечения, млн м³</i>	<i>Относительное изменение объема дамб, %</i>
1	89,899	88,864	-1,151
2	90,227	95,984	+6,381
3	89,967	78,387	-12,871
4	90,039	93,479	+3,821

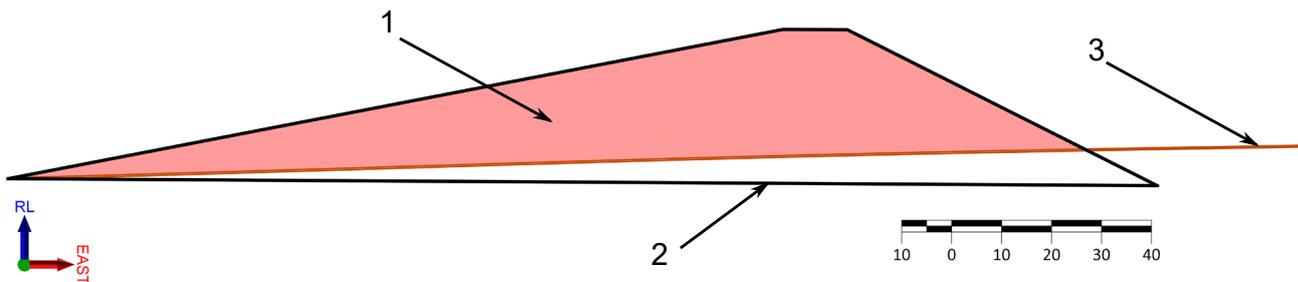


Рисунок 2.16 – Сравнение исходной и усеченной дамбы в разрезе западной ограждающей дамбы хранилища № 3

1 – усеченная ограждающая дамба; 2 – контур исходной ограждающей дамбы;
3 – основание хранилища

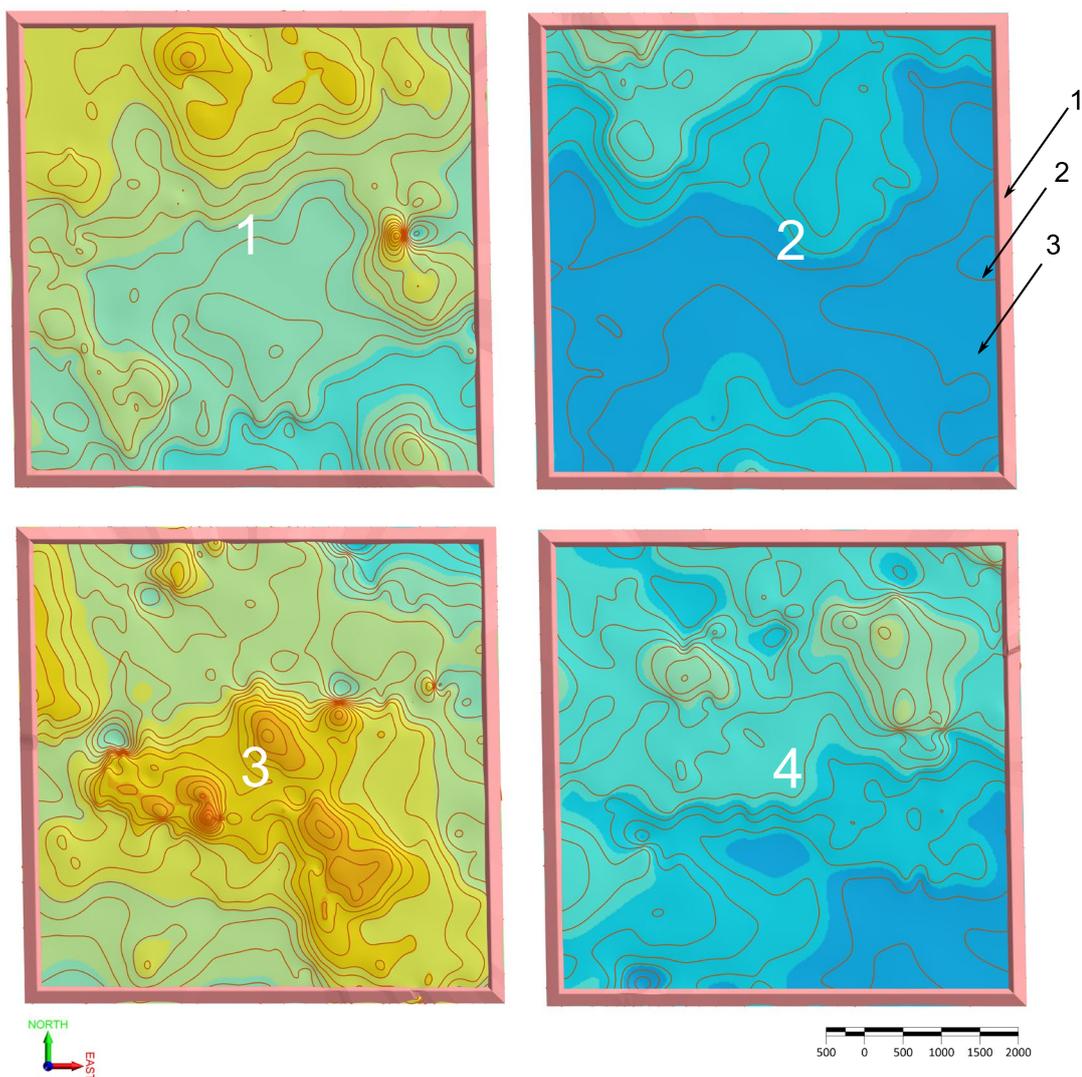


Рисунок 2.17 – Вид в плане каркасных моделей ограждающих дамб вместе с ЦМП и изолиниями поверхности

1 – ограждающая дамба; 2 – изолинии поверхности; 3 – цифровая модель поверхности

Следующим шагом было построение тела массива, заключенного между верхней и нижней бровками верхнего бьефа дамб. Усечение каркаса тела массива производилось ЦМП и каркасом ограждающих дамб. Вид в плане каркасных моделей тел массива вместе с ограждающими дамбами, ЦМП и линиями поперечных разрезов приведен на рисунке 2.18. Тело массива показано серым цветом.

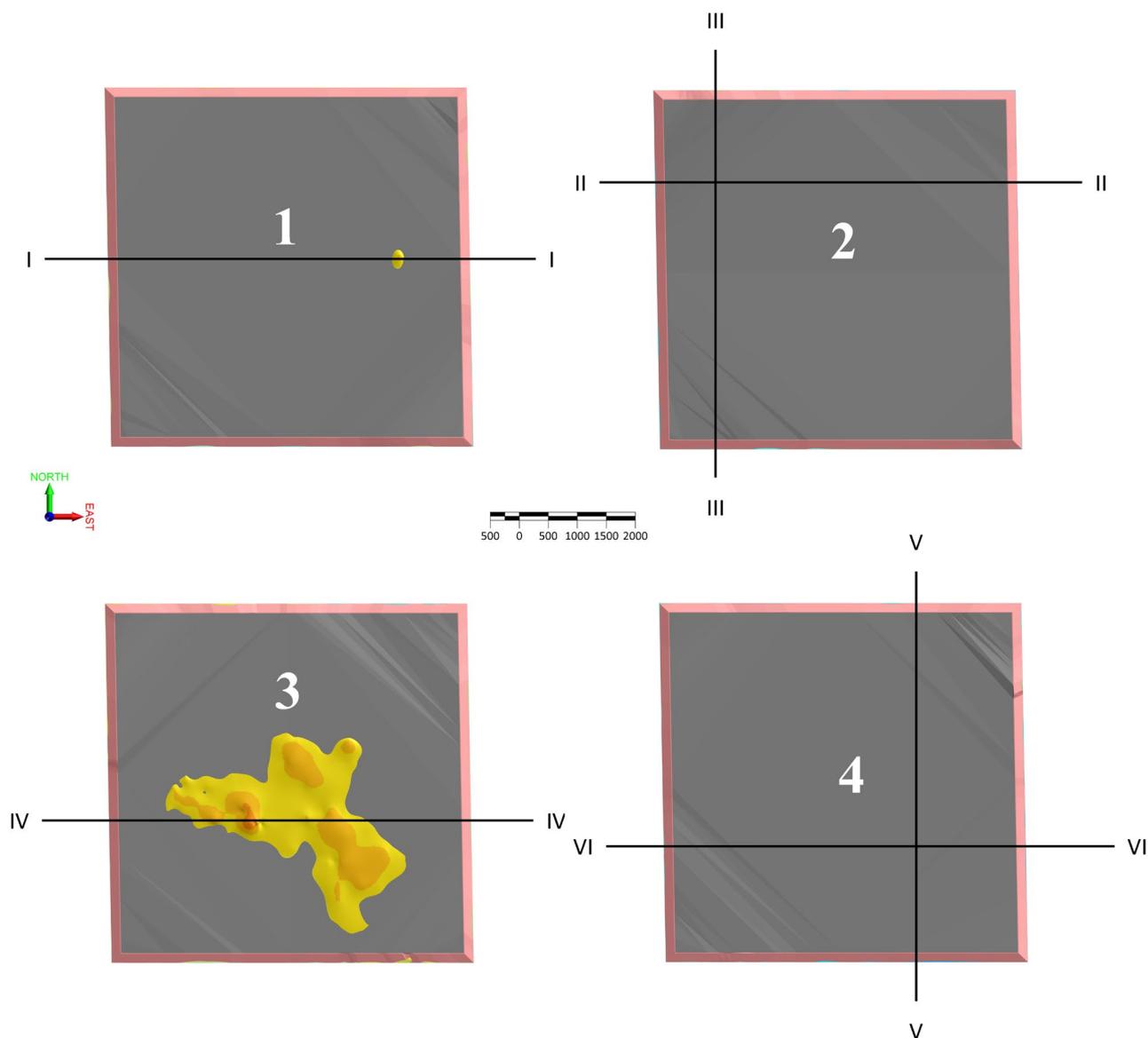


Рисунок 2.18 – Вид в плане каркасных моделей тел массива вместе с ограждающими дамбами, ЦМП и линиями разрезов

Как видно из рисунка 2.18, только в случаях 2 и 4 тело массива целиком покрывает своей толщиной рельеф основания хранилища. Это связано с принятыми параметрами дамб, возведенными на максимальную высоту 31 м относительно контура хранилища, в результате чего

максимальные абсолютные отметки поверхности оснований хранилищ в случаях 1 и 3 превышают максимальную абсолютную высоту тела массива.

Смоделированные хранилища отходов обогащения железных руд являются одноярусными техногенными массивами и состоят из трех элементов – цифровой модели поверхности, солида ограждающих дамб и солида тела массива. Поднятия и опускания рельефа влияют на вид дамб и тело массива в плане и разрезе, объемы дамб и тела. В полученной модели отсутствуют пустые прослойки – в каждом единичном объеме на границах элементов модели присутствует контакт между поверхностями как минимум двух каркасов. Это хорошо отображено на рисунках 2.19–2.24, представляющих поперечные разрезы моделей хранилищ по показанным на рисунке 2.18 линиям разрезов.

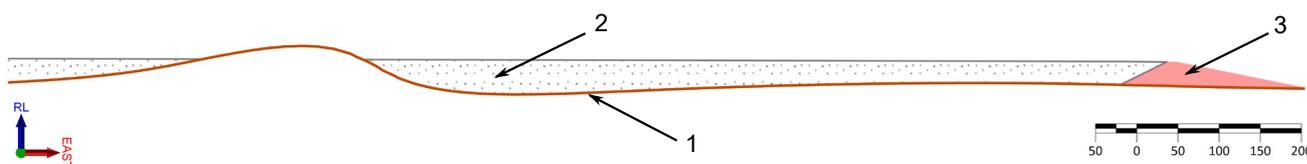


Рисунок 2.19 – Поперечный разрез по линии I–I, восточная дамба

1 – основание хранилища; 2 – тело массива (хвосты); 3 – ограждающая дамба

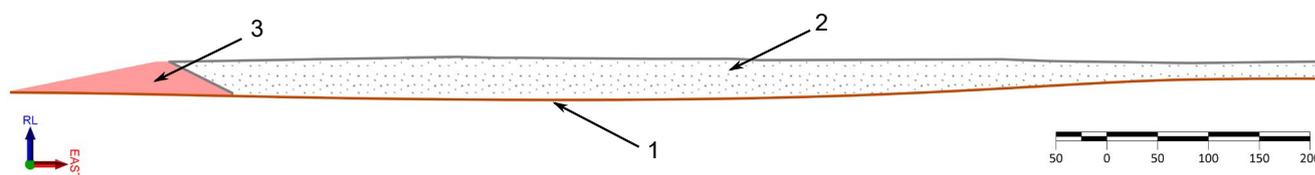


Рисунок 2.20 – Поперечный разрез по линии II–II, западная дамба

1 – основание хранилища; 2 – тело массива (хвосты); 3 – ограждающая дамба

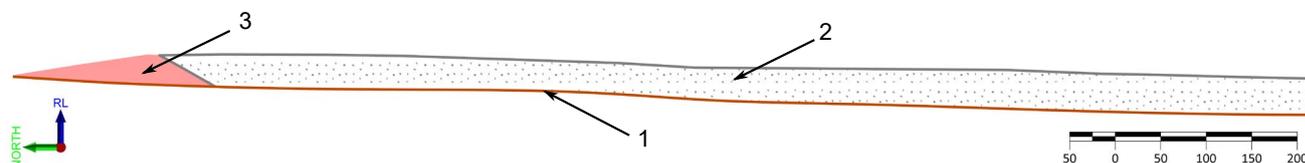


Рисунок 2.21 – Поперечный разрез по линии III–III, северная дамба

1 – основание хранилища; 2 – тело массива (хвосты); 3 – ограждающая дамба

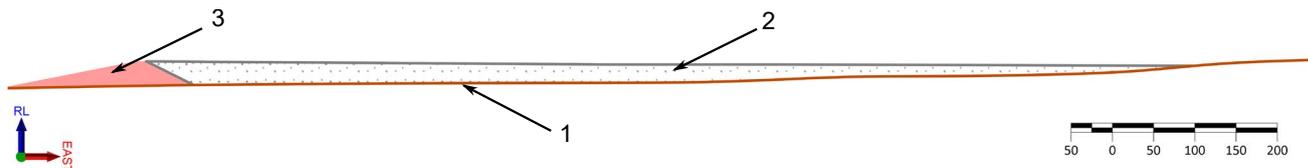


Рисунок 2.22 – Поперечный разрез по линии IV–IV, западная дамба

1 – основание хранилища; 2 – тело массива (хвосты); 3 – ограждающая дамба

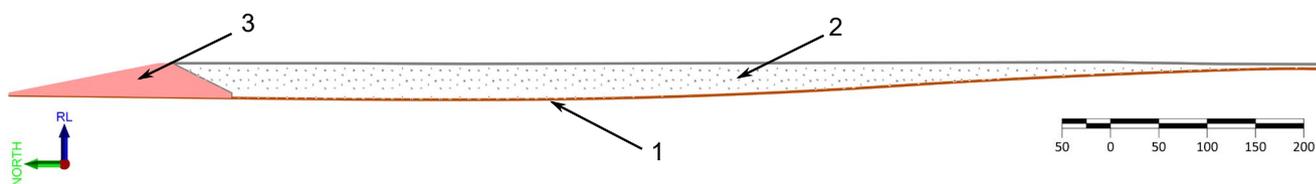


Рисунок 2.23 – Поперечный разрез по линии V–V, северная дамба

1 – основание хранилища; 2 – тело массива (хвосты); 3 – ограждающая дамба

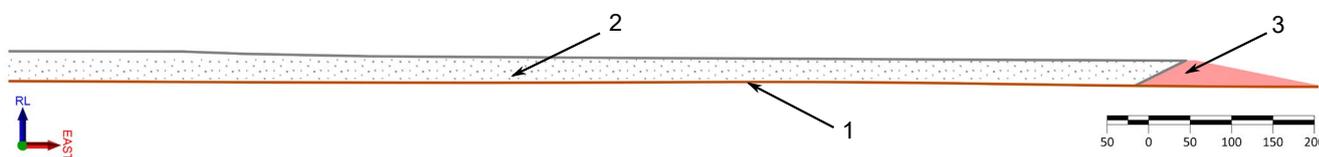


Рисунок 2.24 – Поперечный разрез по линии VI–VI, восточная дамба

1 – основание хранилища; 2 – тело массива (хвосты); 3 – ограждающая дамба

По результатам моделирования можно заключить, что наибольшей вместимостью в 1171,248 млн м³ хвостов обладает хранилище № 2, возводимое на относительно ровном участке, с минимальным перепадом абсолютных средних отметок высоты (15 м) среди рассмотренных вариантов и плавным понижением рельефа с запада на восток. Одновременно вариант № 2 является наиболее землеемким в абсолютном выражении – при возведении ограждающих дамб требуется 95,984 млн м³ материала для обвалования. Однако если взять отношение объема дамб к объему тела массива, то для заполнения хранилища 2 на 1 млн м³ хвостов требуется возведение 81,950 тыс. м³ дамб. Данный показатель является самым низким среди исследованных вариантов организации хранилища. Полученные параметры смоделированных хранилищ приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Параметры смоделированных хранилищ

<i>Параметры хранилищ</i>	<i>Номер хранилища</i>			
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
Минимальная мощность тела массива, м	0	16	0	3
Максимальная мощность тела массива, м	45	42	51	55
Объем ограждающей дамбы, млн м ³	88,864	95,984	78,837	93,479
Объем тела массива, млн м ³	995,624	1171,248	618,546	1080,826
Отношение объема дамбы к объему тела массива, %	8,925	8,195	12,746	8,649

При анализе вместимости хранилища необходимо учитывать также и плотность складированного в хранилище материала, так как полезная вместимость оценивается по объему уложенных хвостов в сухом состоянии. При одновременном намыве в хранилище № 2 1171,248 млн м³ пульпы с содержанием твердого 4,8 % полезный объем уложенных хвостов на площади 39 км² составит всего 20,444 млн м³ (без учета фильтрации воды через дамбы и ее испарения). Сравнение полезной вместимости хранилищ в зависимости от концентрации твердого в пульпе (степени обезвоживания) показано в таблице 2.9. Расчет сделан для исследованных хвостов с плотностью минеральных частиц 2750 кг/м³ и насыпной плотностью в сухом состоянии 1450 кг/м³. Для более понятного визуального представления данных таблиц 2.8 и 2.9 информация в виде столбчатых диаграмм показана на рисунках 2.25 и 2.26 соответственно.

Таблица 2.9 – Сравнение объема хвостов при различной плотности складированного материала

Параметры хранилищ	Номер хранилища			
	1	2	3	4
Вместимость хранилища V , млн м ³	995,624	1171,248	618,546	1080,826
Объем хвостов при концентрации твердого 4,8 %, млн м ³	17,378	20,444	10,796	18,865
Объем хвостов при концентрации твердого 45 %, млн м ³	162,920	191,659	101,217	176,862
Объем хвостов при $W = 10$ %, млн м ³	851,258	1001,417	528,857	924,106

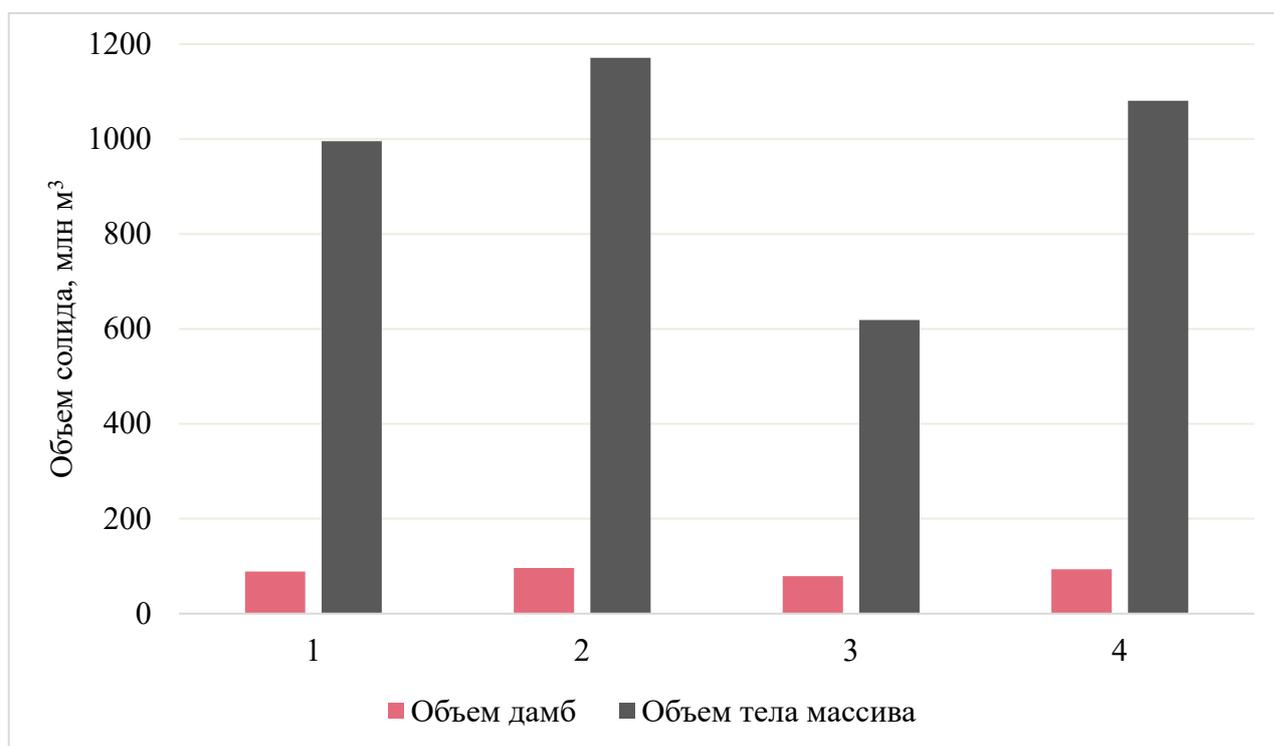


Рисунок 2.25 – Сравнение объемов дамб и тела массива в зависимости от типа рельефа

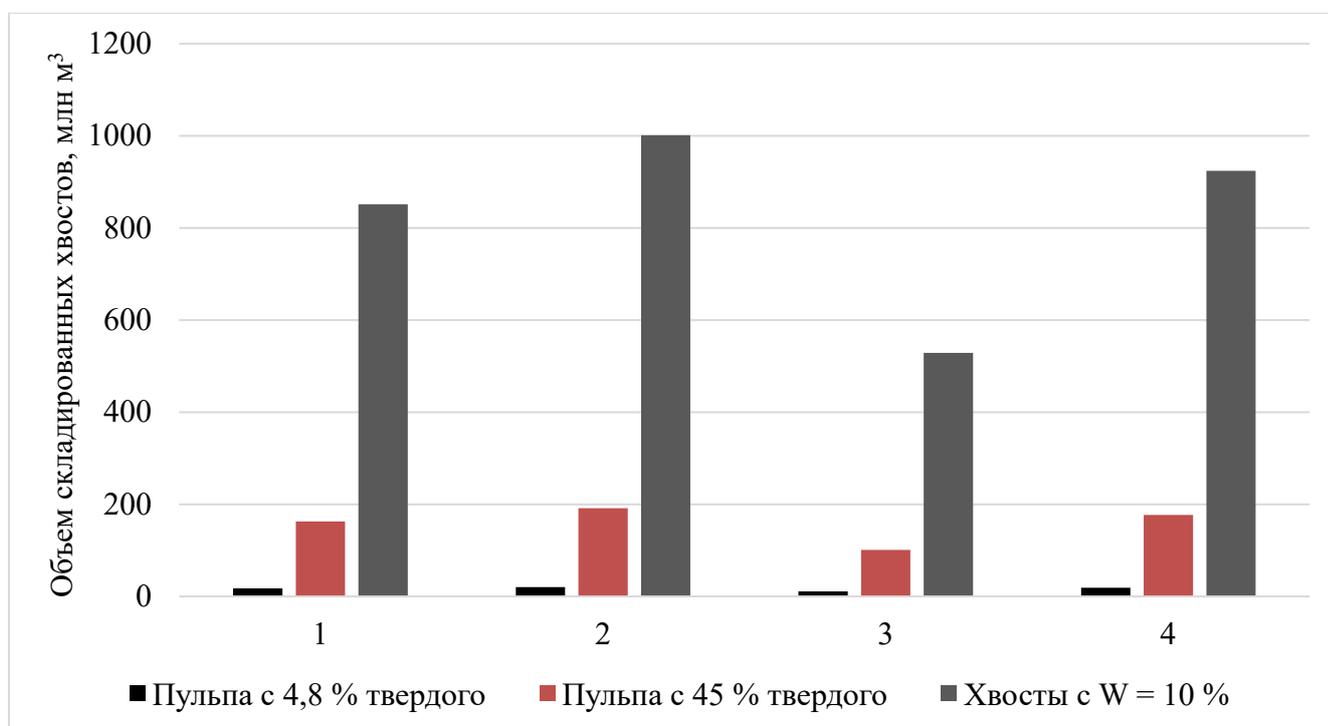


Рисунок 2.26 – Сравнение вместимости хранилищ в зависимости от плотности складываемой пульпы и типа рельефа

Проанализированные модели по способу возведения дамб являются хвостохранилищами наливного типа, содержащих хвосты в той концентрации, при которой они были выпущены в хранилище. В действительности вода, поступающая с твердой частью хвостов, расходуется из хранилища за счет откачки из прудка на внутренний водооборот, потерь испарением из прудка и с суши (пляжа), фильтрации через дамбы и плотины, сброса дебалансных вод. В итоге массив хвостов представлен преимущественно водонасыщенными отложениями с S_r больше 0,8 и вплоть до 1, а полезный объем хвостов в «сухом» хранилище превышает полезный объем намывных и наливных хвостохранилищ на величину объема воды, которая не поступила в емкость с пульпой. Сравним объемы водонасыщенных отложений с $S_r = 0,8$ (нижняя граница водонасыщенного состояния) и хвостов с $W = 10\%$. Рассчитаем объем сухих хвостов при определенном ранее $e = 0,896$. Весовая влажность W при $S_r = 0,8$ составит:

$$S_r = \frac{W \cdot \rho_{\text{хв.ист}}}{\rho_{\text{воды}} \cdot e} = \frac{0,10 \cdot 2,75}{1,0 \cdot 0,896} = 0,307$$

$$W = \frac{S_r \cdot e \cdot \rho_{\text{воды}}}{\rho_{\text{хв.ист}}} = \frac{0,8 \cdot 0,896 \cdot 1}{2,75} = 0,2606 \text{ или } 26,06\%$$

Тогда объемная влажность отложений при $S_r = 0,8$ %:

$$W_0 = \frac{W \cdot \rho_{\text{хв.сух}}}{\rho_{\text{воды}}} = \frac{26,06 \cdot 1,45}{1,0} = 0,3779 \text{ или } 37,79\%$$

Это означает, что в 1 м³ отложений содержится 377,9 м³ воды и 622,1 м³ хвостов. Значит при вместимости хранилища № 1 $V_1 = 995,624$ млн м³ в нем содержится 376,246 млн м³ воды и 619,378 млн м³ хвостов. Аналогичный подсчет для глубоко обезвоженных хвостов с $W = 10\%$ и $S_r = 0,307$ показывает, что объем воды всего 144,366 млн м³, а хвостов 851,258 млн м³. Результаты расчетов для четырех вариантов рельефа приведены в таблице 2.10, столбчатая диаграмма на рисунке 2.27 отображает разницу объемов хвостов.

Таблица 2.10 – Сравнение объемов при складировании хвостов с разной водонасыщенностью

Параметры хранилищ	Номер хранилища			
	1	2	3	4
Вместимость хранилища V , млн м ³	995,624	1171,248	618,546	1080,826
Объем хвостов при $S_r = 0,8$, млн м ³	619,378	728,633	384,797	672,382
Объем воды при $S_r = 0,8$, млн м ³	376,246	442,615	233,749	408,444
Объем хвостов при $W = 10\%$, млн м ³	851,258	1001,417	528,857	924,106
Объем воды при $W = 10\%$, млн м ³	144,366	169,831	89,689	156,720
Разница объемов хвостов, %	37,438			

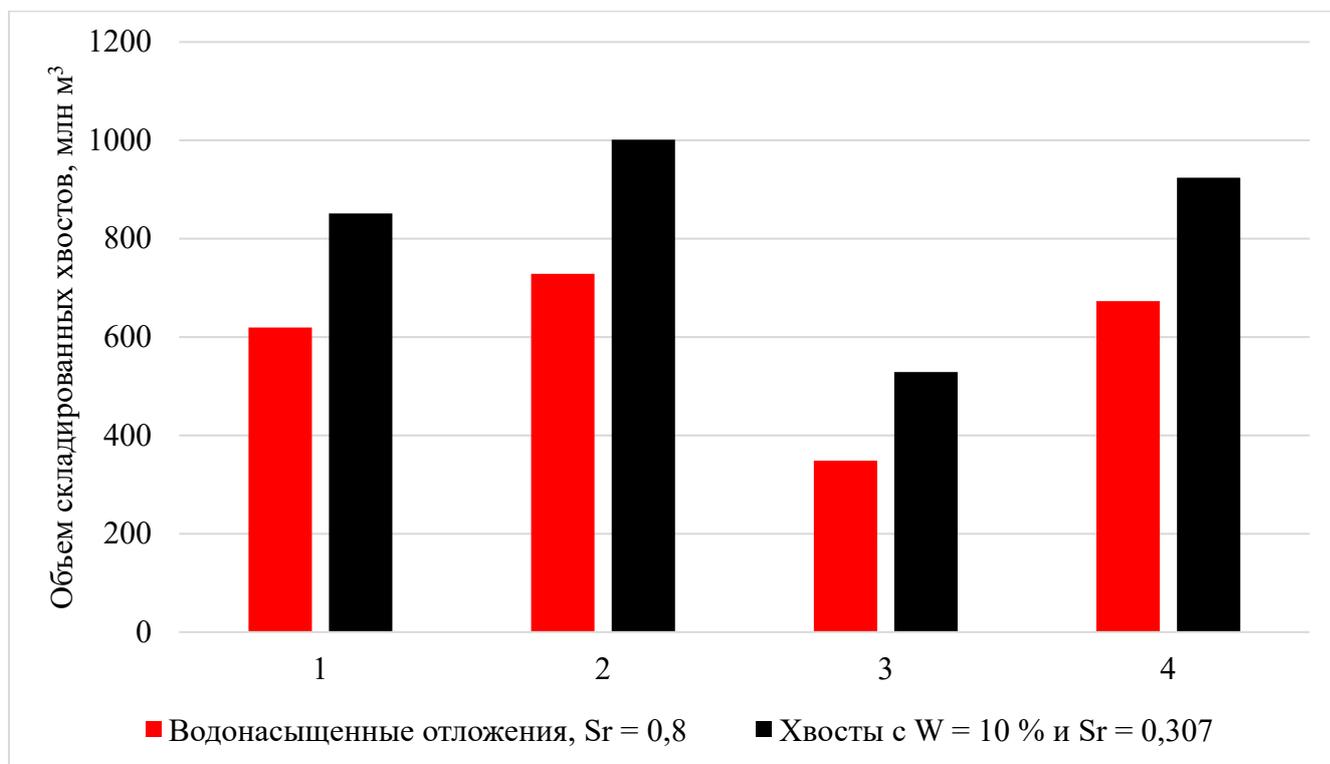


Рисунок 2.27 – Сравнение вместимости хранилищ в зависимости от коэффициента водонасыщения отложений

Хранилища, сложенные отложениями с коэффициентом водонасыщения менее 0,5, позволяет вместить прежний объем хвостов на меньшей площади и/или увеличить высоту массива вследствие более высоких прочностных свойств материала. Так определенный автором угол естественного откоса влажных хвостов $\alpha = 33,4^\circ$ делает возможным повышение генерального угла хранилища с проектных $11,3^\circ$. Во избежание деформаций и аварийной ситуации рекомендуется выбирать меньший угол, поэтому в работе примем угол откоса массива хвостов равным 20° .

Для оценки экономии территории рассмотрим возведение массива глубоко обезвоженных хвостов на рельефе № 1, параметры ограждающей дамбы оставим прежние. Был смоделирован массив со средней мощностью отложений 50 м. Ограждающие дамбы в данном случае требуются для предотвращения растекания массива хвостов в случае их переувлажнения и перехода в водонасыщенное и подвижное состояние. Поэтому возведение дамбы требуется только в наиболее низкой части рельефа хранилища. Вид хранилища в плане и разрез тела массива глубоко обезвоженных хвостов представлены на рисунках 2.28 и 2.29.

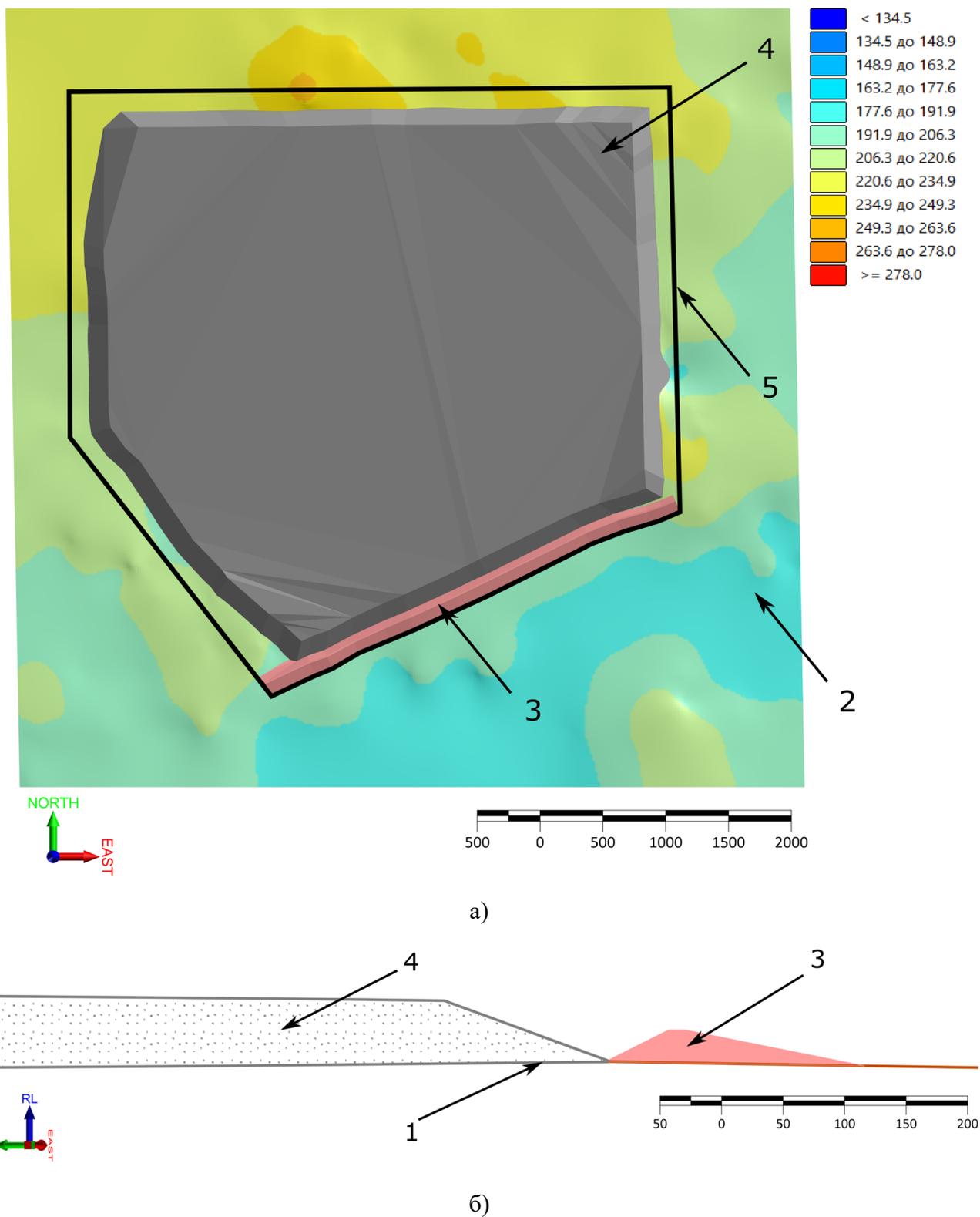


Рисунок 2.28 – Общий вид оптимизированного хранилища глубоко обезвоженных отходов переработки железорудного сырья на рельефе № 1

а – в плане; б – в разрезе

1 –основание хранилища; 2 – ЦМП основания хранилища; 3 – оградящая дамба;

4 – тело массива (хвосты); 5 – контур хранилища

Контур площадки хранилища спроектирован с учетом возможности дальнейшего наращивания высоты массива. В случае активизации деформационных процессов незанятая территория выполняет роль зоны безопасности и обеспечивает удержание на своей площади хвостов при оползнях или других горно-геологических явлениях. Параметры хранилища приведены в таблице 2.11. Относительные площадь и вместимость рассчитывались применительно к хвостохранилищу № 1 с $S_r = 0,8$ на $S = 39 \text{ км}^2$.

Таблица 2.11 – Параметры оптимизированного хранилища на рельефе № 1

<i>Параметр</i>	<i>Значение параметра</i>
Площадь хранилища в пределах контура, км ²	21,83
Вместимость хранилища, млн м ³	796,761
Объем хвостов при $W = 10 \%$, млн м ³	681,231
Объем дамбы, млн м ³	13,215
Площадь хранилища глубоко обезвоженных хвостов относительно хранилища водонасыщенных отложений, %	56,0
Вместимость хранилища глубоко обезвоженных хвостов относительно хранилища водонасыщенных отложений, %	110,0
Отношение объема дамбы к объему тела массива, доли ед.	0,017

Предлагаемое хранилище обеспечивает размещение 681,231 млн м³ хвостов, что на 10,0 % больше наливного хранилища, сложенного водонасыщенными техногенными отложениями. При этом площадь хранилища меньше на 44,0 % и имеет запас для повышения вместимости без отчуждения дополнительных территорий. При сравнении указанных хранилищ с возведением только одной южной ограждающей дамбы в наиболее низкой части рельефа объем земляных работ становится меньше на 36,72 % – отношение объемов дамбы к телу массива сокращается с 2,097 % до 1,659 %. Однако намывные хранилища, формируемые на данном рельефе, требуют возведения дамб с трех сторон во избежание растекания хвостов при их намыве. Поэтому максимальное сокращение объема дамб достигает значения 76,40 % – с 5,627 % до 1,659 % или более чем в 4,24 раза.

Можно сделать вывод, что целесообразно рассматривать разные формы рельефа для организации хранилищ отходов обогащения руд с различной концентрацией твердого в пульпе. Можно дать следующие рекомендации:

1. Складирование рядовых несгущенных пульп рекомендуется производить на рельефах № 1 или № 4 с организацией намыва от дамбы в сторону понижения рельефа. Средний перепад высот 35-30 м обеспечит движение пульпы под действием силы тяжести и ее фильтрацию через

нижние дамбы. Наибольшая вместимость этих хранилищ компенсирует складирование пульп с низкой концентрацией твердого.

2. Складирование стущенных пульп рекомендуется производить на рельефах № 2 и № 3. Практически вдвое меньшая вместимость хранилища № 3 в сравнении с хранилищем № 2 может компенсироваться аккумуляцией большей массы хвостов, так как плотность стущенных пульп существенно выше. Выпуск стущенных пульп может производиться как от дамбы, так и из центральной наивысшей точки хранилища в направлении дамб.

3. Складирование глубоко обезвоженных хвостов, перекачка которых по пульпопроводам невозможна, будет производиться исключительно насыпным способом. Можно рекомендовать размещение хвостов на ровном рельефе, но целесообразнее площадкой хранилища выбирать рельеф № 3 как наиболее пересеченный и непригодный для ведения иной хозяйственной деятельности, или рельеф № 1. Складирование можно производить послойно. Снизить объем земляных работ при складировании хвостов в условно сухом состоянии получается за счет снижения отводимой под хранилище площади вследствие высокой плотности укладки и/или обвалования хранилища с одной-трех сторон.

2.5 Определение вместимости хранилищ отходов переработки железорудного сырья при различных физико-механических свойствах их отложений

В данном пункте выполнено сравнение максимальной вместимости хранилищ отходов обогащения железистых кварцитов при изменении физико-механических свойств хвостов. Исследована возможность сокращения объема земляных работ в результате складирования пульп с более высокой плотностью. Создание моделей для анализа производилось в горно-геологической информационной системе Micromine Origin & Beyond 2022.5.

Для анализа была выбрана ровная площадка размещения хранилища площадью $S = 4 \text{ км}^2$. Моделировались два типа хранилищ: намывное с ограждающими дамбами и насыпь, представленная глубоко обезвоженным хвостами. Параметры ограждающих дамб были взяты из проекта Нового отсека хвостохранилища предприятия [189]:

- Ширина дамбы по гребню – 12 м;
- Высота дамбы – 3,5 м;
- Крутизна низовых и верховых откосов – 1 : 1,5. В этом случае длина проекции откоса составит 5,25 м, итоговая ширина основания дамбы 22,5 м, угол откоса основания – 33,7°;
- Генеральное заложение низового откоса – не менее 1 : 5.

Исследование вместимости хранилища на заданной площади включало анализ массы и объема складированных хвостов при различной влажности глубоко обезвоженных отходов и

водонасыщенности отложений. Целью исследования являлся поиск оптимальной площади хранилища для сокращения объема земляных работ при возведении дамб; определение объема воды, необходимого для перехода отложений массива в водонасыщенное состояние для обеспечения устойчивости откосов; анализ изменения свойств отложений при нагрузке последующими слоями хвостов.

При складировании хвостов нижележащие слои подвергаются возрастающей нагрузке, изменяется пористость и плотность отложений. Изменение этих характеристик также влияет на водопроницаемость отложений – с ростом нагрузки фильтрационные свойства падают. На рисунках 2.29–2.31 показаны изменение пористости, плотности и коэффициента фильтрации хвостов при нагружении в диапазоне 0,1–0,5 МПа. Исследованные хвосты являются слабосжимаемыми и при нагрузке свыше 0,5 МПа изменения характеристик практически не наблюдается.

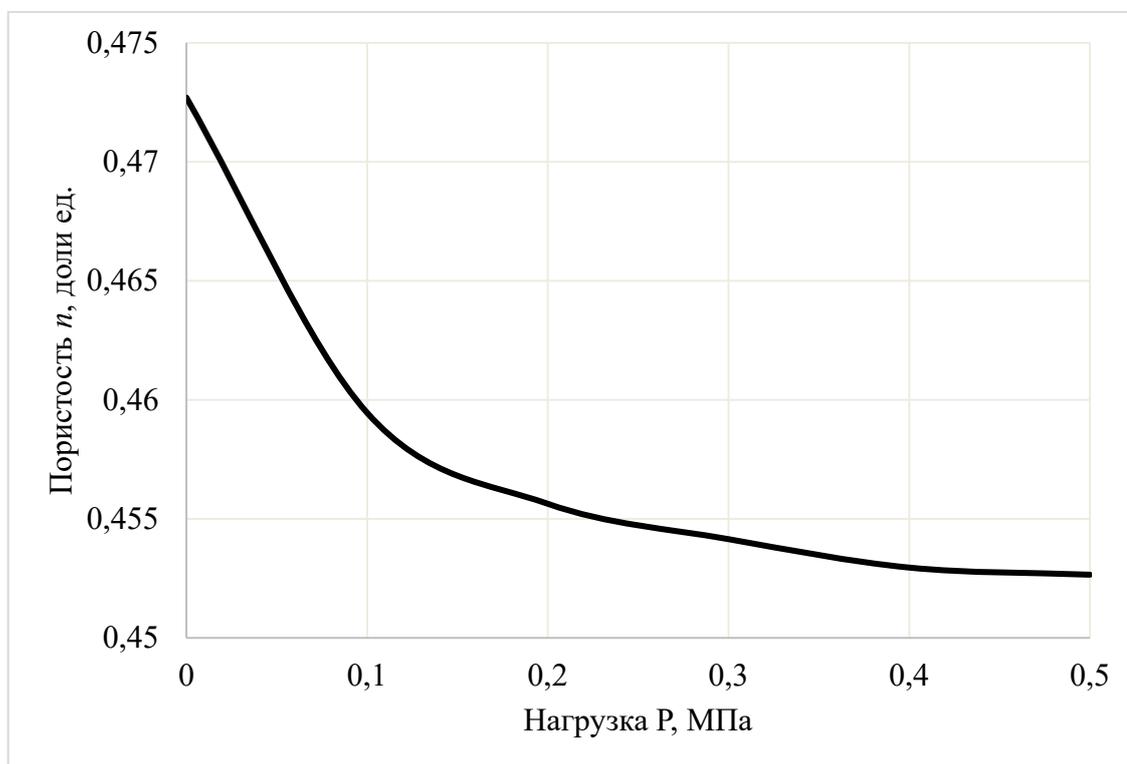


Рисунок 2.29 – Изменение пористости сухих хвостовых отложений при нагрузке

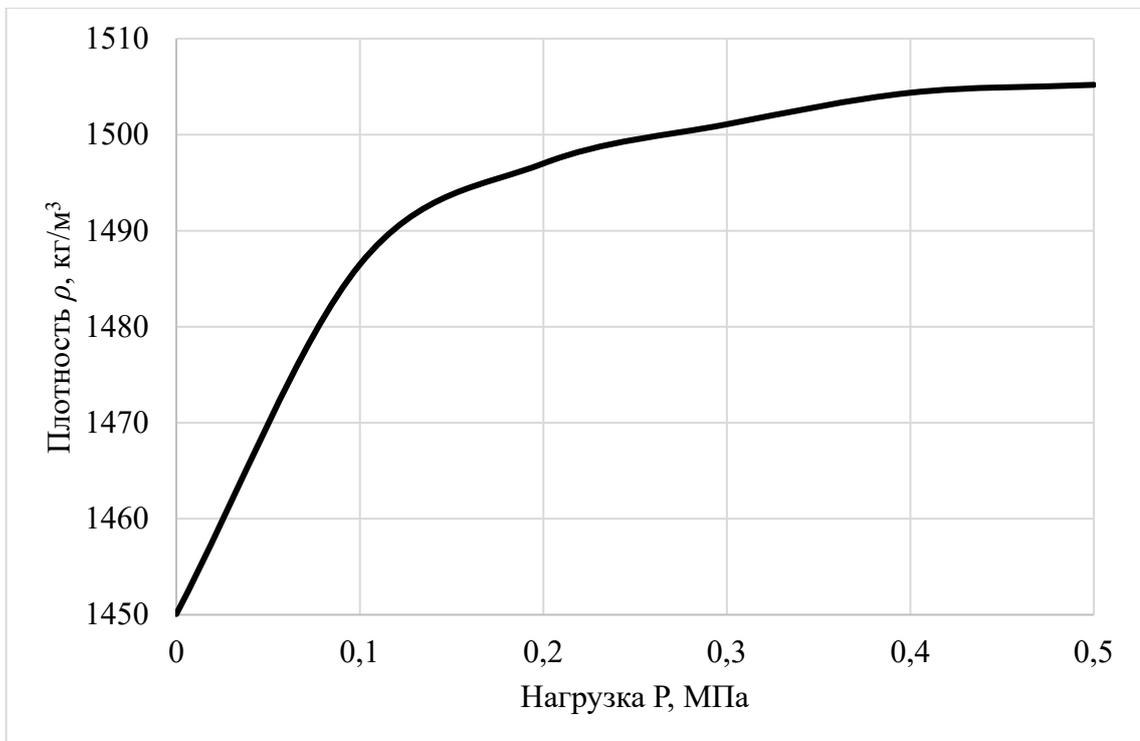


Рисунок 2.30 – Изменение плотности сухих хвостовых отложений при нагрузке

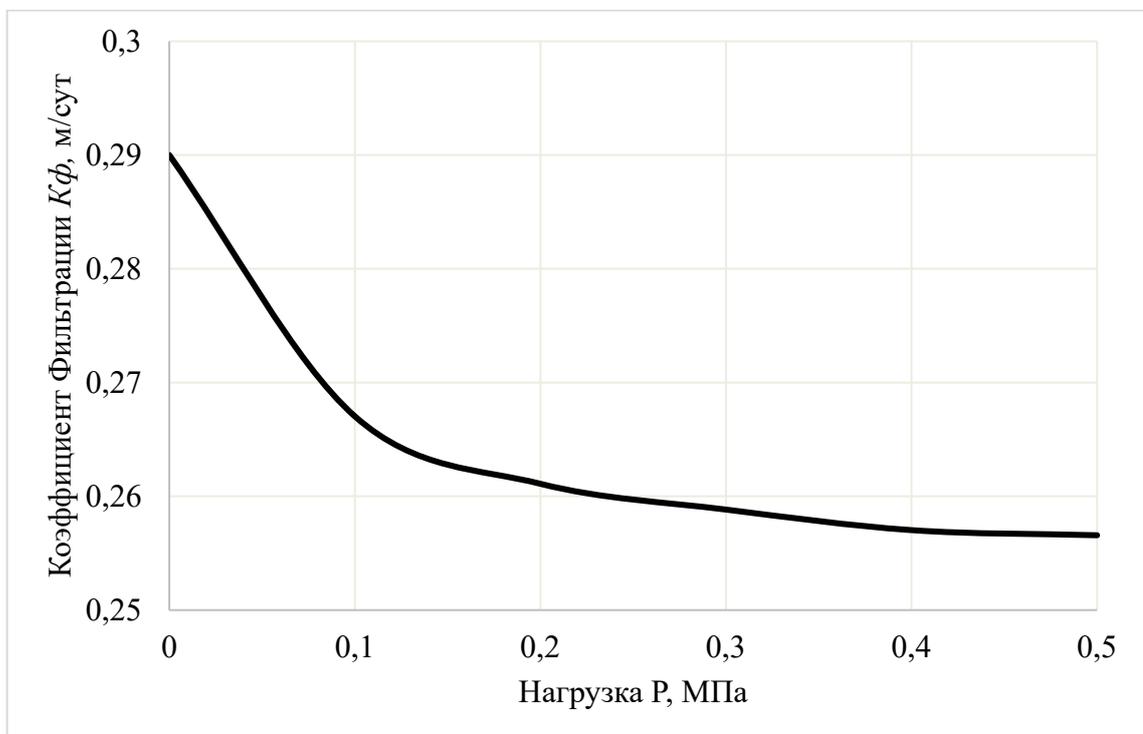


Рисунок 2.31 – Изменение коэффициента фильтрации сухих хвостовых отложений при нагрузке

Для того, чтобы оценить вместимость хранилища с учетом уплотнения отложений при нагрузке, необходимо определить мощность слоя хвостов, создающего нагрузку в 0,1 МПа. При складировании 1 м³ сухих хвостов (слой высотой 1 м) нагрузка составит 1450 кг/м² или

0,0145 МПа. Тогда слой хвостов мощностью 6,90 м обеспечит нагрузку в 0,1 МПа. Таким образом модель хранилища можно разделить на 5 каркасов, каждый из которых отображает реальные физико-механические свойства отложений. Мощность каждого слоя от основания к поверхности тела массива равняется соответственно 6,65 м (тело 1), 6,66 м (тело 2), 6,68 м (тело 3), 6,73 м (тело 4), 6,90 м (тело 5). Итоговая мощность тела или высота массива хвостов составит 33,62 м. Нагрузка на основание хранилища составит 0,5 МПа, нагрузка на нижний слой хвостов мощностью 6,65 м составит 0,4 МПа.

Чтобы вместить указанный слой хвостов мощностью 33,62 м необходимо 10 дамб общей высотой 35,0 м. Генеральный угол откоса составил $11,96^\circ$. Принято, что при такой конфигурации хранилище обладает максимальной вместимостью. Виды хранилища в плане и разрезе приведены на рисунках 2.32 и 2.33 соответственно.

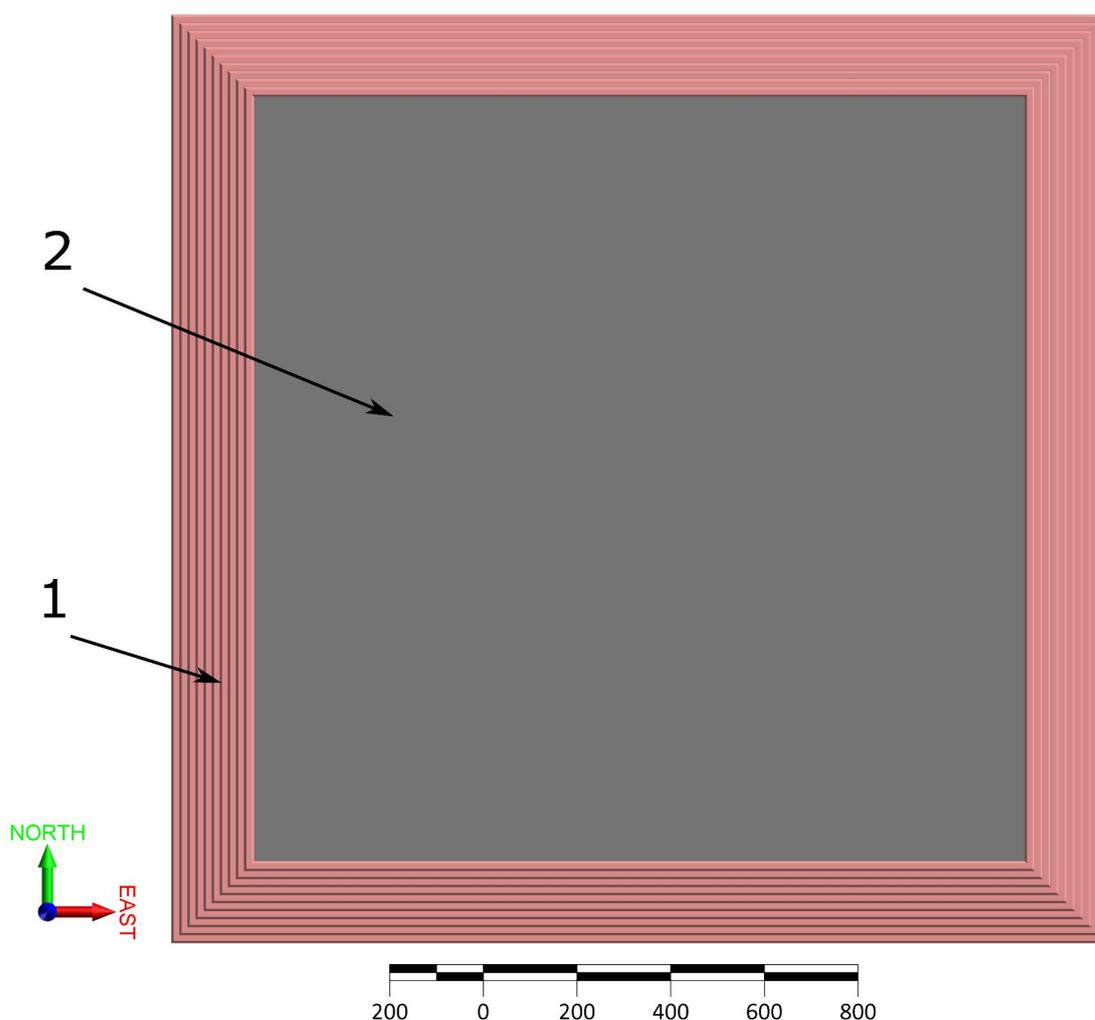


Рисунок 2.32 – Вид в плане смоделированного намывного хранилища отходов обогащения железистых кварцитов

1 – ограждающая дамба; 2 – тело массива (хвосты)

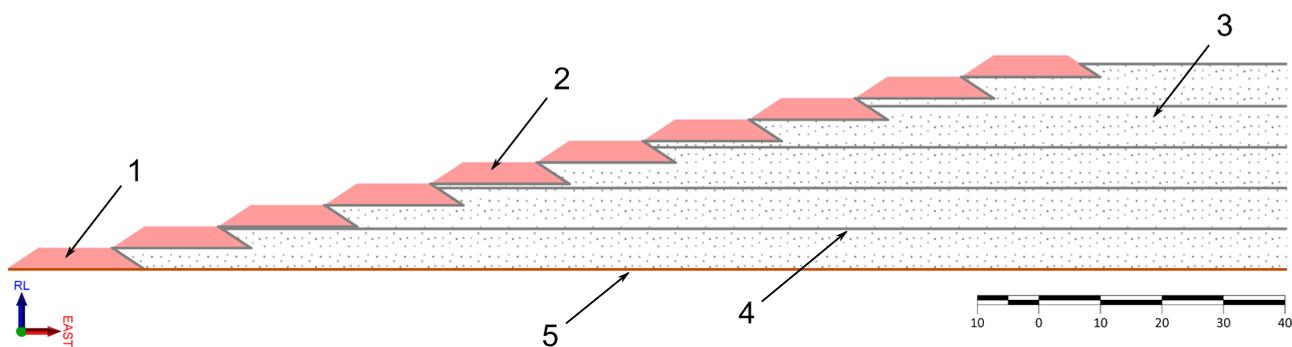


Рисунок 2.33 – Разрез смоделированного намывного хранилища отходов обогащения железистых кварцитов

- 1 – первичная дамба обвалования; 2 – последующие дамбы обвалования;
 3 – тело массива (хвосты); 4 – граница слоев; 5 – основание хранилища

Изначально была определена предельная вместимость намывного хранилища, составившая 110,605 млн м³ или 160,376 млн т при плотности сухих хвостов 1450 кг/м³. Объем и масса ограждающих дамб составили соответственно 4,401 млн м³ и 9,646 млн т при насыпной плотности дамбы 2192 кг/м³. С учетом уплотнения слоев вместимость хранилища увеличивается на 2,71 % до 164,726 млн т. В таблице 2.12 представлены данные по объему и массе каждого слоя хвостов с учетом уплотнения.

Таблица 2.12 – Объем и масса хвостов в хранилище с учетом уплотнения

Параметры тел массива (слоев)	Номер тела массива (слоя)				
	1	2	3	4	5
Объем хранилища, млн м ³	110,605				
Предельная вместимость хранилища без учета уплотнения слоев, млн т	160,376				
Объем тела, млн м ³	25,125	23,500	21,956	20,544	19,480
Масса тела с учетом уплотнения слоев, млн т	37,797	35,276	32,869	30,538	28,246
Предельная вместимость хранилища с учетом уплотнения слоев, млн т	164,726				

Нужно понимать, что данный объем возможно вместить при условии полного удаления воды из хранилища. Обычно в намывных массивах отложения находятся в водонасыщенном состоянии или в состоянии полного водонасыщения ($S_r = 1$) даже после окончания работ по заполнению хранилища. Поэтому принимая коэффициент водонасыщения отложений $S_r = 0,8$

посчитаем реальный объем твердой части с учетом уплотнения слоев. Результаты представлены в таблице 2.13.

Таблица 2.13 – Объем и масса хвостов в хранилище с учетом уплотнения при $S_r = 0,8$

<i>Параметры тел массива (слоев)</i>	<i>Номер тела массива (слоя)</i>				
	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Объем твердой части в 1 м ³ отложений, м ³	0,622				
Предельная вместимость хранилища, млн т	164,726				
Объем тела, млн м ³	25,125	23,500	21,956	20,544	19,480
Объем твердой части, млн м ³	15,630	14,619	13,659	12,780	12,119
Масса твердой части с учетом уплотнения слоев, млн т	23,508	21,943	20,448	18,991	17,573
Вместимость хранилища водонасыщенных отложений, млн т сухих хвостов	102,463				

Из таблицы можно сделать вывод, что при складировании слоя водонасыщенных отложений мощностью 33,62 м вместимость хранилища составит всего 102,463 млн т или 62,20 % от предельной вместимости. Рассмотрим возможность повышения вместимости хранилища без изменения его конфигурации. Для этого рассчитаем объемы и массу хвостов при влажности $W = 10$ и 15 %. Результаты расчета представлены в таблице 2.14.

Таблица 2.14 – Сравнение объема и массы хвостов при $S_r = 0,8$ и $W = 10$ и 15 %

<i>Параметр</i>	<i>Водонасыщенные отложения</i>	<i>Хвосты с $W = 15$ %</i>	<i>Хвосты с $W = 10$ %</i>
Объем хвостов в хранилище, млн м ³	68,807	86,548	94,567
Объем воды в хранилище, млн м ³	41,798	24,057	16,038
Масса сухих хвостов, млн т	102,463	125,495	137,122

Из таблицы следует вывод, что складирование обезвоженных хвостов до условно сухого состояния способствует повышению вместимости хранилища площадью 4 км² на 22,48 % или 33,83 % соответственно при $W = 15$ и 10 %. Однако в этом случае нет необходимости возводить вторичные дамбы, поэтому можно изменить конфигурацию хранилища путем оптимизации вида и количества дамб, увеличения угла откоса массива и повышения его высоты.

Складирование обезвоженных отходов обогащения с низкой степенью водонасыщенности целесообразно также с позиции безопасности формируемого сооружения. В результате

складирования водонасыщенных (двухфазных) пород происходит процесс консолидации – развития необратимой деформации под действием постоянной нагрузки как внешней (оборудование, сооружения, техногенные массивы), так и внутренней (собственный вес породы) [53, 209]. При этом нагрузка распределяется между минеральным скелетом и поровой водой:

$$P_{эфф} = P - P_{изб}, \quad (2.12)$$

где $P_{эфф}$ – эффективное давление, воспринимаемое минеральным скелетом, МПа;

$P_{изб}$ – избыточное давление в поровой воде породы, МПа;

P – внешнее давление (нагрузка), МПа.

Известно, что в жидкой фазе водонасыщенных пород возникающее избыточное поровое давление создает напор, обуславливающее процессы фильтрации воды и уплотнения массива. Поэтому измерение порового давления в намывных техногенных массивах используют для прогноза поведения массива и оценки его состояния во времени. Наличие порового давления свидетельствует о нахождении водонасыщенных тонкодисперсных пород в нестабилизированном состоянии, что негативно влияет на устойчивость массива и значительно снижает физико-механические свойства слагающих его пород в соответствии с принципом эффективных напряжений К. Терцаги, представленным ранее в виде формулы (1.1) [15, 25, 42, 54, 211–217]. С течением времени в результате уплотнения и оттока поровой воды (в случае изменения технологии намыва или завершения формирования хвостохранилища) прочностные свойства грунтов повышаются, приближаясь к величине прочности полностью стабилизированной породы. Рассмотрим поведение элементарного пласта массива отвальных хвостов (рисунок 2.34).

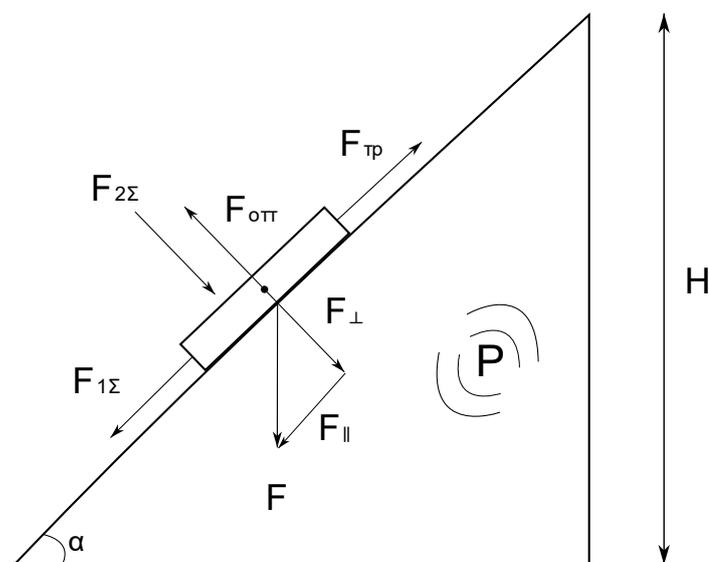


Рисунок 2.34 – Схема к анализу поведения элементарного участка техногенного массива

Здесь $P = \rho_m g H$ – давление, ρ_m – плотность всего материала.

Выделим часть массива и проанализируем его поведение в процессе возведения и эксплуатации хранилища отходов горного производства (рисунок 2.35).

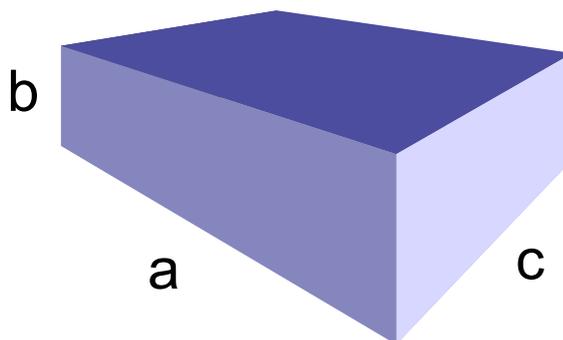


Рисунок 2.35 – Элементарный участок техногенного массива

На этих двух рисунках:

$$V = a \cdot b \cdot c \text{ – объем пласта, м}^3;$$

$$F = \rho_m V \cdot g \text{ – вес пласта, Н;}$$

F_{\parallel} и F_{\perp} – составляющие веса (F_{\parallel} – сила, за счет которой пласт массива сползает вниз; F_{\perp} – сила, которая прижимает пласт к основной массе техногенного массива). При этом $F_{\perp} = F \cdot \cos \alpha$;
 $F_{\parallel} = F \cdot \sin \alpha$.

F_{mp} – сила трения (сила сцепления), препятствующая движению тела вниз;

F_{omm} – сила отталкивания пласта от основной массы техногенного массива за счет давления, создаваемого массой на глубине H . $F_{omm} = P \cdot S = \rho_m g \cdot H \cdot S$, где $P = \rho_m g \cdot H$, а общая сила, действующая на пласт в перпендикулярном направлении, равна:

$$F_{2\Sigma} = F_{\perp} - F_{omm} = F \cdot \cos \alpha - \rho_m g \cdot H \cdot S$$

$$F_{mp} = k F_{2\Sigma} = k(F \cdot \cos \alpha - \rho_m g \cdot H \cdot S)$$

$$F_{1\Sigma} = F_{\parallel} - F_{mp} = F \cdot \sin \alpha - k(F \cdot \cos \alpha - \rho_m g \cdot H \cdot S)$$

где k – коэффициент сопротивления или коэффициент сцепления. Тогда можно записать уравнение состояния техногенного массива:

$$F_{1\Sigma} = F \cdot \sin \alpha - k \cdot F \cdot \cos \alpha + \rho_m g \cdot H \cdot S \quad (2.13)$$

Из уравнения (2.13) следует:

Если $F_{1\Sigma} = 0$ – массив находится в состоянии неустойчивого равновесия (предельное состояние);

$F_{1\Sigma} > 0$ – массив находится в неустойчивом состоянии (развиваются деформации и происходит оползание);

$F_{1\Sigma} < 0$ – массив находится в состоянии устойчивого равновесия.

Состояние массива, исходя из уравнения (2.13), зависит от угла откоса α (коэффициента внутреннего трения), коэффициента сцепления k , плотности ρ_m материала техногенного массива.

Проанализируем, как влияет на состояние массива влажность слагающих его техногенных отложений. Увлажнение материала резко (в 3–5 раз) снижает значение коэффициента сцепления, что приводит к снижению устойчивости техногенного массива. Известно, что одинаковые материалы при различной степени увлажнения имеют различную плотность. Массы, составляющие тело техногенного массива, пористы и характеризуются коэффициентом пористости n :

$$n = \frac{V_o - V_m}{V_o} = \frac{V_n}{V_o}, \quad (2.14)$$

где V_o – объем материала, м³;

V_m – объем твердой части в объеме V_o , м³;

$V_o - V_m = V_n$ – объем пор в объеме V_o , м³.

Тогда, при сухом материале:

$$\rho_{m1} = (1 - n) \cdot \rho_m,$$

где ρ_m – плотность твердого материала, кг/м³.

При влажном материале:

$$\rho_{m2} = (1 - n) \cdot \rho_m + n \cdot \rho_e,$$

где ρ_e – плотность жидкости (воды), кг/м³.

Можно сделать вывод, что плотность материалов в увлажненном состоянии выше, чем в сухом, и тогда величина $\rho_m \cdot g \cdot H \cdot S$ становится больше, что способствует снижению устойчивости техногенного массива при относительно невысоких уровнях переувлажнения. Таким образом, снижение количества воды в теле техногенных массивов будет способствовать повышению коэффициента запаса устойчивости массива, для чего использование насыпной технологии формирования хранилищ обогащения руд выглядит наиболее рациональной.

Поэтому следующим шагом было выполнено моделирование хранилища глубоко обезвоженных отходов обогащения железных руд на прежней площади 4 км². Для более адекватного сравнения параметров «сухого» хранилища с намывными ограждающие дамбы также возведены по всему периметру. Отличие в том, что при «сухом» складировании главная функция дамб – оградительная. Были смоделированы несколько хранилищ, отличающиеся высотой

массива, количеством ярусов, углами откосов. В таблице 2.15 приведены основные параметры хранилищ. Высота ограждающей дамбы выбиралась из расчета не менее четверти высоты массива. Разрезы хранилищ представлены на рисунках 2.36–2.38.

Таблица 2.15 – Результаты моделирования хранилищ глубоко обезвоженных хвостов

Параметры хранилищ	Номер хранилища		
	1	2	3
Площадь массива S , км ²	3,44	3,15	
Высота массива H , м	30	50	100
Угол откоса α , градус	25	24,8	23,6
Количество ярусов, шт	1	2	4
Высота дамбы, м	15	25	25
Объем хранилища, млн м ³	96,379	139,330	241,507
Масса хвостов, млн т	139,750	202,029	350,185
Отношение объема дамбы к объему массива, %	5,040	8,401	4,847

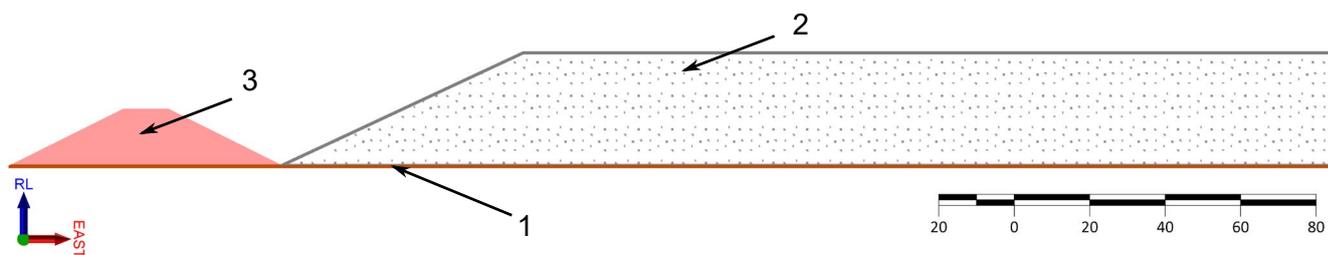


Рисунок 2.36 – Поперечный разрез хранилища № 1, северная дамба

1 – основание хранилища; 2 – тело массива (хвосты); 3 – ограждающая дамба

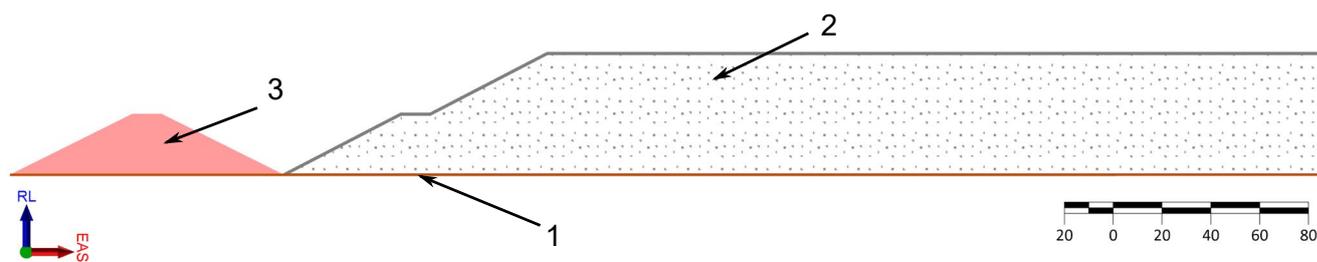


Рисунок 2.37 – Поперечный разрез хранилища № 2, северная дамба

1 – основание хранилища; 2 – тело массива (хвосты); 3 – ограждающая дамба

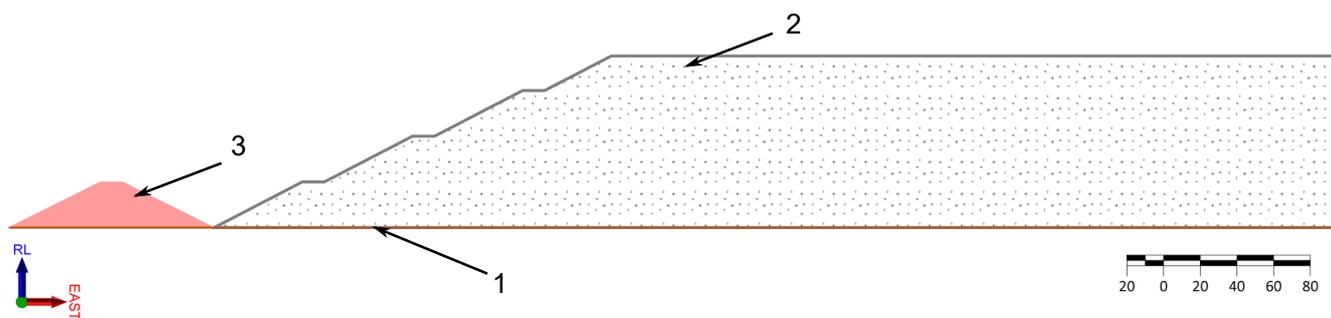


Рисунок 2.38 – Поперечный разрез хранилища № 3, северная дамба

1 – основание хранилища; 2 – тело массива (хвосты); 3 – ограждающая дамба

Результаты показывают, что площадь, реально занимаемая массивом хвостов, меньше 4 км^2 и составляет от $3,15$ до $3,44 \text{ км}^2$, а вместимость существенно больше вместимости намывного хвостохранилища. При этом на ограждающие дамбы не оказывается никакого воздействия со стороны массива и они находятся в стабильном устойчивом состоянии. Для увеличения вместимости намывного массива необходимо наращивать дамбы, в случае глубоко обезвоженных отходов это не требуется и вместимость можно повысить за счет больших углов откоса и наращивания высоты массива. Расчеты коэффициентов запаса устойчивости таких массивов позволят определить оптимальные параметры хранилища. В рассмотренных вариантах конфигурации хранилищ глубоко обезвоженных хвостов с $S = 4 \text{ км}^2$, повышение вместимости в сравнении с конфигурацией намывного хранилища составило $1,36$, $1,97$, $3,42$ раз при высоте массива 30 , 50 и 100 м соответственно.

Последним пунктом исследования стал анализ количества воды, необходимого для перехода массива глубоко обезвоженных хвостов в водонасыщенное состояние. Для анализа был взят массив площадью $21,83 \text{ км}^2$ со средней мощностью отложений 50 м, размещенный на рельефе № 1. Смоделированные тела массива обладают разными физико-механическими и фильтрационными свойствами, представленными в таблице 2.16. Расчет высоты слоя влажных хвостов, вызывающего увеличение нагрузки на $0,1 \text{ МПа}$, был сделан по аналогии с расчетом для хвостов сухих.

Таблица 2.16 – Свойства тел массива хранилища глубоко обезвоженных хвостов

Параметры тел массива (слоев)	Номер тела массива (слоя)				
	1	2	3	4	5
Высота слоя h , м	25,35	6,10	6,11	6,15	6,29
Плотность ρ , кг/м ³	1643,0	1640,0	1636,0	1626,0	1590,0
Пористость n , доли ед.	0,4530	0,4541	0,4556	0,4595	0,4727
Коэффициент пористости e , доли ед.	0,828	0,832	0,837	0,850	0,896
Коэффициент фильтрации K_f , м/сут	0,257	0,259	0,261	0,267	0,290
Коэффициент водонасыщения S_r , доли ед	0,332	0,331	0,329	0,324	0,307

Первый слой хвостов разместится на площади в 21 830 000 м². Требуемый объем складирования составляет 9,64 млн м³/год или 26 556,4 м³/сутки, тогда высота массива при равномерном заполнении хранилища достигнет 0,44 м через год. При условии минимальной мощности отсыпаемого слоя хвостов 1 м, занимаемая телом площадь в конце первого года формирования массива уменьшится и будет равняться 9,64 км². С учетом климатических особенностей региона (588 мм осадков в год) годовой объем осадков на площади 9,64 км² составит:

$$V_{\text{осадки}} = 0,588 \cdot 9\,640\,000 = 5,668 \text{ млн м}^3 \text{ воды}$$

За это время суммарно испарится 2,420 млн м³ воды с поверхности массива. Значит суммарное количество воды в слое с учетом уже имеющейся остаточной влажности хвостов составит:

$$V_{\text{воды}}^{\text{год } 1} = 9\,640\,000 \cdot 0,145 + 5\,668\,000 - 2\,420\,000 = 4,646 \text{ млн м}^3 \text{ воды}$$

Однако эта величина справедлива при единовременном обводнении массива на указанный объем воды. При $K_f = 0,29$ м/сут и средней инфильтрации осадков в массив около 30 % весь указанный объем воды не будет задерживаться в массиве. Целесообразнее смоделировать переход в водонасыщенное состояние уже сформированного массива на проектную высоту 50 м. Среднесуточный объем осадков:

$$V_{\text{осадки}}^{\text{ср.сут}} = \frac{5\,668\,000}{365} / 26\,556,4 = 0,585 \text{ м}^3 / \text{сут}$$

С учетом инфильтрации объем воды в массиве будет прирастать на:

$$V_{\text{воды}}^{\text{ср.сут}} = V_{\text{осадки}}^{\text{ср.сут}} - V_{\text{исп}}^{\text{ср.сут}} = 0,585 - 0,250 = 0,335 \text{ м}^3 / \text{сут}$$

Тогда весовая влажность W с учетом воды в хвостах будет равняться:

$$W = \frac{m_{\text{воды}}}{m_{\text{хвостов}}} = \frac{0,335 + 3,851}{32,923} = 12,72 \%$$

Значит коэффициент водонасыщения S_r составит:

$$S_r = \frac{W \cdot \rho_{\text{хв.ист}}}{\rho_{\text{воды}} \cdot e} = \frac{0,1272 \cdot 2,75}{1 \cdot 0,896} = 0,3904$$

Это означает, что слой все еще находится не в водонасыщенном состоянии, вода не фильтруется и задерживается в порах отложений. Подобные расчеты для слоев при изменении нагрузки на 0,1 МПа показали, что перехода в водонасыщенное состояние за время формирования массива не происходит и техногенный горизонт не сформируется. Результаты даны в таблице 2.17.

Таблица 2.17 – Расчет обводненности смоделированного хранилища высотой 50 м

№ слоя	1	2	3	4	5
Коэффициент водонасыщения S_r , доли ед	0,4225	0,4204	0,4179	0,4115	0,3904

Максимальный коэффициент водонасыщения S_r составит 0,4225 на глубине ниже 24 м от поверхности массива. При условии, что верхний слой находится при $S_r = 0,3904$, количество воды необходимое для перехода массива в водонасыщенное состояние составит:

$$S_r = \frac{W \cdot \rho_{\text{хв.ист}}}{\rho_{\text{воды}} \cdot e}$$

$$W = \frac{S_r \cdot e \cdot \rho_{\text{воды}}}{\rho_{\text{хв.ист}}} = \frac{0,8 \cdot 0,896 \cdot 1}{2,75} = 26,07 \%$$

$$V_{\text{воды}}^{Sr=0,8} = m_{\text{хв}} \cdot W = 120,535 \cdot 0,2607 = 31,423 \text{ млн м}^3 \text{ воды}$$

Так как в верхнем слое уже содержится 17,478 млн м³ воды, значит необходимо внести 13,945 млн м³. Площадь поверхности верхней площадки массива равняется 20,55 км². Тогда при сохранении среднегодового количества осадков 588 мм с учетом испарения и инфильтрации в массив это количество воды поступит через:

$$V_{\text{осадки}}^{\text{год}} = 0,588 \cdot 20\,550\,000 - 5\,158\,000 = 6,925 \text{ млн м}^3 \text{ воды}$$

$$V_{\text{вода в массив}}^{\text{год}} = 0,3 \cdot V_{\text{осадки}}^{\text{год}} = 0,3 \cdot 6,925 = 2,078 \text{ млн м}^3 \text{ воды}$$

$$N_{\text{лет}} = \frac{13,945}{2,078} = 6,71 \text{ лет}$$

Таким образом примерно через 6,71 года после окончания работ по заполнению хранилища площадью 21,83 км² возможно формирование техногенного водоносного горизонта в теле массива. Аналогичные выводы можно перенести и на более объемные хранилища, рассмотренные ранее в данной работе.

2.6 Оценка устойчивости массивов глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов

Проведенный анализ факторов, влияющих на состояние и вместимость горнотехнического объекта, а также факторов возникновения и развития в массиве процессов различного рода производится для обеспечения устойчивости массивов откосных сооружений. Под устойчивостью откосных сооружений в геомеханике понимается способность откосного массива сохранять свою форму и обеспечивать функционирование сооружения с заданными параметрами в течение необходимого периода времени [51]. Количественная оценка состояния откосных горнотехнических сооружений достигается путем определения коэффициента запаса устойчивости η – отношения сил, сдвигающих массив (T), к силам, удерживающим массив (N):

$$\eta = \frac{\sum N_i}{\sum T_i} \quad (2.15)$$

На сегодняшний момент существует более 100 методов расчета коэффициента запаса устойчивости откосных сооружений. Наиболее часто применяются методы расчета по круглоцилиндрическим или монотонно криволинейным поверхностям скольжения методами алгебраического суммирования сил, касательных напряжений или многоугольника сил.

Впервые понятие линии скольжения, используемой в большинстве методов оценки устойчивости откосов и отвалов, ввел Ш. Кулон в 1773 году. Гипотеза о существовании внутреннего трения в твердых телах легла в основу теории Кулона-Мора [218]. В 1936 году В. Феллениусом был предложен расчетный метод оценки устойчивости, в котором использована круглоцилиндрическая поверхность скольжения [219]. Данный метод получил развитие во многих работах [220-226]. В основу метода заложен принцип предельного равновесия, на базе которого производится решение уравнений равновесия для каждого из блоков, на который разбивается исследуемый откосный массив. В каждом из методов используются различные условия равновесия и форма поверхности скольжения, учитываются или не учитываются силы взаимодействия между блоками. Также существуют способы расчета и оценки устойчивости, использующие методы конечных элементов [227-229]. Оба метода расчета дают примерно одинаковые значения коэффициентов запасов устойчивости в простых случаях, однако способы по методу предельного равновесия требуют значительно меньшей вычислительной мощности, в связи с чем именно данный метод будет использоваться для дальнейших расчетов.

В соответствии с уравнением (2.15), если $\eta > 1,0$, то откосное сооружение находится в устойчивом состоянии; при $\eta = 1,0$ откосное сооружение переходит в состояние предельного равновесия; при $\eta < 1,0$ откос находится в неустойчивом состоянии. На практике нормативные значения коэффициента запаса устойчивости техногенных массивов находятся в диапазоне

$\eta \geq 1,05 \div 1,40$ в зависимости от типа сооружения, грунтов оснований и материалов, слагающих массив.

К удерживающим силам относятся:

1. Сила трения:

$$F_{\text{тр}} = N_i \cdot \operatorname{tg}\varphi_i,$$

где $N_i = P_i \cdot \cos\alpha_i$ – нормальная составляющая расчетного блока, Н;

P_i – сила тяжести расчетного блока, Н;

α_i – средний угол наклона касательной к кривой скольжения в пределах блока, градус;

φ – угол внутреннего трения, градус.

2. Сила сцепления:

$$F_{\text{сп}} = C_i \cdot l_i,$$

где C_i – сцепление i -той породы в области скольжения расчетного блока, МПа;

l_i – длина наклонного основания расчетного блока, м.

При формировании техногенного водоносного горизонта в теле массива необходимо учитывать гидростатическое давление D , действующее по поверхности скольжения и направленное по нормали к ней. Гидростатическое давление снижает эффективные напряжения в массиве и способствует уменьшению сил, удерживающих массив в устойчивом состоянии, особенно существенно это проявляется при обводнении большей части массива. Также суммарное воздействие гидростатических и гидродинамических сил способствует набуханию и снижению прочности глинистых пород, укладываемых в хранилище или слагающих основание сооружения. С учетом D итоговое выражение для определения коэффициента запаса устойчивости методом алгебраического суммирования сил запишется в виде:

$$\eta = \frac{\sum \operatorname{tg}\varphi_i(N_i - D_i) + \sum C_i \cdot l_i}{\sum T_i} \quad (2.16)$$

При организации хранилищ обезвоженных отходов обогащения руд одним из наиболее вероятных негативных горно-геологических явлений становится оползень. Отличительной чертой оползней от других деформационных процессов является перемещение оползневых масс вниз по откосу по поверхности, получившей название поверхность скольжения. На возникновение оползней оказывает влияние комплекс факторов различной природы – физико-географические, инженерно-геологические, гидрогеологические и технологические.

Основные причины оползней – снижение физико-механических свойств техногенных отложений и откосов дамб в результате выветривания, чрезмерного увлажнения с формированием техногенного водоносного горизонта в теле массива, превышения угла откоса

сверх оптимального, складирования материалов сверх расчетной вместимости хвостохранилища. Однако положение поверхности скольжения в массиве при развитии оползневых процессов в целом определяется инженерно-геологическими условиями. Выделяют такие типы оползней, как надподошвенный, подошвенный и подподошвенный (рисунки 2.39–2.41).

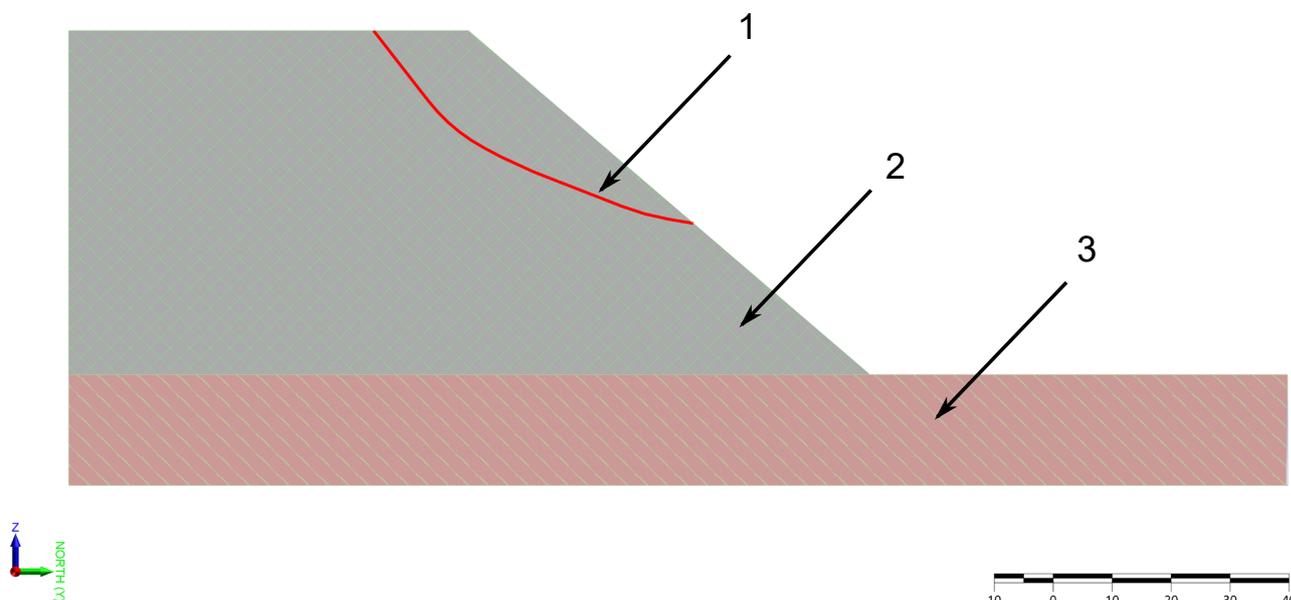


Рисунок 2.39 – Положение кривой скольжения при оползне надподошвенного типа
1 – кривая скольжения; 2 – тело массива (хвосты); 3 – основание массива

Оползень надподошвенного типа возникает при складировании техногенных масс на основание, прочностные характеристики которого заметно выше характеристик укладываемого материала. В этом случае поверхность скольжения представлена плавной круглоцилиндрической кривой с некоторого расстояния от верхней бровки до нижней бровки откоса или до некоторой точки на самом откосе. Поверхность скольжения формируется полностью в теле откосного массива.

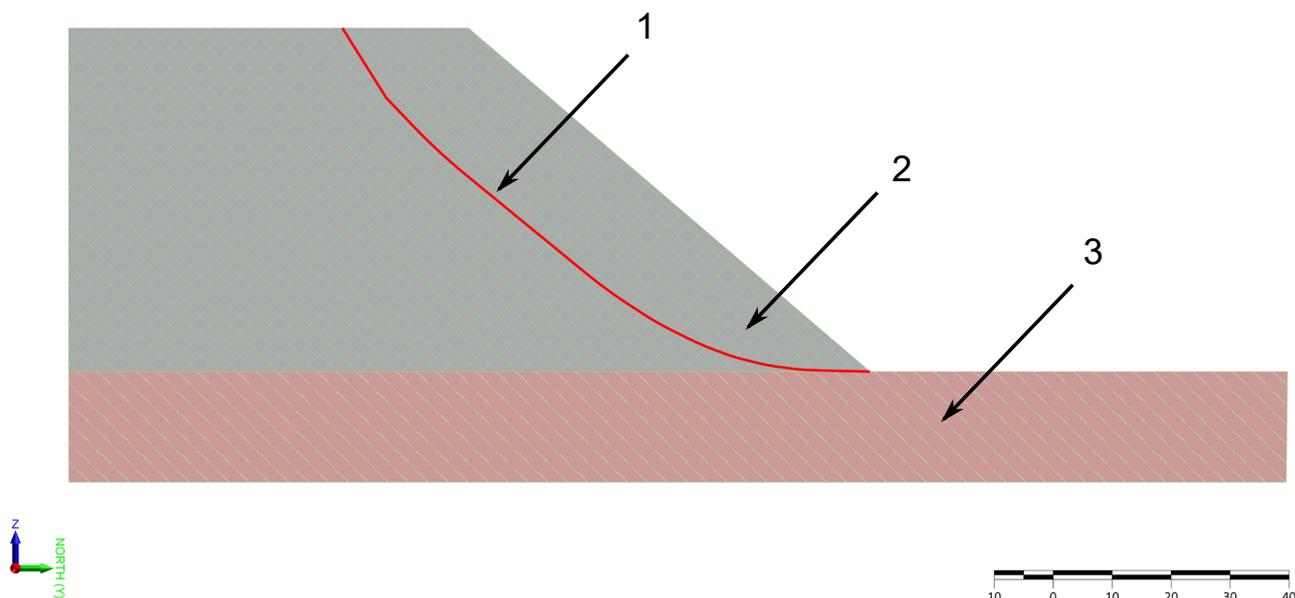


Рисунок 2.40 – Положение кривой скольжения при оползне подошвенного типа
 1 – кривая скольжения; 2 – тело массива (хвосты); 3 – основание массива

Подподошвенные оползни развиваются при формировании массива на слоистом основании или основании из глинистых пород. Поверхность скольжения проходит по слабому контакту основания сооружения и техногенного массива.

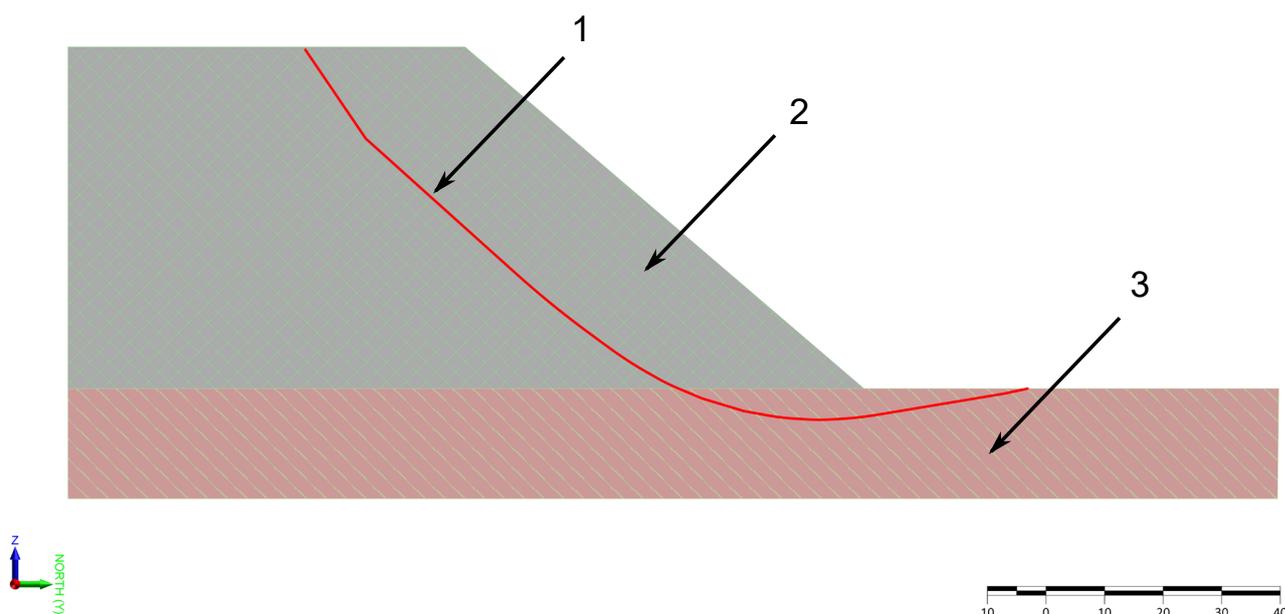


Рисунок 2.41 – Положение кривой скольжения при оползне подподошвенного типа
 1 – кривая скольжения; 2 – тело массива (хвосты); 3 – основание массива

Оползень подподошвенного типа развивается при складировании техногенных масс на основание с низкими прочностными свойствами (физико-механические свойства грунтов оснований заметно ниже свойств складированного материала). Поверхность скольжения проходит через тело откосного массива, затрагивает часть основания и выходит в некоторой точке основания на удалении от нижней бровки массива. Оползень сопровождается выдавливанием слабых грунтов оснований с образованием вала выпирания и значительными осадками вышележащих ярусов.

Схема к построению кривой скольжения приведена на рисунке 2.42 [209]. В раздельно-зернистых породах кривая скольжения BCD обычно имеет вид части окружности, центр O которой лежит вне пределов откосного сооружения, а начало и конец отрезка кривой определяются в зависимости от вида сооружения. Принимается, что вхождение кривой скольжения на верхней площадке откоса происходит на некотором расстоянии a от верхней бровки. Точка входа наислабейшей кривой определяется методом перебора с шагом, как правило, кратным 5.

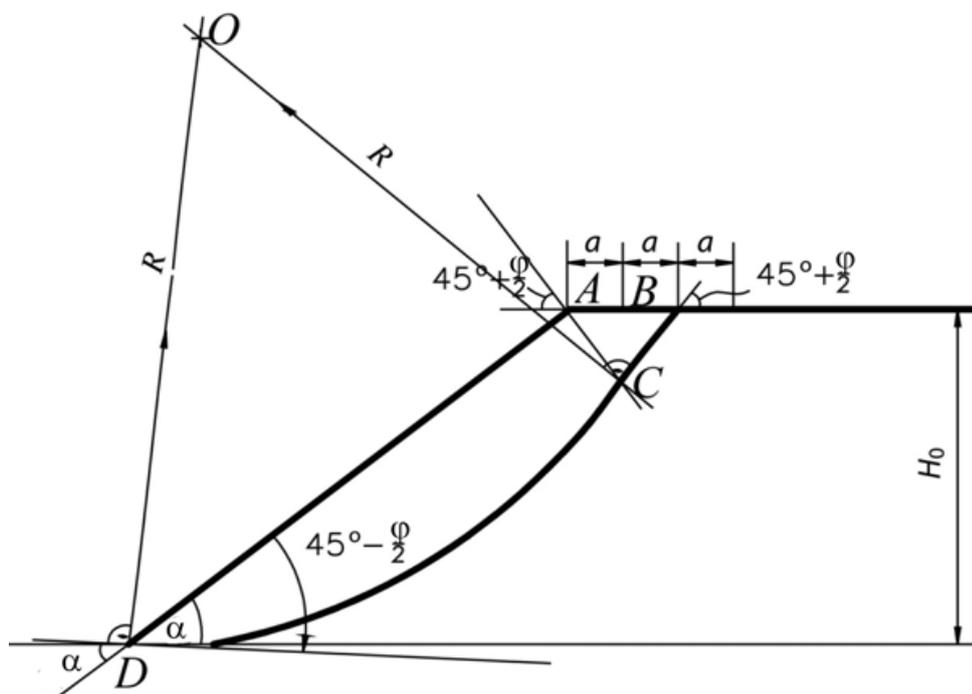


Рисунок 2.42 – Схема к построению кривой скольжения в массивах нарушенной структуры

При обрушении отвального массива кривая скольжения входит в точке B под углом к верхней площадке отвала, равным $45 + \varphi/2$. Это первый прямолинейный участок кривой скольжения – отрезок BC . Под таким же углом проводится вторая линия AC , точка пересечения двух прямых C является началом криволинейного участка линии скольжения. Из точки D

(нижняя бровка уступа) проводится прямая под углом $45 - \varphi/2$ к откосу отвала. Из точек D и C восстанавливаются перпендикуляры, точка пересечения которых O является центром круглоцилиндрической кривой скольжения с радиусом R . В рассматриваемом случае грунты основания обладают более высокими прочностными характеристиками, чем породы откосного сооружения. Поэтому кривая скольжения BCD в нижней части проходит по контакту пород основания и техногенных отложений откоса.

Расчеты устойчивости производились в созданной на кафедре Геология и маркшейдерское дело НИТУ МИСИС программе расчета устойчивости откосов «UST». Программа основана на методах алгебраического суммирования сил и многоугольника сил по криволинейной поверхности скольжения. Для оценки устойчивости хранилищ глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов производился поиск наислабейшей кривой при различной конфигурации хранилища (высота массива, укол откоса, количество ярусов), степени водонасыщенности отложений и грунтах оснований. В таблице 2.18 приведены показатели физико-механических свойств обезвоженных хвостов и грунтов оснований.

Таблица 2.18 – Физико-механические свойства хвостов с $W = 10\%$ и грунтов оснований

	<i>Плотность ρ, кг/м³</i>	<i>Угол внутреннего трения φ, градус</i>	<i>Сцепление C, кПа</i>
Хвосты неуплотненные	1590,0	29,5	0
Супесь дресвяная	2110,0	16,0	4,0
Супесь песчанистая	2150,0	36,0	27,0
Трещиноватые гранито-гнейсы	2640,0	35,0	100,0

При расчетах устойчивости одноярусных массивов ширина верхней площадки отвала принималась равной 50 м при высоте откоса $H = 30$ и 50 м, и 100 м при $H = 100$ м. В таблице 2.19 приведены результаты определения коэффициента запаса устойчивости хранилищ при различных параметрах одноярусного массива глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов. Знаки «*», «_» и «+» в конце номера варианта и значений η обозначают соответственно супеси дресвяные, супеси песчанистые и трещиноватые гранито-гнейсы в основании сооружений.

Таблица 2.19 – Коэффициенты запаса устойчивости хранилищ глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов при $W = 10 \%$

<i>№ варианта</i>	<i>H массива, м</i>	<i>Угол откоса α, градус</i>	<i>η, алгеб. сумм.</i>	<i>η, многоуг. сил</i>
1.1.1* 1.1.1_ 1.1.1+	30	20	1,3327* 2,3907_ 3,1950+	1,3324* 2,3905_ 3,1947+
1.1.2* 1.1.2_ 1.1.2+		25	1,1950* 1,5920_ 2,0482+	1,1948* 1,5919_ 2,0480+
1.1.3* 1.1.3_ 1.1.3+		27,5	1,1434* 1,3049_ 1,5604+	1,1432* 1,3048_ 1,5603+
1.1.4* 1.1.4_ 1.1.4+		29	1,0620* 1,0723_ 1,0720+	1,0619 1,0722_ 1,0719+
1.2.1* 1.2.1_ 1.2.1+	50	20	1,3221* 2,2840_ 2,7802+	1,3219* 2,2839_ 2,7800+
1.2.2* 1.2.2_ 1.2.2+		25	1,1870* 1,5322_ 1,8076+	1,1869* 1,5322_ 1,8075+
1.2.3* 1.2.3_ 1.2.3+		27,5	1,1398* 1,2665_ 1,4187+	1,1397* 1,2664_ 1,4187+
1.2.4* 1.2.4_ 1.2.4+		29	1,0601* 1,0632_ 1,0723+	1,0600* 1,0631_ 1,0722+
1.3.1* 1.3.1_ 1.3.1+	100	20	1,3047* 2,1988_ 2,4605+	1,3046* 2,1988_ 2,4604+
1.3.2* 1.3.2_ 1.3.2+		25	1,1357* 1,4805_ 1,6165+	1,1356* 1,4805_ 1,6165+
1.3.3* 1.3.3_ 1.3.3+		27,5	1,0689* 1,2388_ 1,3127+	1,0689* 1,2388_ 1,3127+
1.3.4* 1.3.4_ 1.3.4+		29	1,0129* 1,0616_ 1,0662+	1,0128* 1,0616_ 1,0662+

Анализ таблицы 2.19 показывает, что наибольшее влияние на устойчивость массива обезвоженных хвостов оказывают свойства грунтов оснований. С увеличением высоты массива коэффициент запаса устойчивости изменяется незначительно при складировании на одинаковых грунтах оснований. При углах откоса более $27,5^\circ$ массивы при любой высоте от 30 до 100 м в 89 % случаев имеют η меньше нормативного (менее 1,35). Наиболее удобно выявленные зависимости изменения коэффициента запаса устойчивости от угла откоса и свойств грунтов оснований массива показать графически (рисунки 2.43–2.45).

По зависимостям можно рекомендовать следующие максимальные углы откоса одноярусного массива обезвоженных до $W = 10\%$ хвостов в зависимости от его высоты: для массива $H = 30$ м это $26,9^\circ$ и $28,8^\circ$ соответственно при грунтах оснований «супесь песчанистая» и «трещиноватые гранито-гнейсы»; для массива $H = 50$ м – $26,5^\circ$ и $27,9^\circ$; для массива $H = 100$ м – $26,0^\circ$ и $27,0^\circ$.

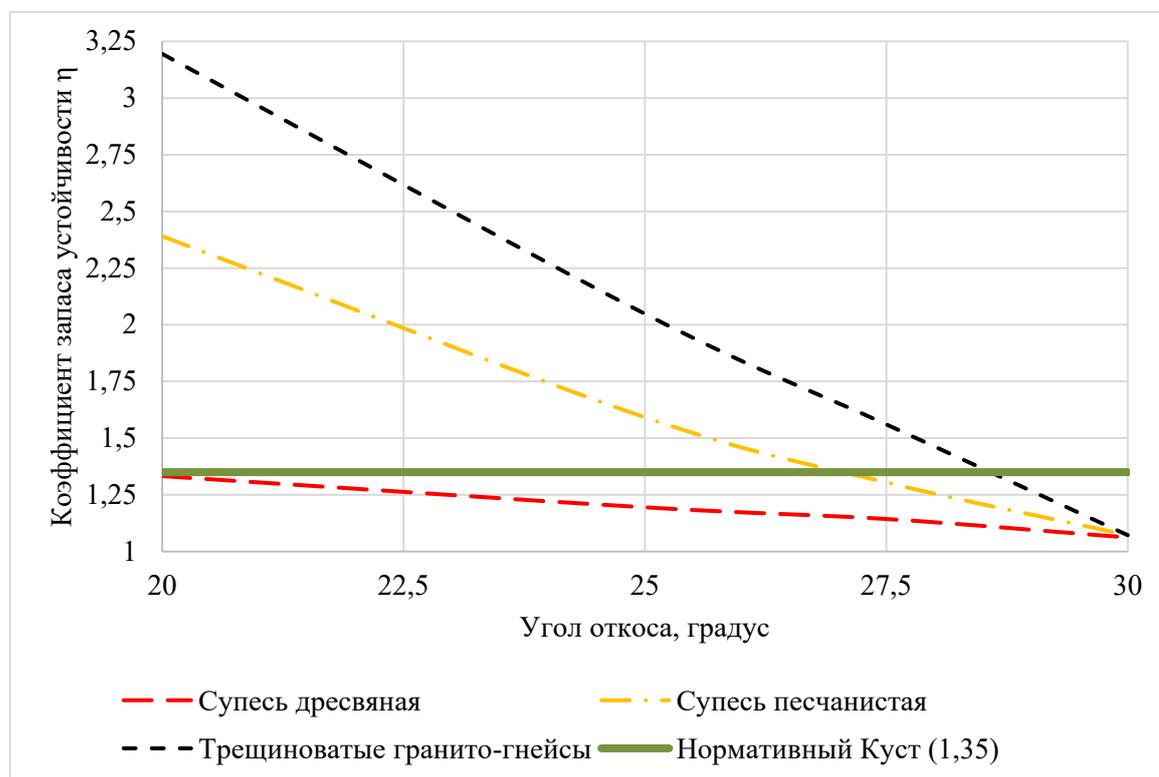


Рисунок 2.43 – Изменение коэффициента запаса устойчивости с увеличением угла откоса массива глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов при $H = 30$ м

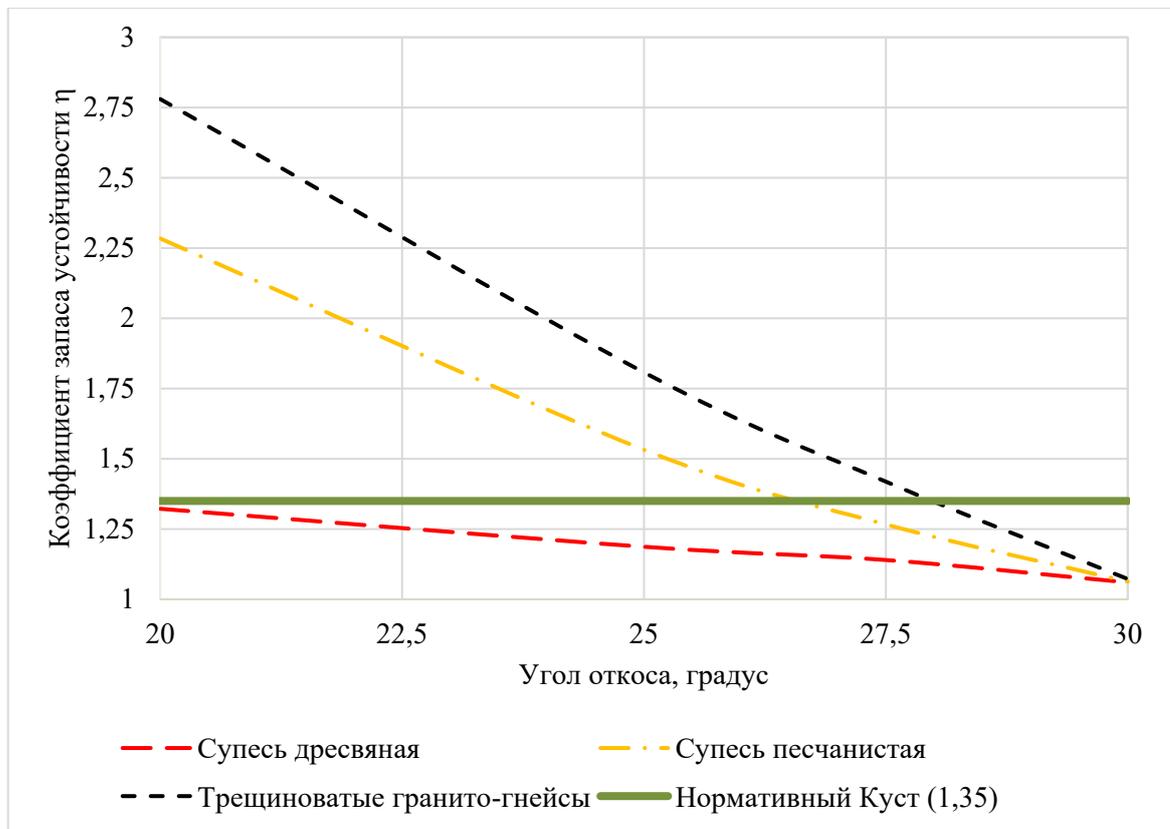


Рисунок 2.44 – Изменение коэффициента запаса устойчивости с увеличением угла откоса массива глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов при $H = 50$ м

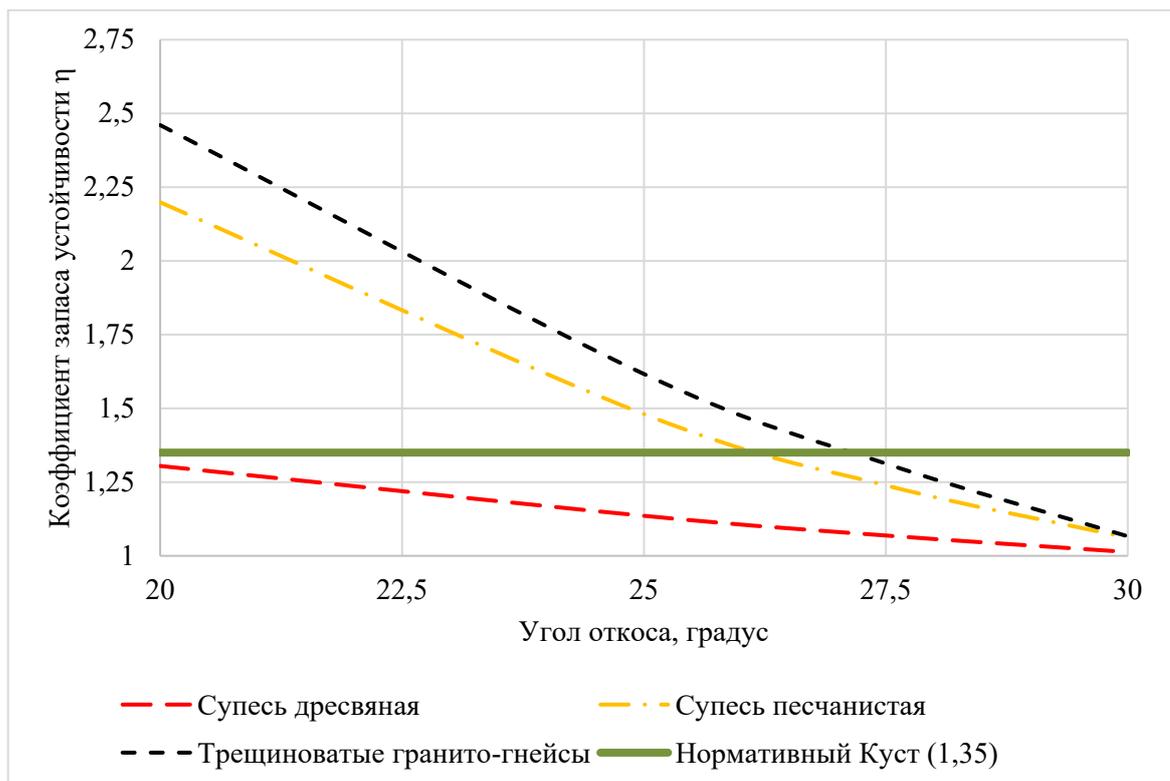


Рисунок 2.45 – Изменение коэффициента запаса устойчивости с увеличением угла откоса массива глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов при $H = 100$ м

При организации хранилища на дресвяной супеси (грунт*) при любой конфигурации откоса η меньше 1,35. При этом характер изменения кривых $K_{уст}$ на песчанистой супеси и трещиноватых гранито-гнейсах более крутой. Стоит отметить, что с увеличением высоты массива характер кривой и тип оползня меняется: при малой высоте на любых грунтах оснований как правило развивается подошвенный или надподошвенный оползень с вхождением кривой скольжения максимально близко к верхней бровке (рисунки 2.46–2.48).

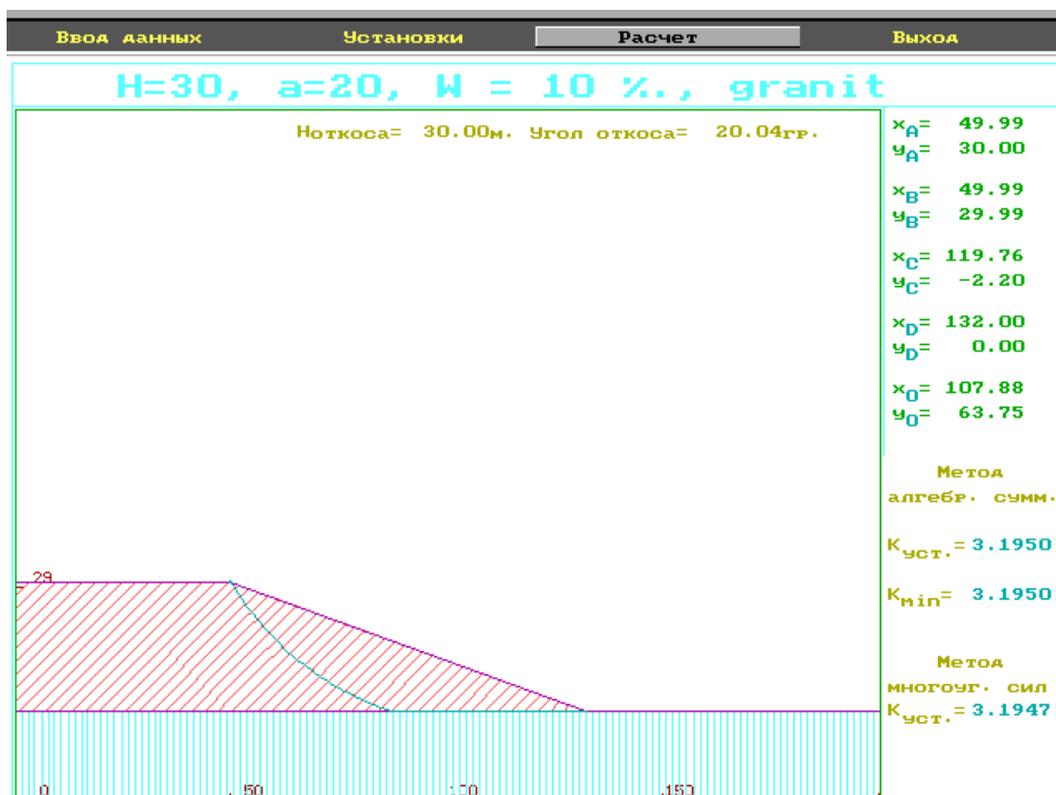


Рисунок 2.46 – Расчет коэффициента запаса устойчивости и положение наислабейшей кривой скольжения при варианте 1.1.1+

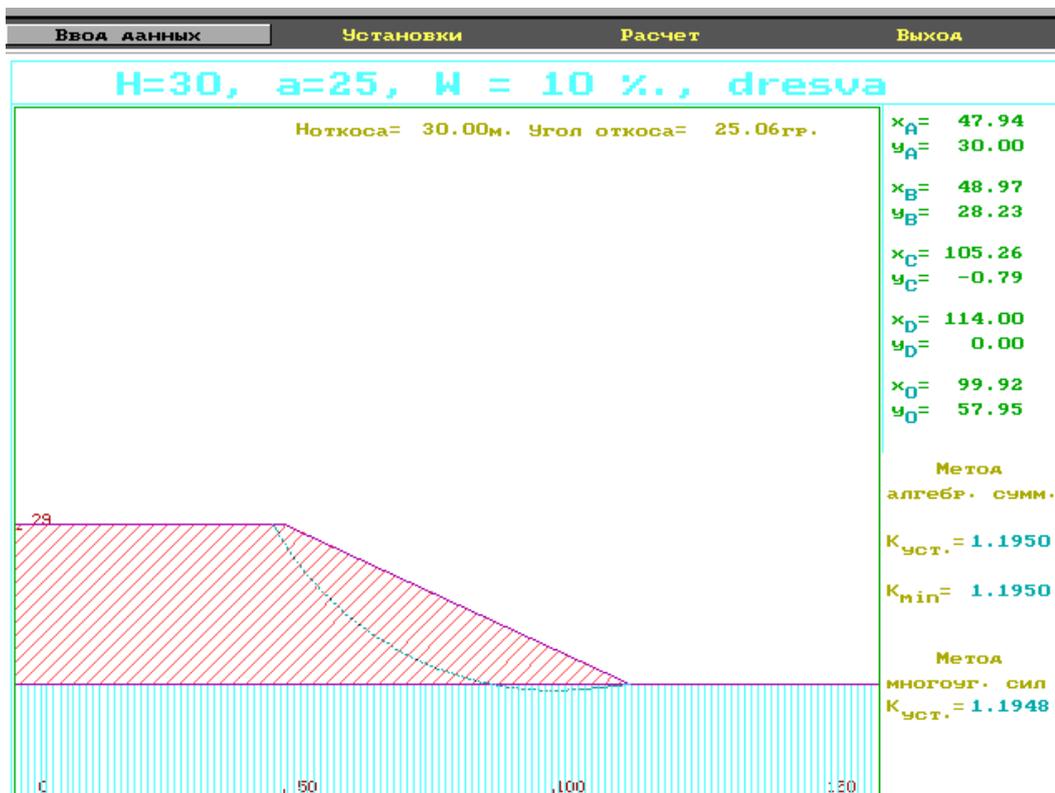


Рисунок 2.47 – Расчет коэффициента запаса устойчивости и положение наислабейшей кривой скольжения при варианте 1.1.2*

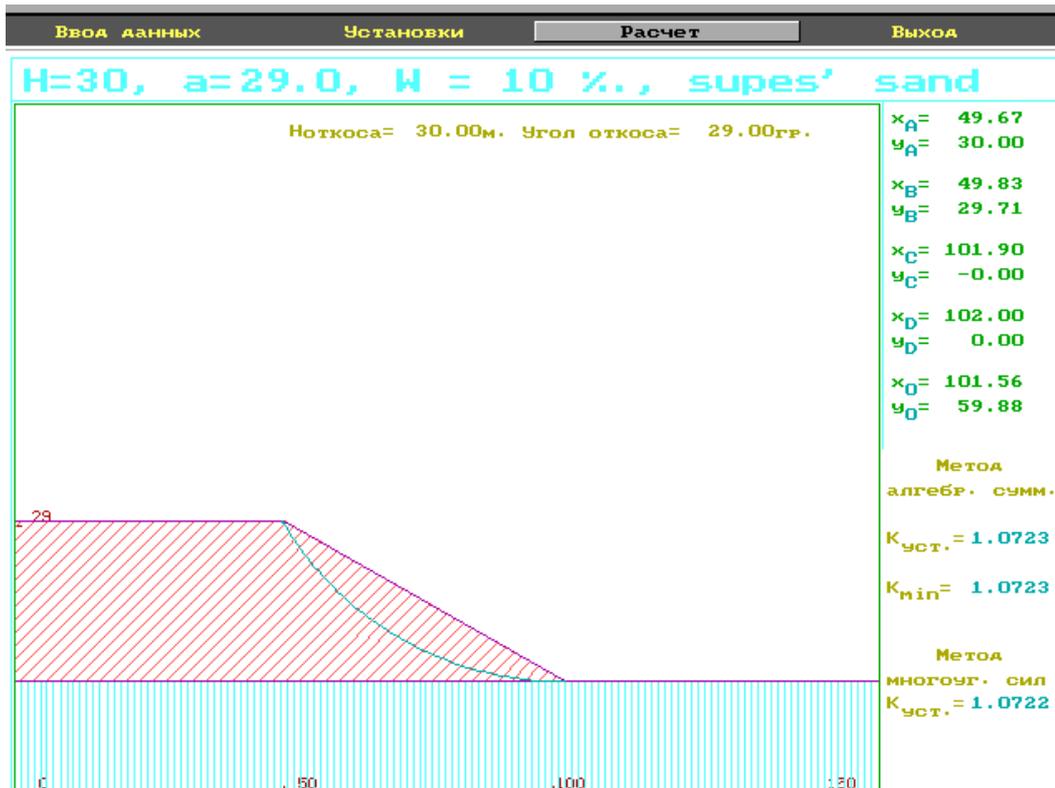


Рисунок 2.48 – Расчет коэффициента запаса устойчивости и положение наислабейшей кривой скольжения при варианте 1.1.4_

При высоте массива 100 м, углах откоса более 25° и складировании хвостов на дресвяные супеси точка входа кривой скольжения в тело массива располагается на расстоянии более 50 м от бровки. Развивается подпошвенный оползень с мощным продавливанием грунта основания и сползанием колоссальных объемов техногенных отложений (рисунки 2.49 и 2.50). При этом даже при такой высоте в случае складирования отходов на супеси песчанистые или трещиноватые гранито-гнейсы кривая скольжения имеет вид, характерный для массивов малой высоты (рисунок 2.51).

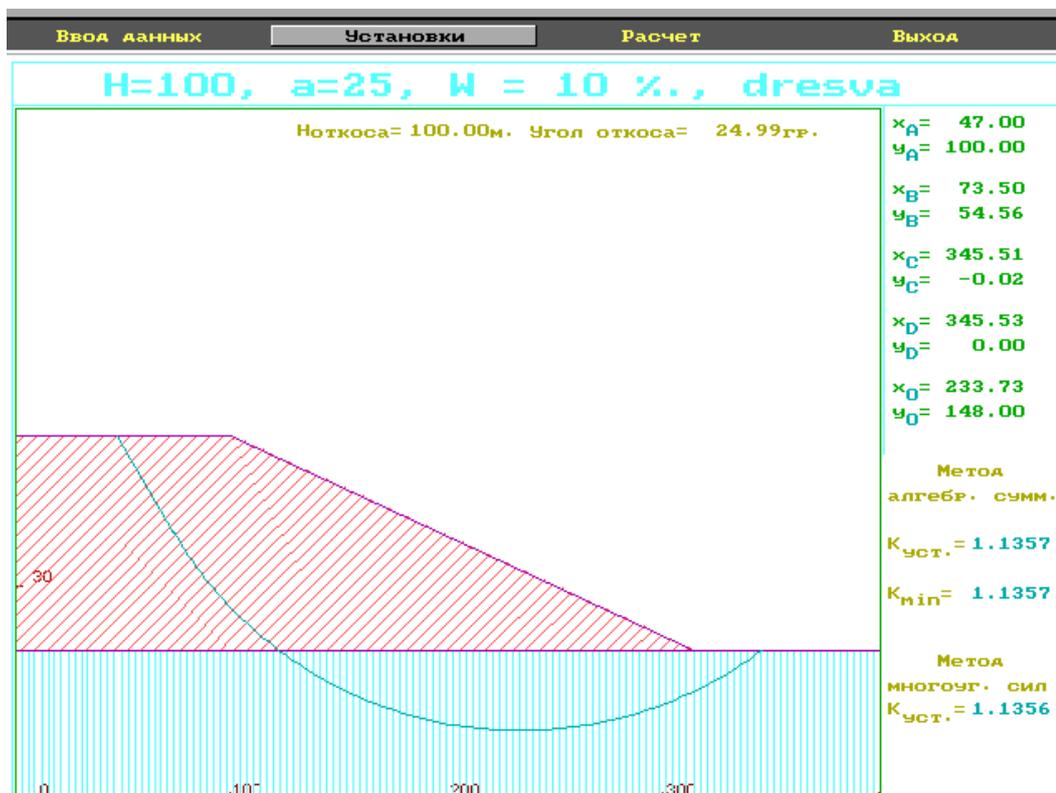


Рисунок 2.49 – Расчет коэффициента запаса устойчивости и положение наислабейшей кривой скольжения при варианте 1.3.2*

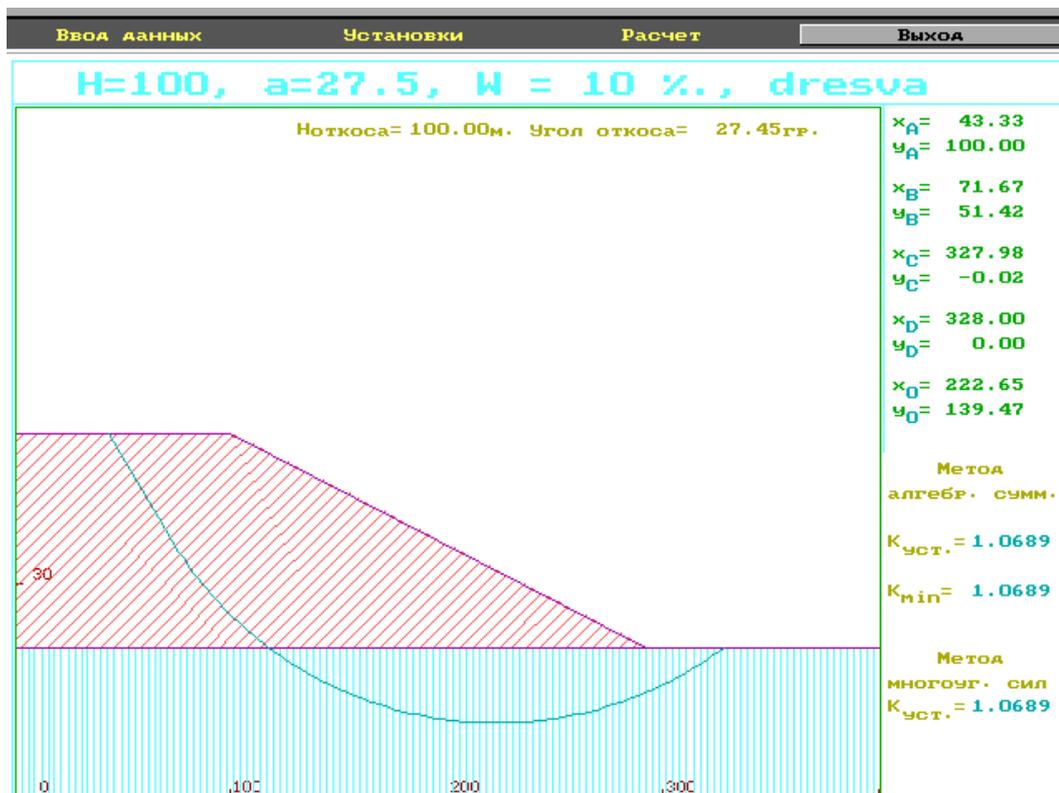


Рисунок 2.50 – Расчет коэффициента запаса устойчивости и положение наислабейшей кривой скольжения при варианте 1.3.3*

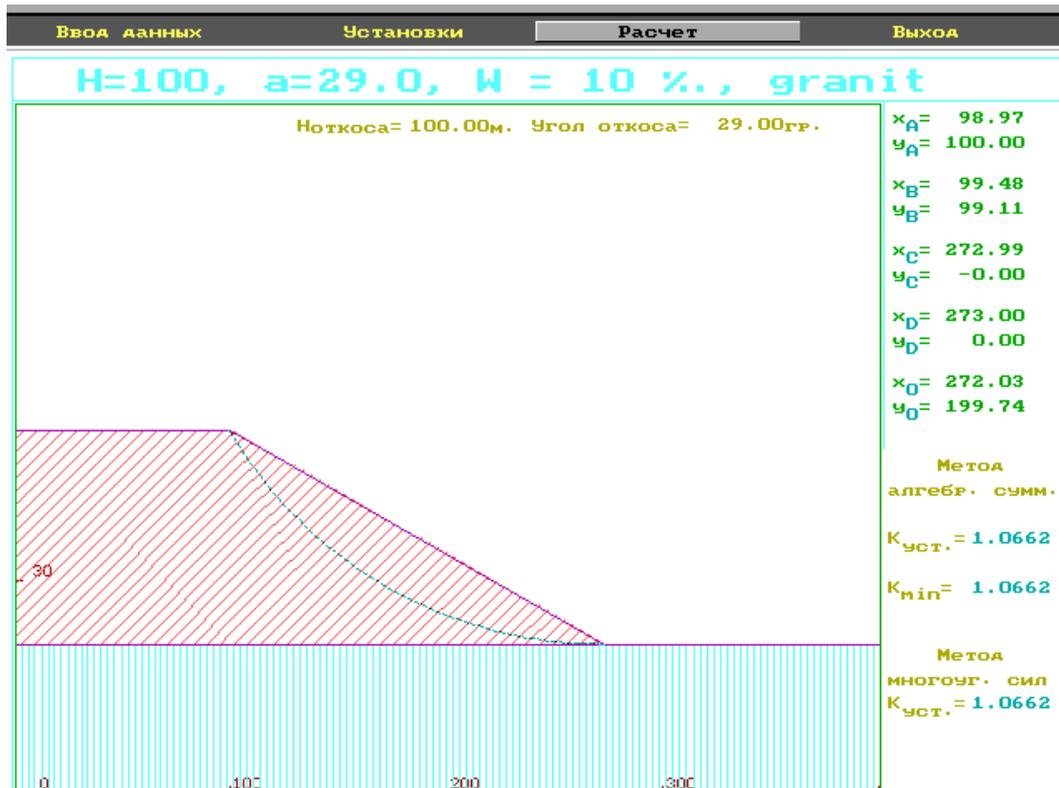


Рисунок 2.51 – Расчет коэффициента запаса устойчивости и положение наислабейшей кривой скольжения при варианте 1.3.4+

Рассмотрим возможность повышения устойчивости откоса до нормативного значения η путем изменения его конфигурации в вариантах: 1.1.2*, 1.1.4+, 1.2.1*, 1.2.3_, 1.2.4_, 1.2.4+, 1.3.3_ и 1.3.3+. Вместо одноярусных массивов смоделируем двухъярусные при $H = 30$ и 50 м, и четырехъярусные при $H = 100$ м. Во всех случаях каждый последующей ярус имеет угол откоса в соответствии с вариантом, высота ярусов одинакова, ширина бермы составляет 12 м. Сравнивались коэффициенты запаса устойчивости, рассчитанные методом алгебраического суммирования сил. В таблице 2.20 показаны результаты расчетов; η_1 и η_2 – соответственно коэффициенты запаса до и после изменения конфигурации.

Таблица 2.20 – Коэффициенты запаса устойчивости η при изменении конфигурации хранилища

№	Высота хранилища H , м	Генеральный угол откоса одноярусного хранилища α_1 , градус	Генеральный угол откоса многоярусного хранилища α_2 , градус	η_1	η_2
1.1.2*	30	25	21,5	1,1950*	1,3788*
1.1.4+		29	25,1	1,0720+	2,0622+
1.2.1*	50	20	18,4	1,3221*	1,4470*
1.2.3_		27,5	24,8	1,2665_	1,6359_
1.2.4*		29	27,0	1,0632_	1,1170_
1.2.4+		29	27,0	1,0723+	1,4913+
1.3.3_	100	27,5	23,6	1,2388_	1,6778_
1.3.3+		27,5	23,6	1,3127+	1,8299+

Рисунки с результатами определения устойчивости массивов с измененной конфигурацией откосов и положение наислабейших кривых скольжения вынесены в Приложение А. Можно заключить, что предложенные многоярусные массивы обладают большим коэффициентом запаса устойчивости, превышающим нормативное значение. Данное заключение справедливо для всех вариантов кроме 1.2.4*.

Введем поверхность ослабления, моделирующую переувлажнение грунтов оснований многоярусных хранилищ, и оценим их устойчивость по коэффициенту запаса устойчивости η_2 . Расчеты производились для вариантов 1.1.4+, 1.2.3_ и 1.3.3+. Результаты сведены в таблицу 2.21 и представлены на рисунках 2.52–2.54.

Таблица 2.21 – Коэффициенты запаса устойчивости при образовании поверхности ослабления

№ варианта	Н массива, м	Генеральный угол откоса α , градус	η_1	η_2
1.1.4+	30	25,1	2,0622+	1,4922+
1.2.3_	50	24,8	1,6359_	1,4395
1.3.3+	100	23,6	1,8299+	1,4897+

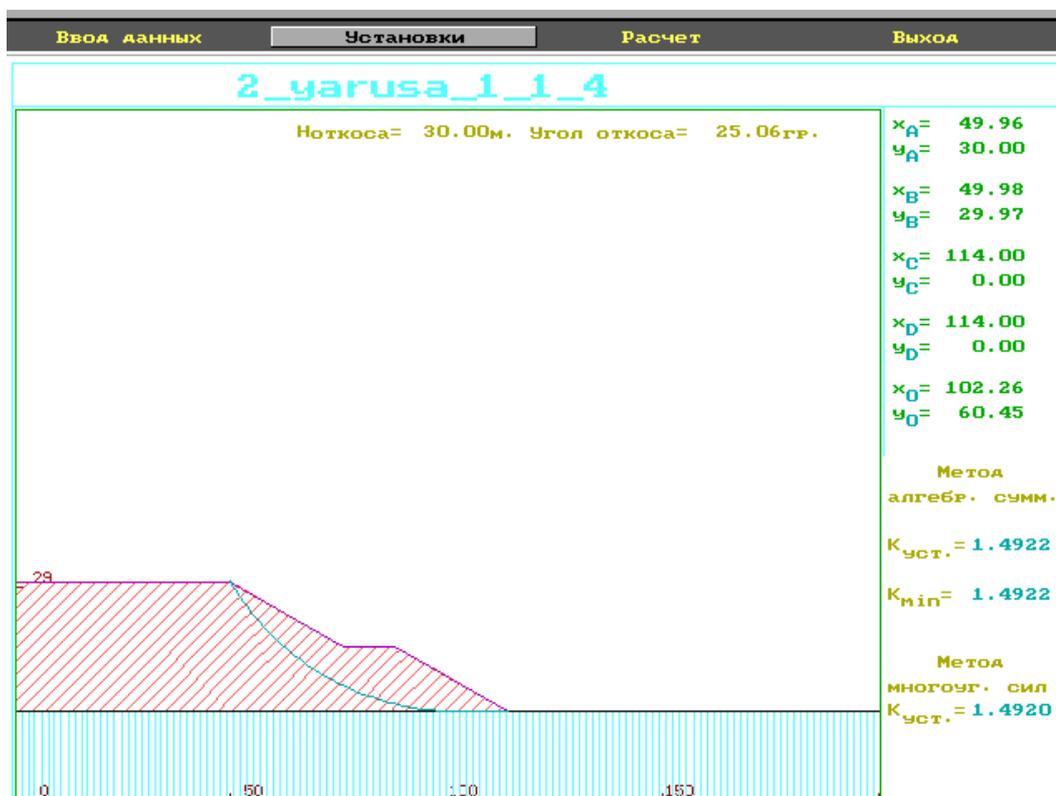


Рисунок 2.52 – Расчет коэффициента запаса устойчивости при наличии поверхности ослабления в основании хранилища, вариант 1.1.4+

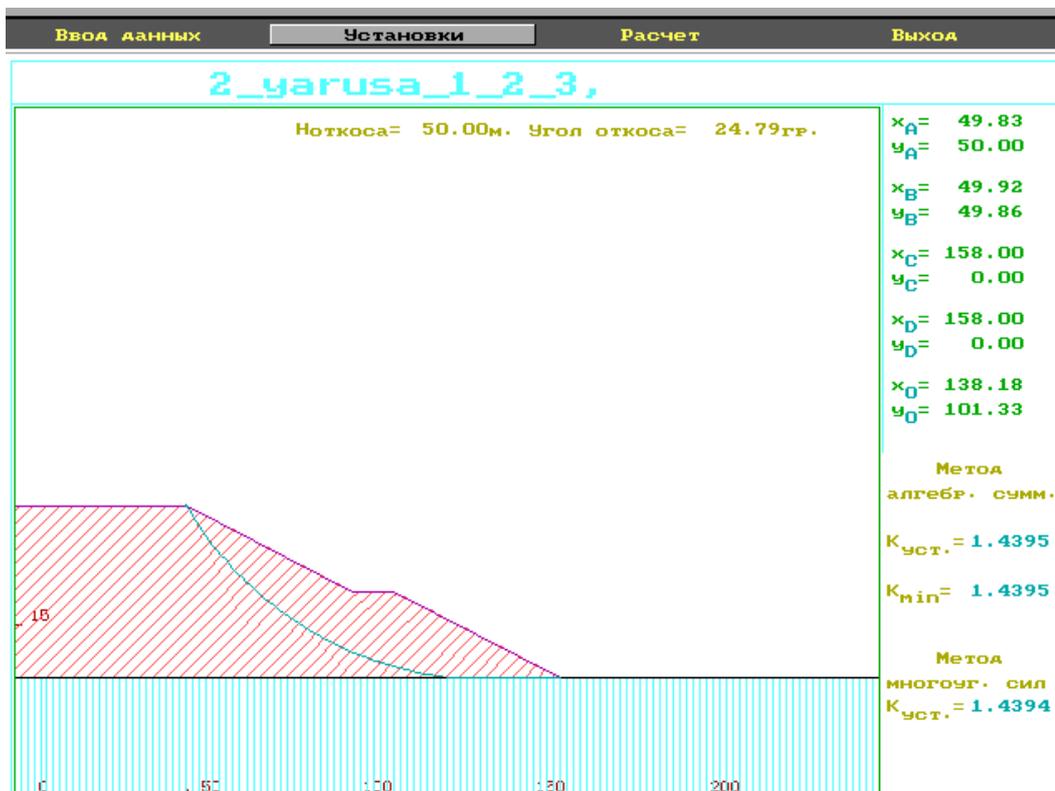


Рисунок 2.53 – Расчет коэффициента запаса устойчивости при наличии поверхности ослабления в основании хранилища, вариант 1.2.3_

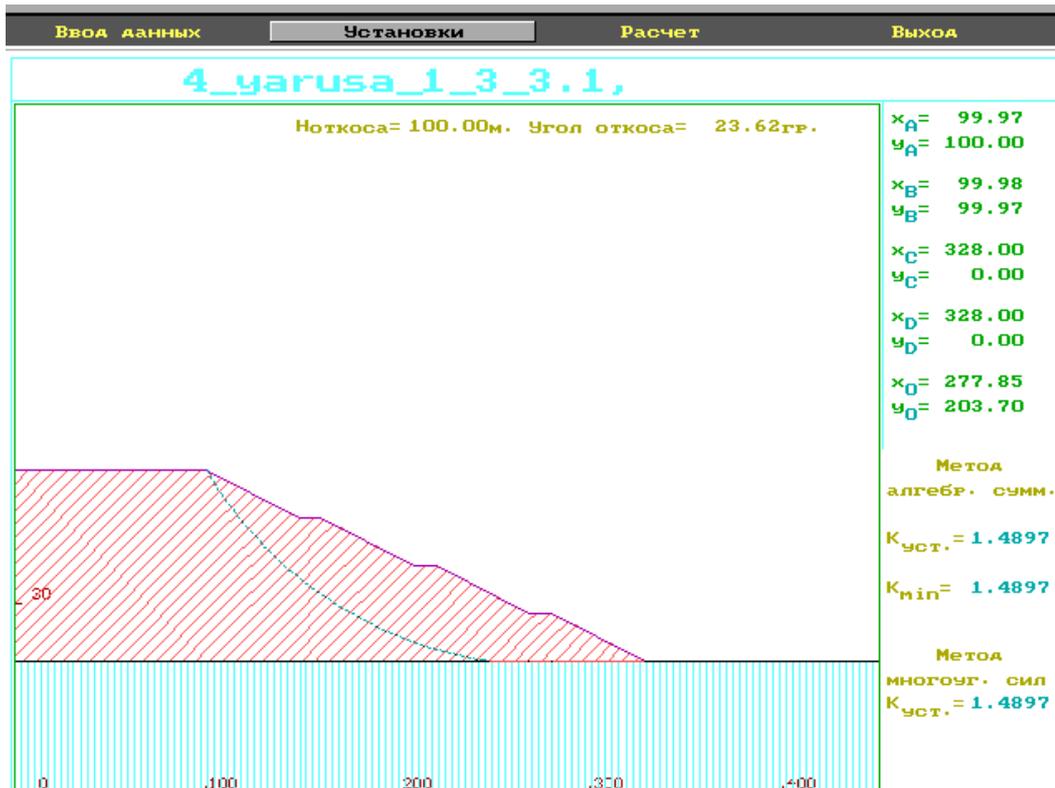


Рисунок 2.54 – Расчет коэффициента запаса устойчивости при наличии поверхности ослабления в основании хранилища, вариант 1.3.3+

Переувлажнение грунтов оснований не снижает $K_{уст}$ до значений ниже нормативного в рассмотренных многоярусных массивах высотой 30, 50 и 100 м. Таким образом наличие горизонта подземных вод, находящегося в близости к основанию хранилища, не приведет к снижению устойчивости $K_{уст} < 1,35$.

2.7 Систематизация факторов, влияющих на технологию возведения и состояние хранилищ глубоко обезвоженных отходов переработки железорудного сырья

Как уже отмечалось, массивы предприятий горно-металлургического комплекса представляют собой постоянно и необратимо изменяющиеся горнопромышленные природно-техногенные системы, состояние которых определяется рядом факторов естественного и техногенного происхождения. В целях предотвращения масштабных разрушений и деформаций дамб хвостохранилищ, откосов отвалов и бортов карьеров необходимо точное знание и понимание природы факторов, влияющих на активизацию и развитие деформационных процессов, приводящих к нарушению устойчивости откосов. Обеспечение устойчивости откосных горнотехнических сооружений является необходимым условием безопасного ведения открытых горных работ.

На текущий момент в работах по выявлению факторов, определяющих состояние массива, рассмотрены в основном такие объекты, как борта и уступы открытых горных выработок, отвальные массивы или дамбы намывных техногенных массивов. Исследования в области идентификации и обоснования факторов, в наибольшей степени влияющих на устойчивость хранилищ обезвоженных хвостов и технологию их формирования, отсутствуют. В связи с необходимостью перехода к новым технологиям складирования сгущенных и глубоко обезвоженных отходов обогащения твердых полезных ископаемых были выполнены исследования, представленные в данной главе, а также проведен анализ ряда других работ [15, 25, 45, 51, 52, 54, 124, 127, 138, 139, 212, 230–238]. Это позволило выделить 4 основные группы факторов, определяющих выбор технологии возведения и устойчивость хранилищ обезвоженных отходов переработки железорудного сырья:

Группа 1. Физико-географические факторы:

- климатические условия территории возведения хвостохранилища;
- рельеф площадки размещения хвостов.

Группа 2. Инженерно-геологические факторы:

- физико-механические свойства техногенных отложений и грунтов оснований хвостохранилищ;

- вещественный состав и свойства укладываемых отходов обогащения железных руд.

Группа 3. Гидрогеологические факторы:

- наличие и скорость формирования техногенного водоносного горизонта в теле массива;
- наличие водоносного горизонта в непосредственной близости к основанию хвостохранилища.

Группа 4. Технологические факторы:

- технология обогащения и складирования хвостов;
- технология сгущения и складирования хвостовых пульп.

В 1-й группе факторов среди климатических условий территории возведения хранилища обезвоженных хвостов наибольший вклад вносят количество осадков и их агрегатное состояние; интенсивность выпадения и испарения осадков; среднегодовые, максимальные и минимальные температуры воздуха; деятельность ветров.

Количество осадков, их характер, интенсивность выпадения и испарения напрямую влияют на объем воды, как поступающей в тело массива, так и безвозвратно утрачиваемой за счет испарения и фильтрации. Рост количества жидких осадков способствует активному формированию или питанию установившегося техногенного водоносного горизонта, особенно в условиях проливных дождей. Чрезмерное увлажнение хвостов на поверхности массива влечет за собой формирование ослабленных зон с последующим оползанием массива в результате его наращивания. Высокий уровень снеговой нагрузки может стать причиной развития деформаций вследствие дополнительного нагружения массива.

В регионах с аридным климатом выбор в пользу технологии возведения хранилищ глубоко обезвоженных отходов обогащения руд может стать результатом острой нехватки воды для нужд предприятия. В этом случае существенно снижается объем безвозвратных потерь воды испарением по сравнению с традиционным способом возведения намывного хвостохранилища, при котором образуется зеркало свободной воды большой площади. С другой стороны, складирование обезвоженных пылеватых и глинистых материалов будет способствовать активному пылению таких массивов, что требует дополнительных мер для снижения пылеобразования.

Температуры воздуха и выветривание являются одними из главных факторов временной изменчивости свойств техногенных массивов, влияющими на характер и степень развития оползневых и других процессов и обуславливающий глубокие изменения физико-механических,

прочностных свойств техногенных отложений и их состава. Развитие процесса выветривания определяется исходя из следующих факторов [239]:

- наличия в породе воды;
- содержания глинистых частиц;
- наличия отрицательных температур и перехода через точку замерзания воды.

При отсутствии в породе воды физическое выветривание практически не наблюдается по причине отсутствия циклов замораживания-оттаивания и увлажнения-высушивания массива. Резкие переходы от отрицательных температур к положительным ускоряет процесс выветривания, что особенно актуально для РФ, многие промышленные регионы в которой расположены в зонах с активным распространением многолетней мерзлоты [240].

Рельеф местности влияет на выбор конфигурации хранилища обезвоженных хвостов, его предельную вместимость, объем земляных работ при возведении ограждающих дамб, затраты на строительство сооружения, а также на характер поверхностного стока. Рассмотренные виды рельефа позволили обосновать выбор площадки размещения хранилища отходов обогащения железных руд в зависимости от концентрации твердого в пульпе и влажности отвальных хвостов.

Из 2-й группы факторов наибольший вклад в оценку состояния массива обезвоженных хвостов вносят физико-механические свойства укладываемых в хвостохранилище материалов. Среди этих свойств были выделены гранулометрический состав, сцепление, угол внутреннего трения, плотность, пористость, сжимаемость, весовая влажность, фильтрационные свойства хвостов. В свою очередь на указанные характеристики хвостов влияет технология обогащения полезных ископаемых и выбранный способ укладки хвостов – сгущенных или глубоко обезвоженных.

На вещественный состав хвостов также оказывает влияние технология обогащения и обогатимость руд. При переработке легкообогатимых руд состав хвостов в основном будет представлен пустой породой (например, кварцем при переработке окисленных железных руд). Переработка труднообогатимых руд увеличивает содержание в хвостах полезного компонента, так как для раскрытия зерен минералов требуется более тонкое измельчение.

Свойства грунтов оснований хвостохранилищ определяют его несущую способность, максимально возможную высоту массива, вместимость хранилища и, в итоге, поведение техногенного массива во времени. Расчеты устойчивости показали, что при организации хранилища глубоко обезвоженных отходов переработки железорудного сырья возможно увеличение высоты массива до 100 м с сохранением нормативных значений коэффициента запаса устойчивости.

Суммируя выводы по 2-й группе факторов, можно заключить, что наиболее устойчивыми являются массивы, формируемые на прочном слабосжимаемом основании и сложенные песчаными частицами из глубоко обезвоженных хвостов. Укладка пылеватых или глинистых частиц существенно снижает прочностные свойства массива, как и наличие линз или зон глинистых материалов в массиве из песчаных частиц. В случае возведения массивов из обезвоженных хвостов маловероятно образование прослоек из глинистых частиц, так как отсутствует сегрегация по крупности и укладываемый материал относительно однороден.

3-я группа факторов представлена влиянием водоносных горизонтов как техногенного происхождения, так и естественного. Формирующийся в результате намыва отходов обогащения руд техногенный водоносный горизонт создает гидродинамическую и гидростатическую нагрузку на откосные сооружения и их основания. Гидростатическое давление является суммарным воздействием гидростатического взвешивания частиц в обводненной части массива и гидродинамического давления фильтрующего потока жидкости [209]. В водонасыщенных глинистых породах под действием веса вышележащих намывных пород возникает поровое давление, являющееся одним из главных факторов развития оползней различного типа. Процесс рассеивания избыточного порового давления занимает длительное время – от нескольких месяцев и лет до десятилетий и даже сотен лет (в зависимости от параметров сооружений и слагающих массив пород) [42, 215, 241–244]. При возведении массива глубоко обезвоженных отходов обогащения железных руд уменьшается объем воды в хранилище и водонасыщенность техногенных отложений, что снижает гидродинамическую и гидростатическую нагрузку на откосы.

Наличие водоносного горизонта и грунтовых вод в непосредственной близости к основанию хвостохранилища может способствовать снижению несущей способности основания за счет уменьшения сопротивления сдвигу грунтов в результате их увлажнения. В перспективе возможен переход нижней части массива в жидкоподвижное состояние за счет капиллярного поднятия жидкости и переувлажнения техногенных отложений. Гидрогеологические факторы являются причиной нарушения устойчивости откосных горнотехнических сооружений различного происхождения в большинстве случаев, поэтому их влияние на состояние массива обезвоженных хвостов нельзя полностью исключить.

Факторы из *4-й группы* оказывают косвенное влияние на состояние массива, их необходимо учитывать при выборе технологии обезвоживания отходов обогащения железных руд с последующим выбором технологии складирования. Сгущению до пастообразного состояния могут быть подвергнуты не все отходы обогащения, поэтому в ряде случаев

формирование хранилищ обезвоженных отходов ограничивается их сгущением до более высокой концентрации твердого в пульпе.

Влияние приведенных групп факторов подтверждается проведенными расчетами характеристик и лабораторными исследованиями свойств отходов обогащения железистых кварцитов. Указанные факторы взаимосвязаны, вносят различный вклад в интегральную оценку состояния массива, что также необходимо учитывать при разработке систем контроля состояния хранилищ отходов обогащения руд. В таблице 2.22 приведены выделенные группы факторов.

Таблица 2.22 – Группы факторов, определяющие технологию возведения и устойчивость хранилищ обезвоженных отходов переработки железорудного сырья

<i>Физико-географические</i>	<i>Инженерно-геологические</i>	<i>Гидрогеологические</i>	<i>Технологические</i>
Климатические условия территории возведения хвостохранилища	Физико-механические свойства техногенных отложений и грунтов основания хвостохранилища	Наличие и скорость формирования техногенного водоносного горизонта в теле массива	Технология обогащения и складирования хвостов
Рельеф площадки размещения хвостов	Вещественный состав и свойства укладываемых отходов обогащения железных руд	Наличие водоносного горизонта в непосредственной близости к основанию хвостохранилища	Технология сгущения и складирования хвостовых пульп

Суммируя приведенные результаты можно сделать вывод, что на устойчивость хранилищ обезвоженных и глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов и состояние всей ГПТС во времени в наибольшей степени влияют следующие факторы:

- рельеф территории возведения хвостохранилища;
- физико-механические свойства хвостов и техногенных отложений, слагающих тело массива;
- скорость формирования техногенного водоносного горизонта в теле массива;
- укладка в хранилище сгущенных или глубоко обезвоженных хвостов.

Выводы

1. Состояние хранилищ глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов и их вместимость зависит преимущественно от рельефа территории расположения объекта, климатических особенностей региона, физико-механических свойств хвостов и отложений оснований, степени водонасыщенности складированных материалов и конфигурации массива.

2. Проведенный анализ хвостов мокрой магнитной сепарации АО «Карельский окатыш» позволяет заключить, что исследованные материалы представлены мелкозернистыми неоднородными песками, состоящими преимущественно из кварца, других силикатов и алюмосиликатов, рудных минералов железа. В среднем хвосты имеют коэффициент водонасыщения $S_r = 0,3$, насыпную плотность $\rho = 1450 \text{ кг/м}^3$, угол внутреннего трения $\varphi = 29,5^\circ$, являются слабосжимаемыми и не склонны к тиксотропному разжижению при механическом воздействии.
3. Компьютерное моделирование объектов складирования отходов переработки железорудного сырья показало, что при укладке глубоко обезвоженных хвостов вместимость хранилищ возрастает на 10,02 %, занимаемая площадь сокращается на 44,03 % и объем земляных работ по возведению дамб обвалования снижается в 1,50÷4,25 раза.
4. Анализ моделей намывных хвостохранилищ, сложенных материалами с различным коэффициентом водонасыщения, показал, что обезвоживание хвостов до остаточной влажности 10 % ($S_r = 0,3$) способствует повышению вместимости на 33,83 % в сравнении со складированием водонасыщенных отходов с $S_r = 0,8$.
5. Оценка состояния массивов глубоко обезвоженных хвостов показали, что наибольшая устойчивость достигается при одноярусном складировании на песчанистых супесях или трещиноватых гранито-гнейсах. При этом максимальный коэффициент запаса устойчивости достигается при:
 - $K_{уст} = 2,0482, \alpha = 25^\circ, H = 30 \text{ м};$
 - $K_{уст} = 2,7802, \alpha = 20^\circ, H = 50 \text{ м};$
 - $K_{уст} = 2,4605, \alpha = 20^\circ, H = 100 \text{ м};$
6. Для четырехъярусного массива высотой 100 м возможно повышение угла откоса до $23,62^\circ$ с сохранением коэффициента запаса устойчивости выше нормативного и равного 1,8298.
7. Выявленные зависимости коэффициента запаса устойчивости от геометрических параметров массива позволили определить предельные углы откоса при складировании на рекомендуемом грунте «трещиноватые гранито-гнейсы» обезвоженных до $W = 10 \%$ хвостов: при высоте $H = 30 \text{ м}, 50 \text{ м}$ и 100 м соответственно $\alpha = 28,8^\circ, 27,9^\circ$ и $27,0^\circ$.

ГЛАВА 3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ФОРМИРОВАНИЯ ХРАНИЛИЩ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ В УСЛОВИЯХ АО «КАРЕЛЬСКИЙ ОКАТЫШ»

Повышения уровня безопасности формирования и эксплуатации откосных горнотехнических сооружений можно достичь при отказе от намывной технологии возведения хвостохранилищ и переходе к складированию предварительно сгущенных или глубоко обезвоженных хвостов. Поскольку хвосты обогатительных фабрик представляют собой значительные объемы промышленной воды в виде тонкодисперсных минеральных суспензий, остро стоит вопрос об очистке этих суспензий от твердой фазы и дальнейшего обезвоживания твердого продукта. Для существенного снижения коэффициента водонасыщения отложений массива предлагается использование вибрационных технологий, позволяющих эффективно сгущать и обезвоживать хвостовые пульпы, а также повторно использовать осветленную воду. Тем самым решаются задачи обеспечения устойчивости откосов и снижения потребления природных водных ресурсов, необходимых для обогащения или других технологических нужд.

3.1 Способы и оборудование для обезвоживания и сгущения отходов обогащения твердых полезных ископаемых

Существующие технологические решения по обезвоживанию суспензий различного происхождения имеют своей целью повышение вместимости хранилищ, сокращение занимаемой ими площади, вовлечение в повторный оборот воды, рост уровня экологической безопасности объектов. Решения от компаний Metso:Outotec, FLSmidth, WesTech Inc., АО «Механобр инжиниринг» и других находят применение на горноперерабатывающих и металлургических предприятиях вследствие отсутствия альтернативных предложений. Однако предлагаемые комплексы включают, как правило, несколько технологических операций, в которых доведение твердой части до нужных кондиций производится поэтапно с использованием сгустителей и фильтров различной конструкции (пресс-фильтры, вакуум-фильтры и другие). При этом глубокое обезвоживание хвостов осуществляется в непосредственной близости от обогатительной фабрики, используемое оборудование громоздко, дорого в эксплуатации и требует для размещения значительной территории. Такой подход влечет повышение стоимости складирования обезвоженных отходов в результате использования большого количества звеньев в технологической цепочке и вовлечения длинной системы конвейерных лент для доставки хвостов на удаленное хранилище.

В современной мировой практике наметились следующие основные направления оптимизации существующих схем обезвоживания суспензий различного происхождения:

- максимальное сокращение аппаратов и упрощение технологической схемы сгущения суспензий до высокой концентрации твердого;
- повышение эффективности и производительности очистки по тонкому классу твердых частиц;
- создание универсального оборудования, позволяющего осуществлять очистку воды, обезвоживание продукта и его сгущение в один цикл обработки в едином аппарате.

Поэтому для решения задачи очистки суспензий наиболее перспективным является использование фильтровальных элементов при воздействии вибраций – технологии, показавшей высокую эффективность при обработке суспензий с различным содержанием и составом твердой фазы [245-253].

При фильтровании на разделительном элементе образуется слой из задерживаемых частиц, что приводит к падению производительности процесса. Особенно сильно это проявляется при использовании фильтровальных материалов с мелкими ячейками (менее 100 мкм). За счет вибраций осуществляется непрерывная регенерация (восстановление) фильтра, что позволяет поддерживать его производительность в течение длительного времени. Наибольший эффект при этом достигается в случае вибрации не всего аппарата, а только жидкости, находящейся внутри него. В последнем случае около фильтра возникают противоточные потоки и гидравлические течения, которые разрушают накопившийся слой частиц [245, 246, 251, 252].

В вибрационных аппаратах в качестве источника упругих колебаний используются механические, пневматические и гидравлические вибровозбудители с диапазоном частот от 50 до 200 Гц. Исследованию воздействия колебаний звукового диапазона частот на процесс фильтрования сточных вод горных предприятий, интенсификации процессов сгущения и разделения суспензий, поведения твердых частиц и жидкости, а также конструированию вибрационных установок посвящено значительное число работ как у нас в стране, так и за рубежом [254-257]. Известно устройство для обработки суспензий [258], которое представлено на рисунке 3.1.

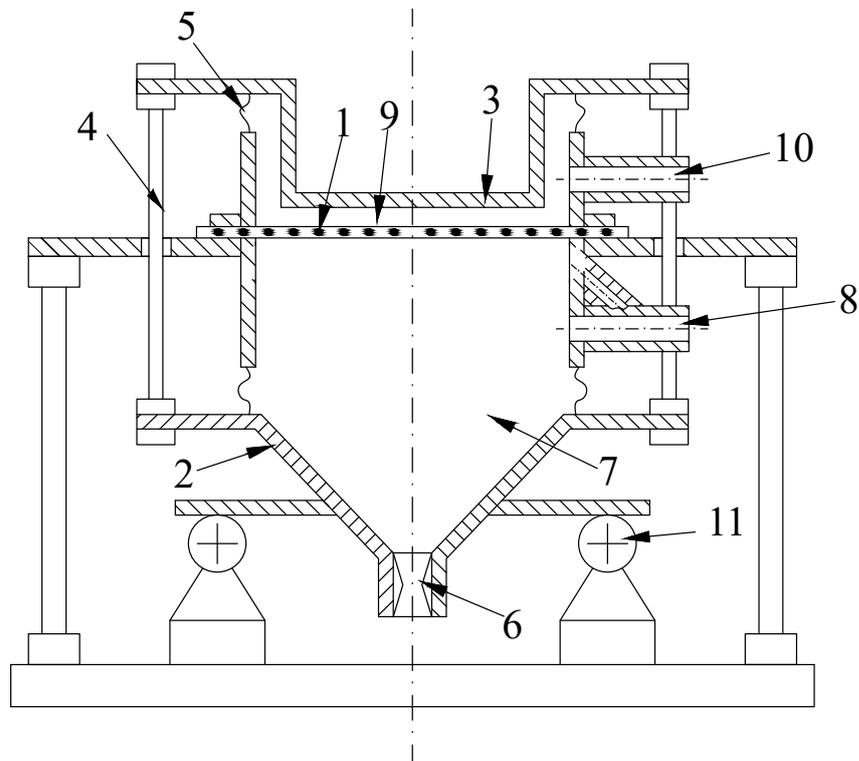


Рисунок 3.1 – Вибрационное устройство для обработки суспензий

Основными элементами устройства являются фильтровальный картридж *1* для разделения взвешенных частиц по размерам и возбудитель вибраций для регенерации фильтровальной перегородки. Вибровозбудитель выполнен в виде двух поршней *2* и *3*, расположенных по обе стороны от фильтра и жестко связанных между собой тягами *4*. Поршни расположены на гибких элементах *5*, причем поршень *2* выполнен в виде конуса, в вершине которого расположено разгрузочное устройство *6*. Фильтровальная перегородка делит корпус устройства на камеру *7* исходной суспензии с загрузочным патрубком *8* и камеру *9* осветленной суспензии с выходным патрубком *10*. Поршень *2* соединен с источником вибраций *11*.

Принцип работы устройства следующий. В камеру исходной суспензии *7* подается обрабатываемая жидкость. Суспензия с частицами, размер которых меньше размера ячеек фильтра, проходит через фильтр и отводится из аппарата через патрубок *10*. Твердая фаза задерживается фильтровальной перегородкой и отводится через разгрузочное приспособление *6*. За счет колебаний поршней происходит очищение фильтра. Колебания поршня *2* разрыхляет осадок, накопившийся в конусе, что ускоряет выгрузку твердой фракции. Однако, данное устройство не позволяет обезвоживать продукт до высокой концентрации твердой фазы.

Также известен вибрационный фильтр для очистки промышленных вод горных предприятий [259], представленный на рисунке 3.2.

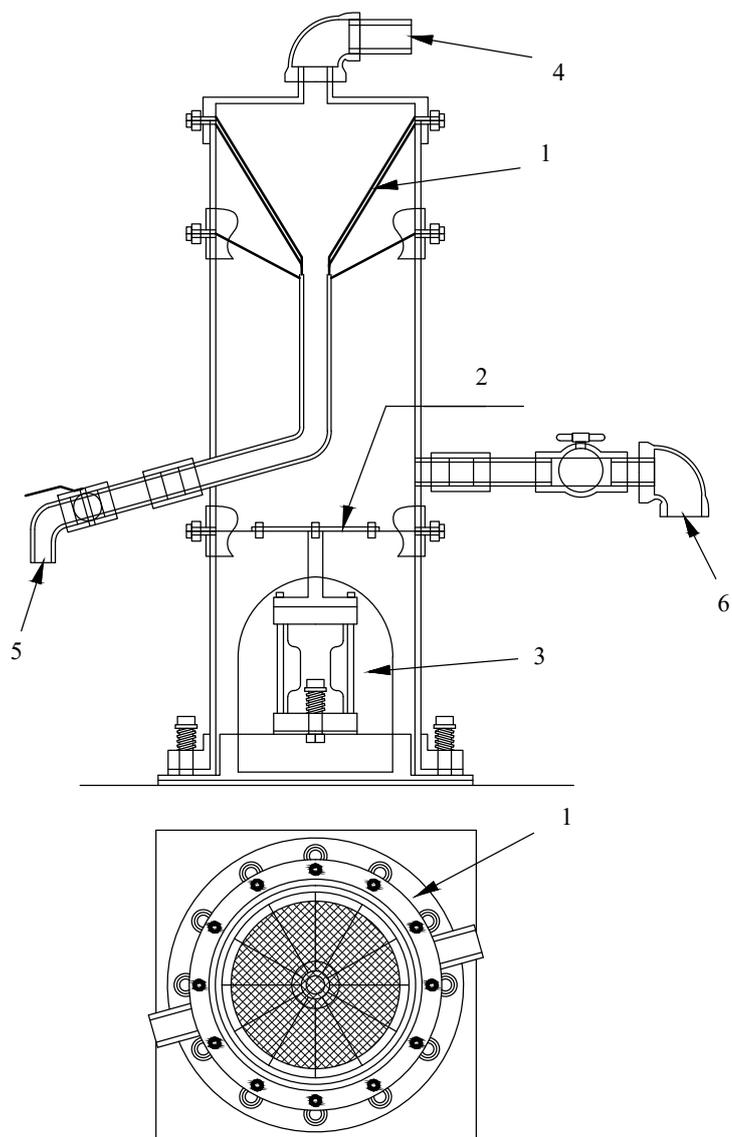


Рисунок 3.2 – Вибрационный фильтр для очистки промышленных вод горных предприятий

Фильтр представляет собой цилиндрический корпус с установленным внутри него фильтровальным элементом *1* в виде усеченного конуса. В обрабатываемой жидкости возбуждают колебания с помощью поршня *2*, установленного на гибкой мембране. Сам поршень установлен в камере очищенной жидкости и жестко соединен с вибратором *3*. Подача обрабатываемой суспензии *4* осуществляется в верхнюю часть аппарата. Разделение взвесей по размерам происходит на фильтроэлементе. Крупные частицы отводятся через патрубок *5*, соединенный с нижней частью фильтра. Очищенная жидкость отводится через другой патрубок *6*, вмонтированный в камеру исходной суспензии. За счет колебаний жидкости происходит регенерация фильтровального элемента.

Несмотря на простоту конструкции и технологичность процесса данный вибрационный фильтр не нашел широкого применения в практике очистки сточных вод промышленных предприятий. Это связано с рядом недостатков устройства – не обеспечивает надежную работу при использовании плотных фильтровальных материалов, имеет низкую производительность. Кроме того, фильтр и по конструкции, и по технологии проведения процесса не позволяет обезвоживать и сгущать задерживаемый продукт.

На предприятиях горной промышленности применяют вибрационный аппарат [260] для классификации и сгущения пульп (рисунок 3.3).

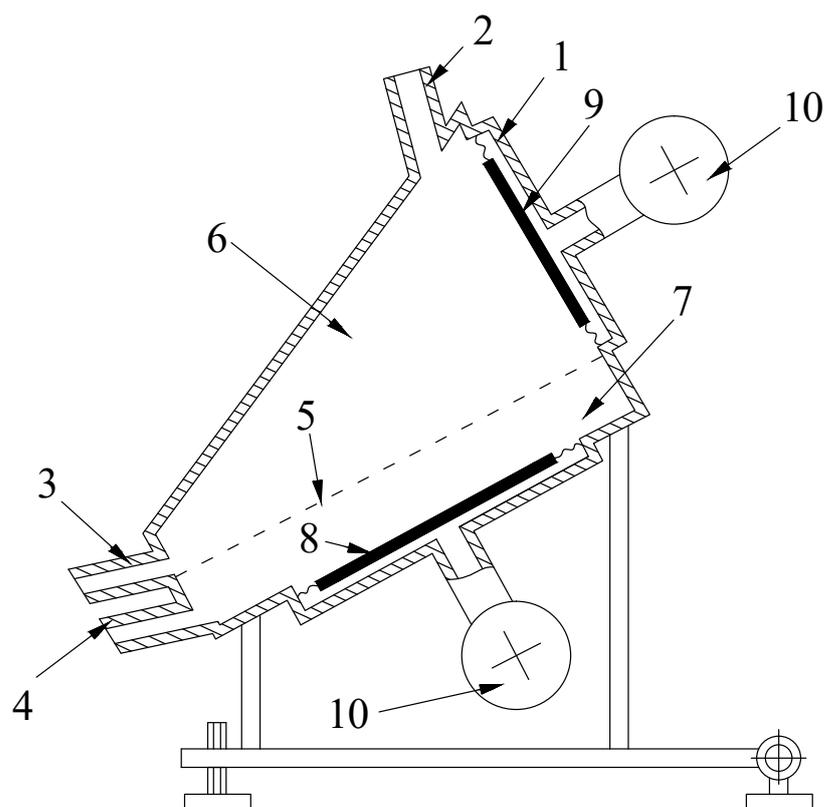


Рисунок 3.3 – Вибрационная машина для классификации и сгущения пульп

Корпус 1 аппарата имеет входной 2 и два выходных 3 и 4 патрубка. Фильтровальный элемент 5 установлен внутри корпуса и делит его на камеру исходной суспензии 6 и камеру фильтрата 7. В корпусе установлено два поршня 8 и 9. Поршень 8 установлен в камере фильтрата параллельно фильтру, а поршень 9 установлен в камере исходной суспензии перпендикулярно плоскости фильтра. Поршни приводятся в колебание вибраторами 10. Корпус расположен на основании, которое снабжено винтовым шарниром, за счет чего возможно изменять угол наклона корпуса. Поршни колеблются независимо друг от друга, что позволяет сдвигать колебания по фазе.

Рассмотрим работу вибрационной машины. В камеру исходной суспензии 6 через патрубок 2 поступает обрабатываемый продукт. Жидкая фаза с мелкими частицами проходит через фильтровальный элемент 5, поступает в камеру фильтрата 7 и отводится через входной патрубок 4. Крупные частицы задерживаются и отводятся через патрубок 3. Совместное воздействие нормальных и тангенциальных колебаний жидкости увеличивает производительность установки и повышает эффективность ее работы. Изменение угла наклона также способствует улучшению этих параметров. Данный аппарат позволяет классифицировать и сгущать пульпу, но не обеспечивает обезвоживания твердого продукта.

Проведенный обзор существующих устройств для классификации и сгущения хвостовых пульп горных предприятий с применением вибраций показал перспективность их применения. Однако все представленные аппараты не позволяют сгущать исходный продукт до высокого содержания твердой фазы. Поэтому остро стоит вопрос о создании нового аппарата или модификации имеющегося для одновременной фильтрации осветленной воды, классификации, сгущения и обезвоживания хвостов обогатительных фабрик.

3.2 Модернизация вибрационной машины для эффективного сгущения и очистки хвостовых пульп для складирования обезвоженных отходов обогащения

В Горном институте «Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» создана вибрационная машина для сгущения и обезвоживания продуктов горного производства [261]. В машине одновременно проходят процессы промывки, классификации, транспортирования и обезвоживания пульпы. В процессе работы исходная пульпа подается в корпус машины и классифицируется на фильтроэлементе по заданному классу. Задерживаемые частицы скапливаются в нижней части машины, транспортируются, обезвоживаются и выводятся из корпуса машины.

Главным элементом машины является шестигранный барабан, боковые поверхности которого являются перфорированными (например, шпальтовые сита или другие фильтроэлементы). Барабан разделен на две зоны: нижнюю и верхнюю. На внутренней стороне барабана установлена металлическая спираль, которая предназначена для транспортирования твердого продукта в верхнюю часть машины. Шестигранный барабан состоит из сварного каркаса и закрепляемых в нем кассет с фильтрами. Барабан установлен в поддон под углом к горизонту. На дне поддона размещены колеблющиеся от вибровозбудителя мембраны. Имеется устройство для подачи исходной суспензии и устройство для слива очищенной жидкости.

При работе аппарата пульпа подается в нижнюю часть шестигранного барабана, проходит через его боковые грани, поступает в поддон и отводится из него через устройство для слива

очищенной жидкости. В поддоне с помощью автоматики поддерживается заданный уровень жидкости. В результате верхняя часть барабана находится под жидкостью, а нижняя часть погружена в суспензию. В нижней зоне происходит классификация и сгущение твердого продукта, а в верхней его зоне обезвоживание и сушка.

За счет транспортирующей спирали при вращении барабана плюсовой продукт твердой фазы последовательно проходит нижнюю, верхнюю зоны и затем выгружается на транспортер. Вибраторы с излучающими поршнями создают в жидкости интенсивные колебания. Установлено, что каждая из граней барабана при вращении способствует установлению каскадно-водопадного режима движения твердых частиц (рисунок 3.4) за счет попеременного поднятия и сбрасывания твердых составляющих обрабатываемой суспензии. Одновременное вибрационное воздействие на обрабатываемую суспензию и каскадно-водопадный режим движения способствует генерации в машине мощных вихревых потоков, благодаря которым ускоряется процесс разрушения глинистых частиц и других твердых составляющих пульпы.

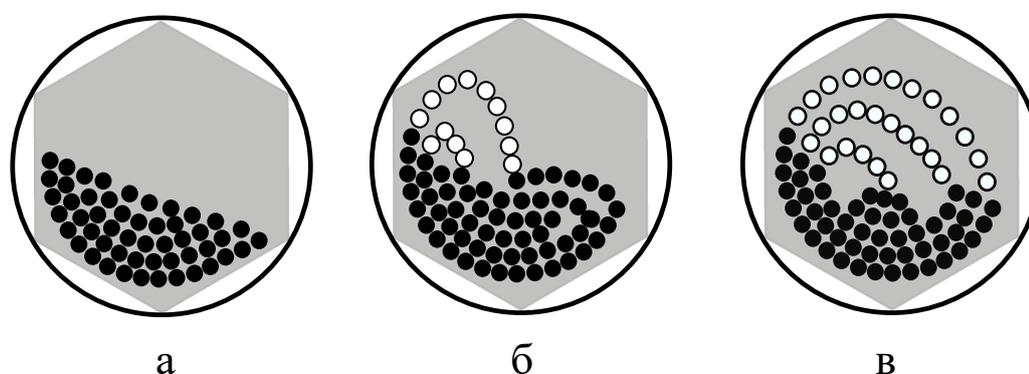


Рисунок 3.4 – Режимы работы барабана и характер движения зерен в вибрационной машине
а – каскадный режим; б – каскадно-водопадный режим; в – водопадный режим

В ходе испытаний в 2019 году был создан опытный образец вибрационной машины, затем в натурных условиях проверялась работоспособность пилотной конструкции, выбирались оптимальные режимы работы установки. В производственных условиях была апробирована технология классификации и сгущения. В качестве фильтровальной перегородки использовалось шпальтовое сито с размером ячеек 100–150 мкм. Предусматривалось определение эффективности работы вибрационной машины и её производительность. В процессе эксперимента определялся дисперсный состав исходного продукта и плюсового продукта. Обрабатываемая суспензия подавалась непосредственно в вибрационную машину. Вибрации возбуждались на частоте 7 Гц с амплитудой семь миллиметров. Перепад давления на шпальтовых ситах составлял 0,1 атмосферы.

Проведенные испытания показали целесообразность применения предложенной конструкции вибрационной машины для одновременного проведения процессов классификации, сгущения и обезвоживания обрабатываемых пульп, обеспечивающей надежную классификацию по мелкому классу, его сгущение до удовлетворительной влажности и транспортирования. Разработанная полупромышленная конструкция в процессе эксплуатации показала высокую надежность и работоспособность. Однако в процессе эксперимента было установлено, что предложенная конструкция не обеспечивает эффективного обезвоживания твердого продукта высокодисперсных суспензий. Поэтому была разработана модификация вибрационной машины, которая позволяет обезвоживать мелкую твердую фазу суспензий (по типу хвостовых пульп) до более высоких концентраций в сгущенных пульпах. На рисунке 3.5 представлена принципиальная схема модифицированной вибрационной машины.

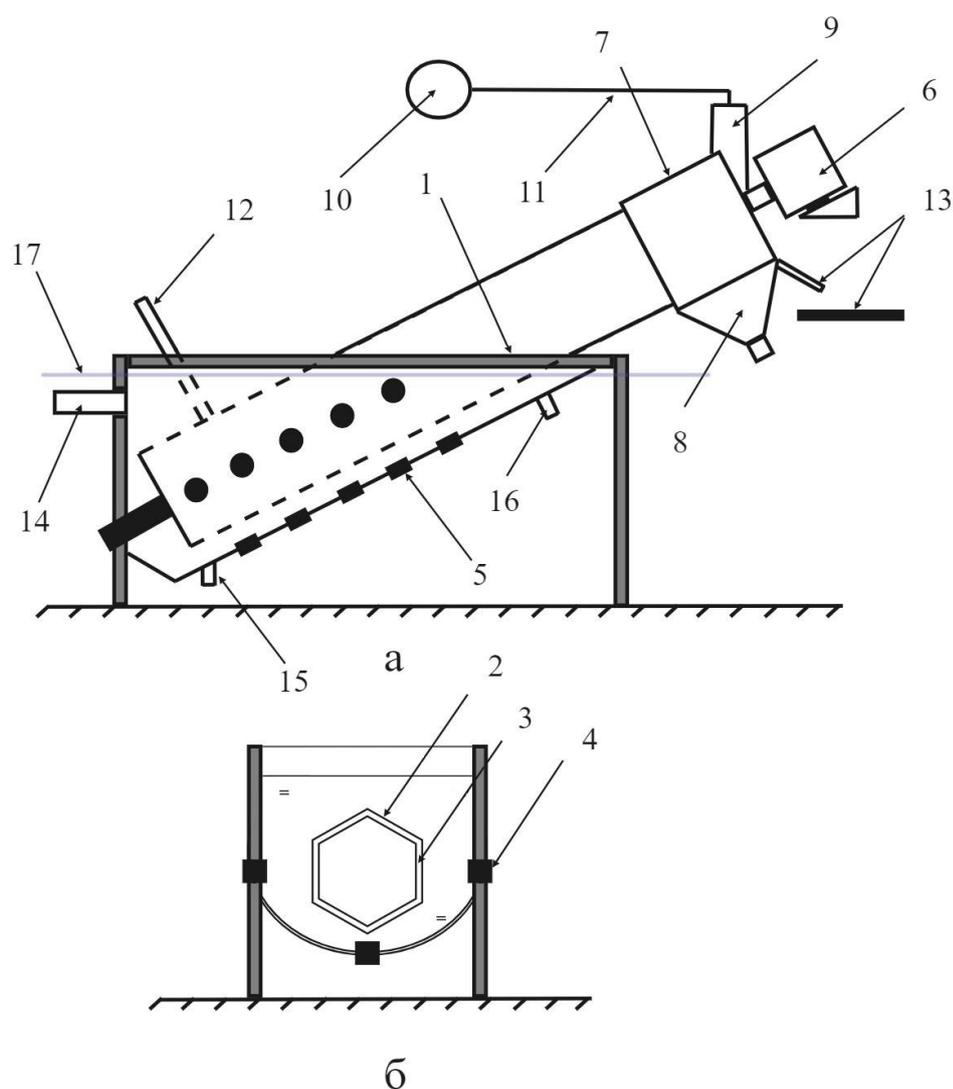


Рисунок 3.5 – Схематичное изображение модифицированной вибрационной машины
а – общий вид; б – вид в разрезе

Данная модификация вибрационной машины представляет собой сварную станину – ванну 1, в которую помещают шестигранный барабан 2 с перфорированной боковой поверхностью и транспортирующей спиралью 3. В нижней части ванны и по её бокам установлены вибровозбудители с излучающими мембранами 4 и 5. С помощью привода 6 вращается шестигранный барабан. Машина снабжена цилиндрической обечайкой 7, диффузором 8, коллектором 9 с вентилятором 10 и трубопроводом 11. При этом обечайка закреплена снаружи верхней части шестигранника так, что каждая грань призмы образует с прилегающей к ней боковой поверхностью обечайки замкнутую полость. Половина площади обечайки вдоль ее образующей выполнена с перфорацией.

Устройство также содержит загрузочное и разгрузочное приспособления 12 и 13 соответственно, патрубки 14, 15 и 16. Диффузор соединен посредством патрубка с источником газообразного теплоносителя. Через патрубок 12 в шестигранный барабан поступает исходная суспензия (хвостовая пульпа). Ванна заполняется до определенного уровня 17. Барабан приводится во вращение, а в жидкости, заполняющей ванну и шестигранный барабан, возбуждают вибрации. При вращении шестигранного барабана каждая его грань осуществляет поднятие и сбрасывание твердого продукта. В результате организуется каскадно-водопадный режим движения материалов. Частота ω , с которой происходит поднятие и сбрасывание материала, определяется выражением:

$$\omega = m \cdot n, \quad (3.1)$$

где m – число граней призмы;

n – скорость вращения.

Интенсивное перемешивание материала сопровождается его разделением на перфорированной поверхности барабана. При этом зерна материала, размер которых меньше ячеек фильтра, проходят через них и по днищу ванны поступают к разгрузочному патрубку 15 и далее выводятся из машины. Зерна, размер которых превышает размер ячеек фильтра, остаются в барабане и перемещаются транспортирующей спиралью 3 вверх. Совокупное влияние колебания жидкости и каскадно-водопадный режим движения суспензии обеспечивает эффективную регенерацию фильтровального элемента.

В зоне барабана, лежащей выше уровня заполнения, происходит обезвоживание твердой фазы суспензии. Для повышения эффективности обезвоживания машина снабжена дополнительным устройством, расположенном в верхней части барабана, и обеспечивающим обогрев твердой фазы. Для этого через патрубок в диффузор поступает газообразный теплоноситель (горячий газ, воздух, пар и т.д.), сам диффузор смещен в сторону вращения обечайки и охватывает ее нижнюю часть.

Чередование сплошных и перфорированных зон обеспечивает подвод теплоносителя в каждую из полостей и из них через поверхность шестигранного барабана к материалу. Подъем и сбрасывание зерен материала, придающее ему каскадно-водопадный характер движения, сопровождается изменением толщины слоя материала и, как следствие, изменением его сопротивления движению теплоносителя. В результате постоянно меняется скорость потока теплоносителя и его направление. Поскольку твердый материал находится в интенсивном движении, то происходит его обдувание по всей толщине слоя. Это приводит к эффективной сушке и обезвоживанию твердого материала. При этом выполнение конструкции модифицированной версии вибрационной машины с наклоном в $3\div 7^\circ$ (возможна регулировка для достижения наилучших показателей в зависимости от параметров суспензий и характеристик фильтровальных элементов) обеспечивает надежное транспортирование обезвоженного продукта по рабочему пространству установки и доведение продукта до кондиций, пригодных для транспортирования ленточными конвейерами.

Для определения содержания воды в хвостах после обработки в модифицированной вибрационной машине после каждого испытания производился отбор проб для проведения анализа на влажность. Из объемной представительной пробы методом квартования выбиралась навеска готового обезвоженного продукта массой не менее 2000 г. Затем данная навеска подвергалась многократному квартованию до получения остатка массой $25\div 50$ г. Используемая для проведения анализа итоговая навеска хвостов массой m_1 размещалась ровным слоем в чистый, предварительно высушенный до постоянной массы металлический противень и взвешивалась. Масса навески для каждого анализа на влажность составляла не менее 200 г, масса пустого высушенного противня составляла 500 г. Далее противень с навеской помещался в сушильный шкаф, нагретый до температуры 105 ± 5 °С, и выдерживался при заданной температуре 2 часа. По истечении 2-х часов навеска массой m_2 извлекалась из сушильного шкафа и взвешивалась в горячем состоянии на электронных лабораторных весах AJ-6200SE с точностью 10 мг (погрешность измерения 0,05 %). Влажность готового продукта определялась как:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100 \% \quad (3.2)$$

Для наиболее точного определения влажности навеска повторно отправлялась в сушильный шкаф. Измерения массы навески проводились каждые 15 минут до момента прекращения изменения массы навески и достижения постоянной массы. В таблице 3.1 представлены усредненные результаты определения значения остаточной влаги в обработанных хвостах обогащения железной руды, показавшие, что влажность обезвоженного продукта всегда находилась в диапазоне $8\div 11$ %. Всего было проведено 6 серий испытаний с различным

соотношением твердой фракции к жидкости и различными фильтровальными элементами в модифицированной вибрационной машине (по 3 эксперимента в каждой серии).

Таблица 3.1 – Весовая влажность отходов обогащения железистых кварцитов после обработки в модифицированной вибрационной машине

<i>№ серии</i>	<i>Масса исходной навески m_1, кг</i>	<i>Масса исходной навески с поддоном, кг</i>	<i>Масса навески после сушки m_2, кг</i>	<i>Масса навески с поддоном после сушки, кг</i>	<i>Влажность W, %</i>
1	0,205	0,705	0,190	0,690	7,89
2	0,210	0,710	0,193	0,693	8,81
3	0,208	0,708	0,190	0,690	9,47
4	0,220	0,720	0,203	0,703	8,37
5	0,215	0,715	0,195	0,695	10,26
6	0,218	0,718	0,197	0,697	10,66

Суммируя все вышесказанное можно однозначно заключить, что модифицированный вариант вибрационной машины позволяет значительно улучшать процесс обезвоживания хвостовых пульп и суспензий различного вида, что чрезвычайно важно при ее использовании для возведения хранилищ отходов обогащения твердых полезных ископаемых в соответствии с принципами НДТ.

3.3 Исследование процессов классификации, сгущения и обезвоживания отходов обогащения железистых кварцитов в вибрационной машине

В задачи опытных исследований входило определение работоспособности модифицированной конструкции вибрационной машины, при этом эффективность работы обогатительного оборудования в значительной мере зависела от состава и физико-механических свойств твердой фазы обрабатываемой суспензии.

Состав твердой фазы пульпы, степень ее дисперсности, концентрации и физико-механические характеристики зависят от генетических особенностей перерабатываемых горных пород, а также от глубины обогащения полезного ископаемого. При анализе свойств пульп необходимо учитывать как свойства дисперсной твердой фазы, представленной многокомпонентной, полидисперсной смесью частиц различной формы, плотности, шероховатости, смачиваемости, так и характеристики жидкой фазы с учетом их взаимодействия.

Для проведения исследования обезвоживания отходов обогащения руд были взяты текущие хвосты обогащения железистых кварцитов Костомукшского железорудного месторождения. Из представленной таблицы 2.2 видно, что большая часть твердой фазы (94–95 %) хвостовой пульпы имеют размеры более 45 микрон. Поэтому для их эффективной очистки необходимо применять фильтры с размерами ячейки 45 мкм. Кроме того, при разработке новых методов очистки производственных вод необходимо учитывать их форму ($K_{\text{формы}}$ – коэффициент формы). Расчеты показали, что по форме представленные частицы отличаются в несколько раз, так как $K_{\text{формы}} = 3 \div 4$. Крупнозернистые фракции представлены обломками железистых кварцитов амфиболо-кварцевого состава с вкрапленным дисперсным магнетитом. С уменьшением размера фракции возрастает количество свободного магнетита с правильной, изометрической формой кристаллов. Таким образом, по химическому составу хвосты можно отнести к кварцсодержащим отходам с примесями оксидов железа и оксидов других металлов, представленных в меньшем количестве.

В таблице 3.2 представлено процентное содержание твердых частиц в питании установки и плотность пульпы при различном содержании твердого во время проведения экспериментов. Текущее значение твердого в исходной пульпе на предприятии колеблется в диапазоне 3–6 %_{масс} (среднее 4,8 %_{масс}), однако проект развития хвостового хозяйства до 2043 года предусматривает реконструкции сооружений с учетом выпуска в хранилище сгущенных пульп с концентрацией твердого до 35–45 %_{масс} [189]. В связи с этим исследование обработки в вибрационном аппарате пульпы с содержанием 45 % твердых частиц также представляет высокий интерес.

Таблица 3.2 – Характеристики пульп в питании вибрационной установки во время эксперимента

<i>Содержание твердого в питании, %_{масс}</i>	<i>Плотность пульпы, кг/м³</i>
3 %	1019,5 кг/м ³
4,8 %	1031,5 кг/м ³
45 %	1401,3 кг/м ³

Плотность пульпы при различном содержании твердого рассчитывалась по следующему алгоритму. Рассмотрим расчет плотности на примере пульпы с содержанием 45 % твердого. При условии, что расчет ведется на 1 м³ воды (или 1000 кг воды), массовая доля запишется как:

$$\omega_{\text{масс}} = \frac{m_{\text{хвостов}}}{m_{\text{хвостов}} + m_{\text{воды}}}, \quad (3.3)$$

Где $m_{\text{хвостов}}$ – искомая масса хвостов, кг;

$m_{\text{воды}}$ – масса 1 м³ воды, равная 1000 кг.

Тогда

$$0,45 = \frac{m_{\text{хвостов}}}{m_{\text{хвостов}} + 1000}$$

$$m_{\text{хвостов}} = 818,2 \text{ кг}$$

При добавлении 818,2 кг хвостов в 1 м³ воды объем получаемой суспензии увеличивается на величину:

$$V_{\text{хвостов}} = \frac{m_{\text{хвостов}}}{\rho_{\text{хв.ист}}} = \frac{818,2}{2750} = 0,2975 \text{ м}^3,$$

где $\rho_{\text{хв. ист}}$ – плотность минеральных частиц (2750 кг/м³).

Следовательно объем суспензии с 45 %_{масс} хвостов составит:

$$V_{\text{пульпы}}^{45\%} = V_{\text{хвостов}} + V_{\text{воды}} = 0,2975 + 1 = 1,2975 \text{ м}^3$$

Тогда плотность пульпы с 45 %_{масс} хвостов будет равняться:

$$\rho_{\text{пульпы}}^{45\%} = \frac{m_{\text{хвостов}} + m_{\text{воды}}}{V_{\text{пульпы}}^{45\%}} = \frac{818,2 + 1000}{1,2975} = 1401,3 \text{ кг/м}^3$$

Аналогичным образом были рассчитаны плотности пульп с 3 % и 4,8 % твердого в питании установки.

Из практики горного производства известна целесообразность и эффективность очистки производственных вод с помощью фильтров. В качестве фильтровальных элементов (картриджей) используются различные материалы. Эффективность обработки промышленных суспензий и производительность процесса будет определяться свойствами используемого фильтровального материала, которые характеризуются следующими показателями:

- гидравлическая (напорно-расходная) характеристика;
- тонкость фильтрования;
- полнота фильтрования $K_{\text{полн. фильтр}}$;
- фильтруемость;
- ресурс фильтрования (ресурс работы).

Для очистки отходов обогащения промышленных обогатительных фабрик наиболее целесообразно использовать шпальтовое сито с размерами ячеек 50÷70 мкм, выпускаемое фирмой Humboldt, сетки серии PWP, Pyramid и Pyramid Plus выпускаемые фирмой Derrick с размерами ячеек 43÷45 мкм. Эти фильтры изготавливаются из сеточной перегородки типа сэндвич, представляющих собой два тонкоячеистых слоя и матрицу из грубой сетки. Три слоя сетки соединены вместе, графированы и приклеены к перфорированной основе.

С помощью этих фильтров можно производить более тонкую очистку суспензий при больших нагрузках, что улучшает работу фильтровальной машины. На первом этапе экспериментальных работ исследовались характеристики шпальтового сита и сетки Pyramid. Полученные гидравлические характеристики этих фильтров представлены на рисунке 3.6.

Гидравлические характеристики фильтровальных материалов определялись на дистиллированной воде, не содержащей твердых взвешенных частиц и примесей.

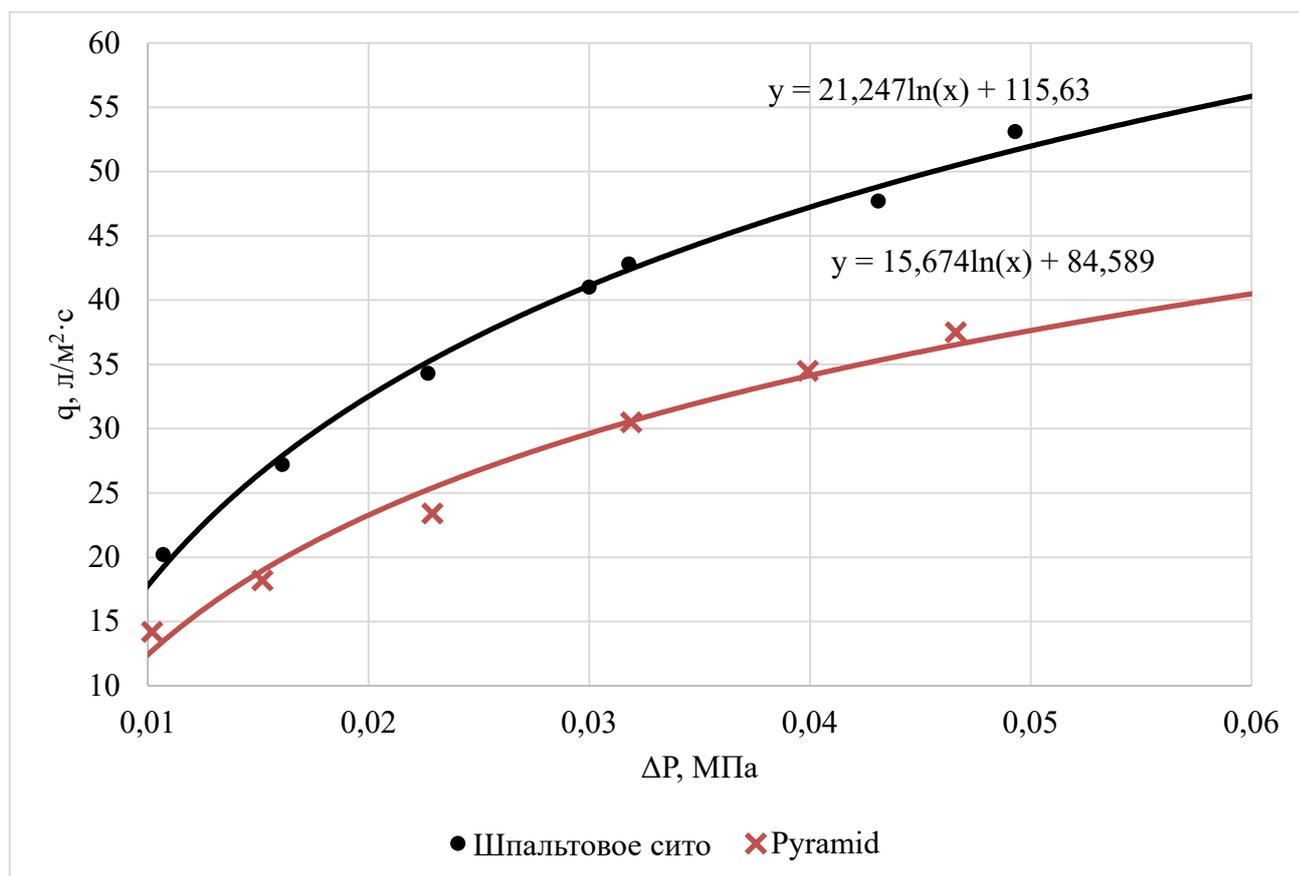


Рисунок 3.6 – Гидравлические характеристики исследованных фильтров (зависимость удельной производительности фильтра от перепада давления на фильтроэлементе)

В ходе дальнейшей работы в условиях крупномасштабного эксперимента, максимально приближенного к производственным, предусматривалось определение эффективности обработки хвостов дробильно-обогажительной фабрики АО «Карельский окатыш» в предлагаемой модифицированной вибрационной машине с использованием исследованных фильтров (шпальтовое сито и Pyramid). По производительности рассматриваемого процесса обезвоживания и сгущения хвостовых пульп определялись оптимальные режимы (динамический и частотный) воздействия колебаний. Технологическая схема обработки хвостов приведена на рисунке 3.7.

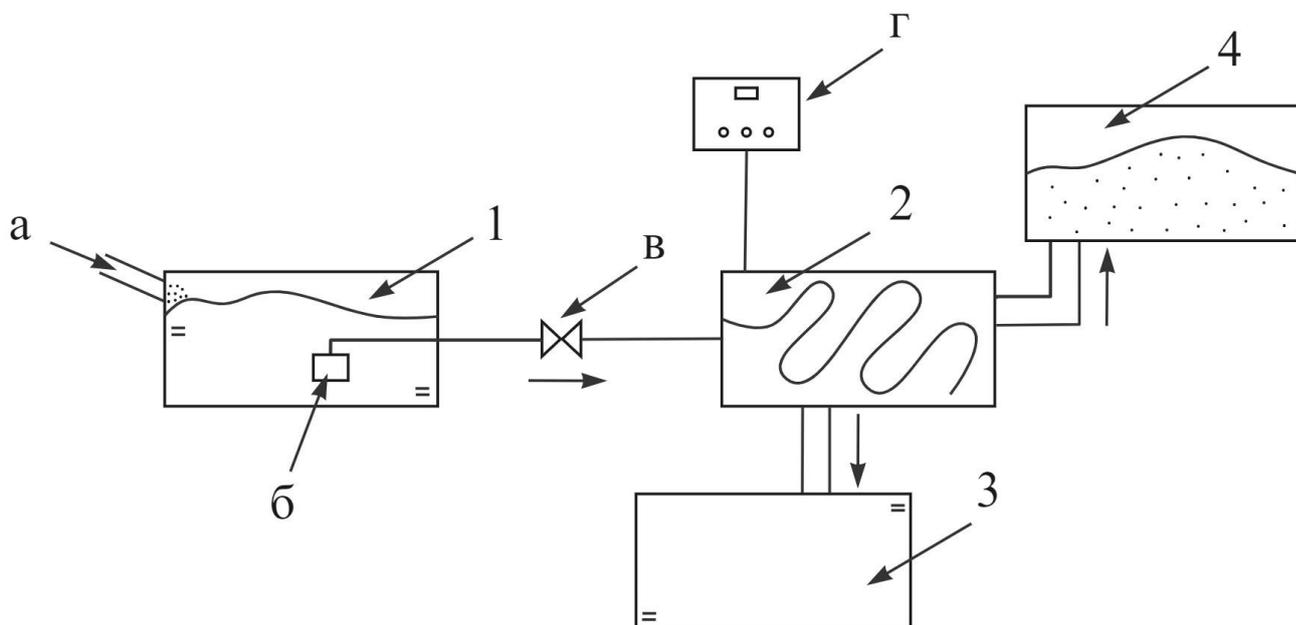


Рисунок 3.7 – Технологическая схема обработки отходов обогащения железистых кварцитов в вибрационной машине

а – подача исходной пульпы; б – насос для перекачки пульпы в вибрационную машину;

в – шаровый кран; г – блок управления вибрационной машиной

1 – резервуар исходной пульпы; 2 – модифицированная вибрационная машина;

3 – резервуар осветленной воды; 4 – резервуар для накопления обезвоженного продукта

Суспензии с массовой концентрацией твердых частиц 3 %, 4,8 % и 45 % (параметры пульпы представлены в таблице 3.2) и гранулометрическим составом, характерным для текущих пульп ДОФ (таблица 2.2) подавали на фильтровальный элемент. При этом частота вибраций изменялась от 5 до 70 Гц, а амплитуда колебательной скорости от 0,01 до 0,1 м/с. Перепад давления на фильтре изменялся от 0,02 до 0,05 МПа. С увеличением перепада давления в исследованном диапазоне эффективность обезвоживания и производительность машины возрастает монотонно достигая максимума при $\Delta P = 0,05$ МПа, что аналогично полученным значениям при испытаниях фильтров на чистой воде.

Исследования показали [262], что оптимальный частотный диапазон обработки хвостов обогащения железистых кварцитов находился между значениями $f = 7 \div 15$ Гц, вне этого диапазона наблюдалось падение производительности процесса. Полученные результаты определения зависимости удельной производительности установки от амплитуды колебательной скорости при $\Delta P = 0,05$ МПа и $f = 15$ Гц представлены на рисунках 3.8 и 3.9 в виде графиков.

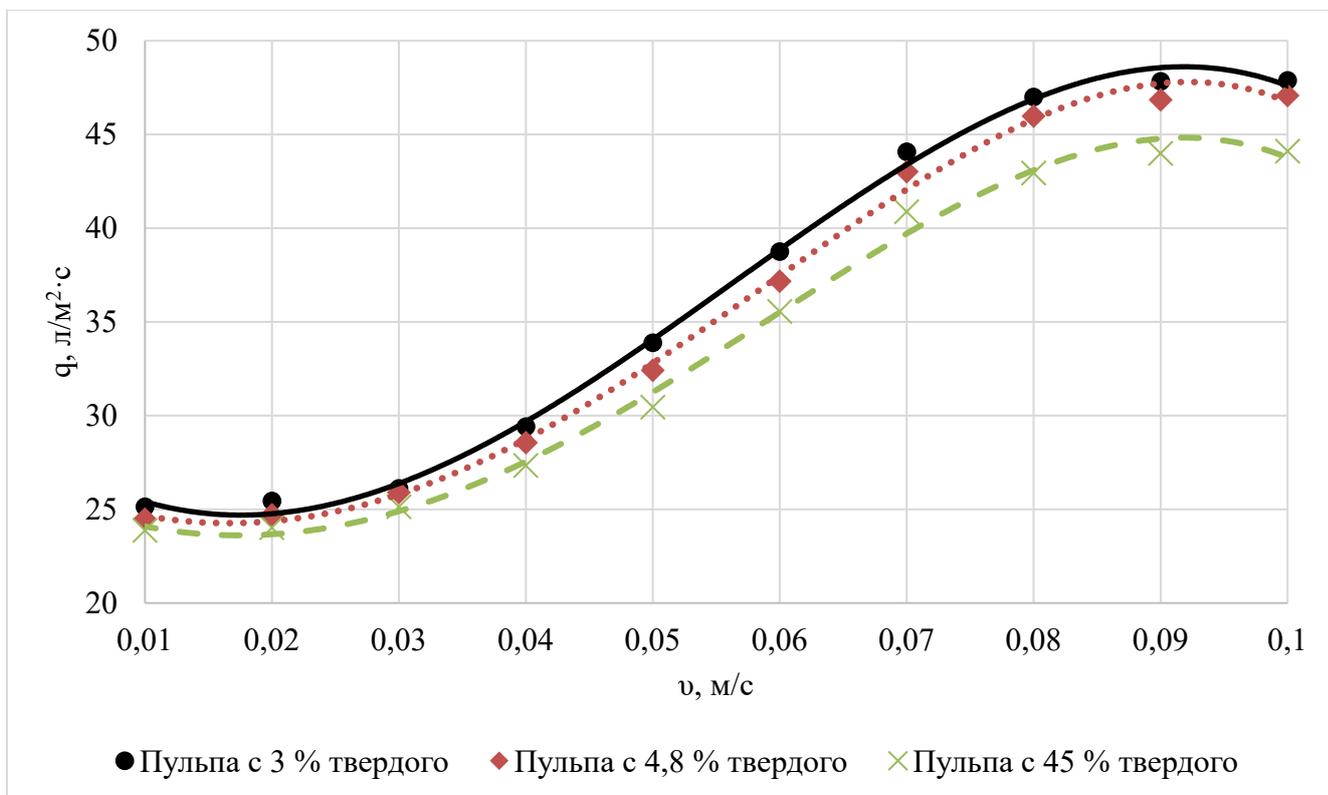


Рисунок 3.8 – Зависимость удельной производительности шпальтового сита от амплитуды колебательной скорости при $\Delta P = 0,05$ МПа и $f = 15$ Гц

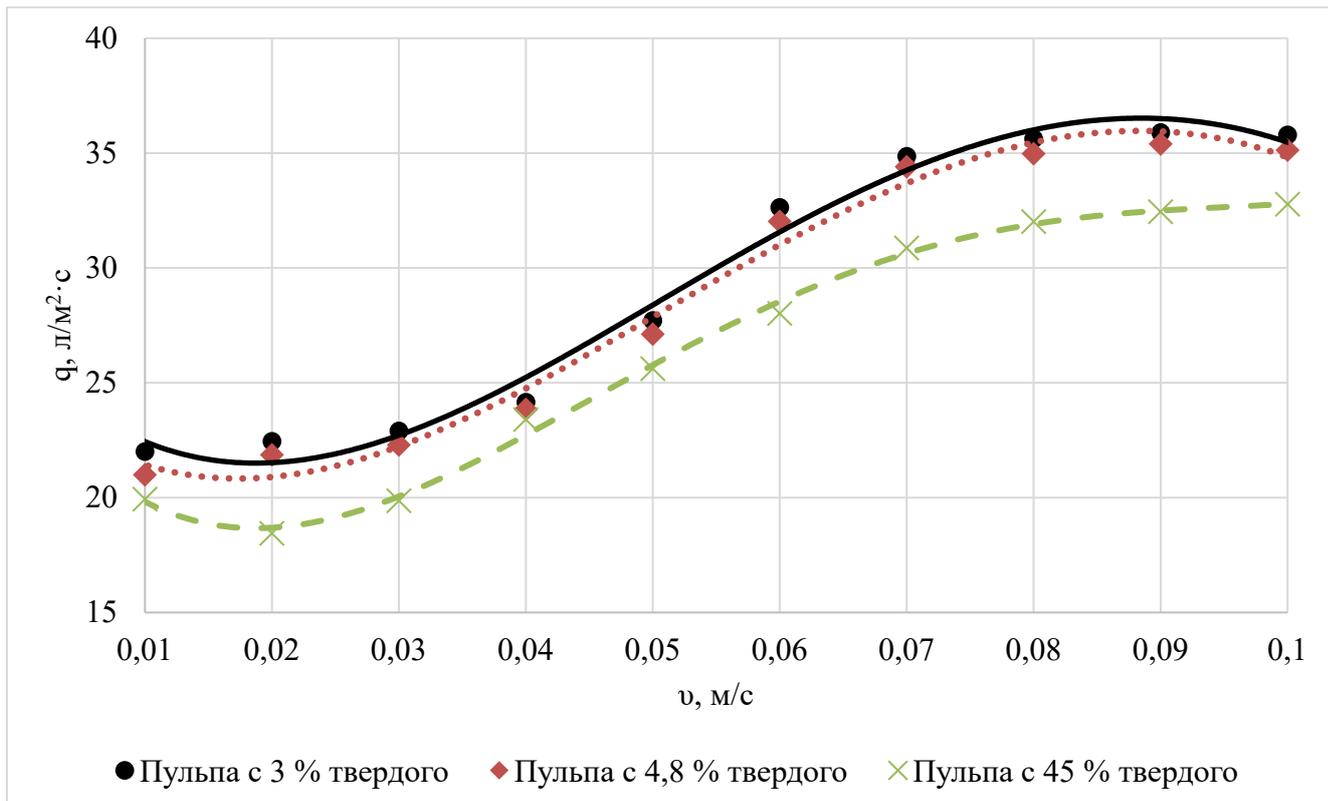


Рисунок 3.9 – Зависимость удельной производительности сетки Pyramid от амплитуды колебательной скорости при $\Delta P = 0,05$ МПа и $f = 15$ Гц

Из графиков следует, что оптимальный диапазон амплитуды колебательной скорости находится в пределах $0,07 \div 0,09$ м/с. Выше $0,09$ м/с наблюдается выполаживание кривой с тенденцией к падению производительности по пульпе при дальнейшем повышении амплитуды. Как и в случае с испытаниями на дистиллированной воде, шпальтовое сито показывает более высокую производительность для всех трех пульп, достигая максимума $43 \div 48$ л/м²·с при $v = 0,09$ м/с. Максимальная производительность сетки Pyramid при $v = 0,09$ м/с находится в диапазоне $32 \div 36$ л/м²·с.

Анализ результатов показывает, что при применении вибраций в процессе обработки хвостовых пульп обеспечивается высокая производительность и эффективность процесса, достигающая значений около 50 л/м²·с при работе на шпальтовом сите. Это наблюдается при определенных условиях воздействия вибраций (амплитуды колебательной скорости), которые в свою очередь определяются режимом проведения процесса фильтрования и типом используемого фильтроэлемента. Большая удельная производительность шпальтового сита объясняется большим размером ячеек фильтра ($50 \div 70$ мкм против $43 \div 45$ у сетки Pyramid), что повышает пропускную способность сита.

Эффективность процесса также оценивалась по таким параметрам, как содержание класса минус $40-45$ мкм в очищенной воде, коэффициенты отсева и полноты фильтрования, влажность обезвоженных хвостов. В процессе полупромышленного эксперимента были определены оптимальные параметры и показатели работы модифицированной вибрационной машины в зависимости от скорости вращения барабана и его наклона. Было установлено, что влажность обезвоженного твердого продукта минимальна при погружении барабана в корыто на одну треть его длины при скорости вращения $6 \div 9$ оборотов в минуту.

Для определения коэффициента отсева частиц и, соответственно, тонкости фильтрования определяли дисперсный состав сначала исходной жидкости, а затем обработанной. Для каждого интервала фиксировали коэффициент отсева частиц, по значению которого судили о тонкости фильтрования испытываемого фильтра.

Для определения дисперсного состава загрязнения пробы жидкости определенного объема просматривали под микроскопом Laboval в проходящем свете (максимальное увеличение составляло 448 крат). Одновременно при помощи окуляра-линейки (цена деления $2,5$ мкм) измеряли размер частиц (по наибольшему размеру, условно принимаемому за их диаметр), а также подсчитывали их количество в 100 полях зрения по интервалам. Полученные усредненные результаты по каждой серии экспериментов представлены на рисунке 3.10.

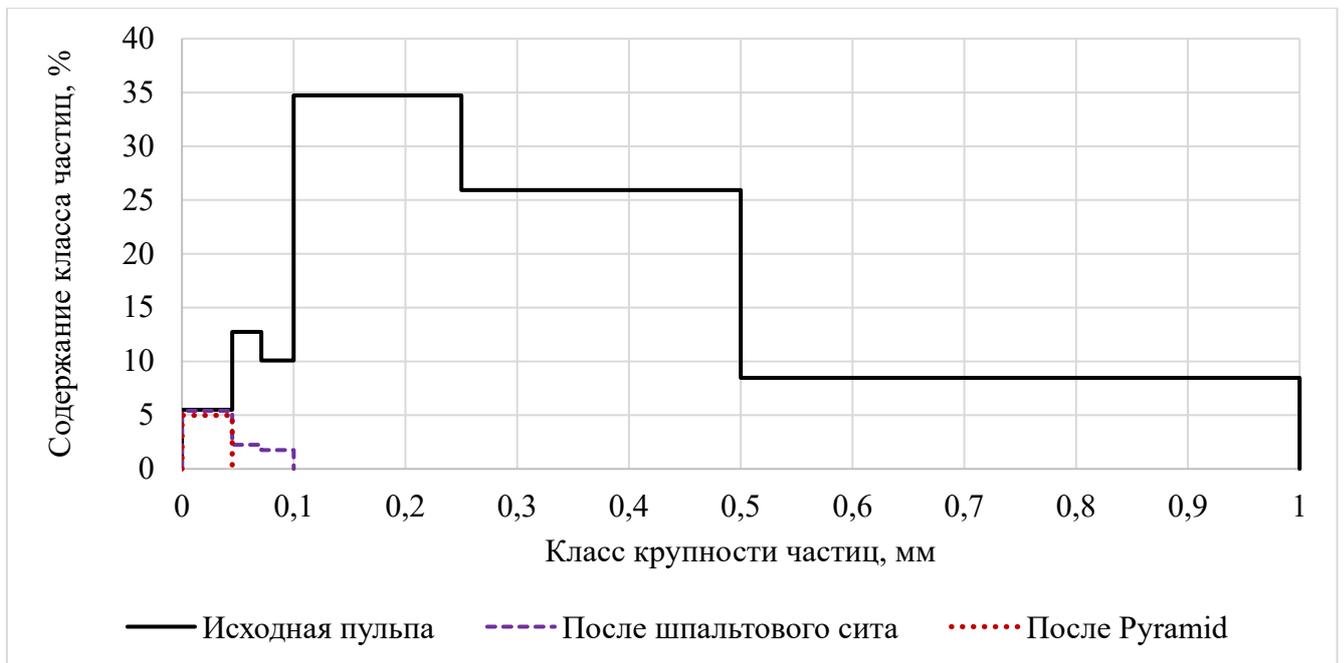


Рисунок 3.10 – Эффективность очистки вибрационным фильтром при использовании шпальтового сита и сетки Pyramid

Коэффициент полноты фильтрования рассчитывался по формуле:

$$K_{\text{полн.фильтр.}} = \frac{n_0 - n}{n_0}, \quad (3.4)$$

где n_0 и n – соответственно массовое содержание твердых частиц в исходной и обработанной пульпе, доли ед.

Коэффициент полноты фильтрования для шпальтового сита равнялся $K_{\text{полн.фильтр.}} = 0,87$, а для сетки Pyramid $K_{\text{полн.фильтр.}} = 0,93$. Анализ полученных данных позволил сделать вывод, что с помощью исследованных фильтровальных перегородок можно эффективно очищать хвостовые пульпы от взвешенных частиц. В очищенной воде концентрация взвесей составляет 3–5 % от количества взвесей в исходной суспензии. При этом в очищенной суспензии присутствуют только частицы, размеры которых меньше 40–45 мкм, что позволяет реализовать повторное вовлечение в технологический цикл данной обработанной оборотной воды. Основные характеристики модифицированной вибрационной машины при работе на хвостовых пульпах приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Основные технические характеристики модифицированной вибрационной машины при обезвоживании отходов обогащения железистых кварцитов

<i>Показатель</i>	<i>Значение</i>
Производительность по исходной пульпе, м ³ /ч	220÷250
Очистка по классу, мм	плюс 0,04
Коэффициент полноты фильтрования, %	87÷93
Весовая влажность обезвоженного продукта, %	8÷11
Оптимальная амплитуда колебательной скорости, м/с	0,07÷0,09
Оптимальный частотный диапазон вибраций, Гц	7÷15
Угол наклона шестигранного барабана, градус	3÷7
Частота вращения барабана, об/мин	6÷9

Целесообразность использования шпальтового сита или сеток серии Pyramid определяется требованиями технологического процесса и объемом поступающих пульп. При увеличенном выходе отходов обогащения с целью повышения производительности процесса обезвоживания рекомендуется использование шпальтового сита, в случае необходимости повышения качества осветленной воды с сохранением производительности очистки рекомендуется применение сеток Pyramid.

Несмотря на незначительное (8÷10 %) снижение производительности установки при обезвоживании пульп с содержанием 45 % твердого, пересчет на сухие хвосты показывает большую эффективность обработки в вибрационной машине именно высокоплотных пульп. Сделаем расчет на примере использования сетки Pyramid.

Максимальная удельная производительность при обработке пульп с 3 % и 45 % твердого составила 35,9 и 32,5 л/м²·с соответственно. Так как в 1,2975 м³ пульпы с 45 % твердого содержится 818,2 кг хвостов, то в 0,0325 м³ пульпы содержится хвостов:

$$m_{\text{хвостов}} = \frac{818,2 \cdot 0,0325}{1,2975} = 20,49 \text{ кг}$$

С учетом коэффициента полноты фильтрования $K_{\phi} = 0,93$ за 1 секунду с 1 м² рабочей поверхности фильтровального элемента производится обезвоживание 19,06 кг хвостов. Аналогичный расчет для пульпы с 3 % твердого показывает, что выход обезвоженных хвостов из 0,0359 м³ пульпы составляет всего 1,02 кг, что на 94,6 % меньше. Ниже представлены сравнительная таблица производительности модифицированной вибрационной машины по твердому классу (таблица 3.4) и столбчатая диаграмма, показывающая часовую удельную производительность машины по исходной пульпе и твердому (рисунок 3.11).

Таблица 3.4 – Сравнение удельной производительности модифицированной вибрационной машины при обработке пульпы с различным содержанием твердой фазы

<i>Содержание твердого в пульпе, %</i>	<i>Часовая удельная производительность, т/м²·ч</i>	<i>Суточная удельная производительность, т/м²·сутки</i>	<i>Годовая удельная производительность (363 раб. суток в году), т/м²·год</i>
3	3,68	88,22	32025,1
4,8	5,87	140,84	51123,5
45	68,62	1646,77	597776,0

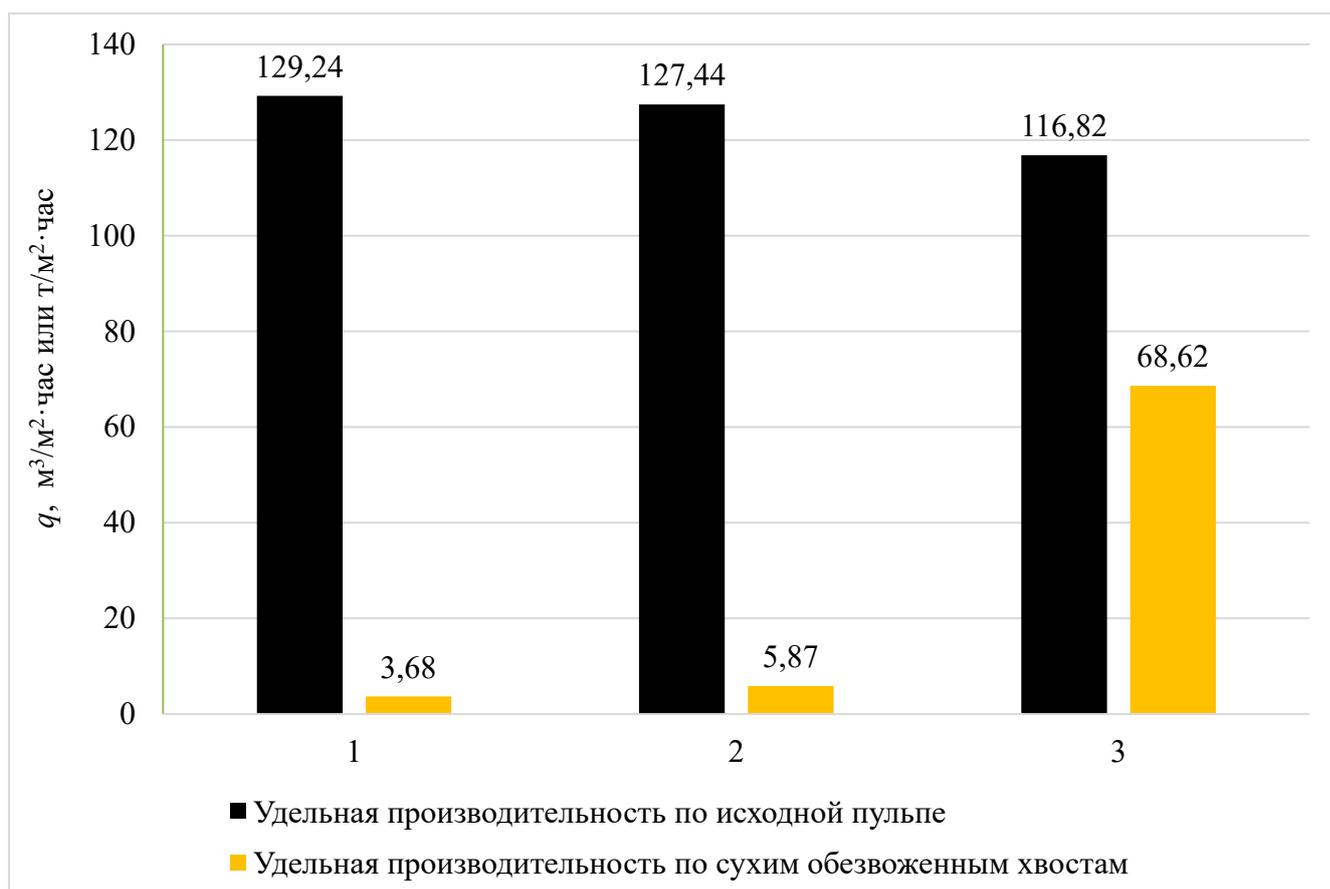


Рисунок 3.11 – Сравнение удельной производительности вибрационной машины по исходной пульпе и твердому классу

1 – пульпа с 3 % твердого; 2 – пульпа с 4,8 % твердого; 3 – пульпа с 45 % твердого

Таким образом установлено, что на практике при обработке хвостов обогащения горных предприятий в модифицированной версии вибрационной машины происходит эффективная регенерация фильтровальных элементов и перфорированных поверхностей рабочего пространства машины за счет синергетического воздействия колебаний и центробежных сил.

При этом наиболее перспективным является использование шпальтового сита и фильтра Pyramid. Получаемый твердый продукт, обезвоженный до высокой концентрации твердого, возможно транспортировать на площадки складирования конвейерным или автомобильным транспортом

Возникающие в процессе работы машины противоточные потоки, а также каскадно-водопадный (смешанный) режим движения обрабатываемой хвостовой пульпы, обеспечивают высокую эффективность процесса обезвоживания и сгущения материалов. Установившийся режим движения суспензии в сочетании с вибрационным действием возбуждаемых колебаний приводит к генерации в машине мощных вихревых потоков, благодаря которым происходит интенсификация процесса разделения твердой фазы за счет ускорения процесса разрушения глинистых частиц и других примесей.

В процессе эксплуатации предложенная пилотная конструкция модифицированной вибрационной машины показала свою надежность, работоспособность и высокую удельную производительность. Эффективность классификации и обезвоживания хвостовых пульп в машине всегда выше и стабильнее, чем в других существующих аппаратах. Можно заключить, что предлагаемая модификация вибрационной машины перспективна и может широко применяться для обработки пульп ДОФ при создании хранилищ глубоко обезвоженных хвостов, а также в других отраслях промышленности.

3.4 Совершенствование технологии формирования хранилищ предварительно обезвоженных отходов переработки железорудного сырья

Следование перечисленным в пункте 1.3 принципам НДТ приводит к необходимости глубокого обезвоживания отходов обогащения твердых полезных ископаемых перед их складированием в хранилища. Успешно реализованные проекты со складированием глубоко обезвоженных хвостов в схожих с АО «Карельский окатыш» климатических условиях (Greens Creek Mine и Pogo Mine (Аляска, США), Mine Raglan (Квебек, Канада), Bellekeno Mine и Minto Mine (Юкон, Канада) [263-266] позволяют заключить о применимости такого способа организации хранения отходов обогащения твердых полезных ископаемых.

Анализ приведенной схемы организации работы хвостового хозяйства приводит к выводу, что текущая технология заполнения хвостохранилища хвостами не позволяет снизить площадь занимаемой хранилищем территории, повысить его вместимость без увеличения площади нарушаемых земель, обеспечить эффективное использование водных ресурсов и в полной мере не соответствует принципам НДТ. Предложенный АО «Механобр инжиниринг» проект развития хвостового хозяйства со сгущением пульп до 45 % твердого лишь частично способствует решению задачи наиболее эффективного использования территории, снижения издержек и

повышения уровня безопасности формирования хвостохранилища. Однако имеющиеся на предприятии системы обеспечения работы хвостового хозяйства являются достаточными для качественного повышения эффективности работы всего комплекса сооружений.

В соответствии с проектом развития хвостового хозяйства АО «Карельский окатыш» планируется ежегодная укладка в Новый отсек хвостохранилища отходов обогащения массой 21,19 млн т (в среднем) в пересчете на сухую массу хвостов. Всего за проектные 20 лет количество складированных хвостов составит 423,8 млн т или 292,3 млн м³. Очевидно, что суммарный объем материала – пульпы, состоящей из жидкой и твердой фазы, будет в несколько раз больше. Рассчитаем основные параметры хвостохранилища и характеристики процесса складирования для оценки эффективности внедрения технологии укладки глубоко обезвоженных хвостов с остаточной влажностью 10 %. В таблице 3.5 приведены основные характеристики и технологические данные дробильно-обогащительной фабрики АО «Карельский окатыш», использованные при расчетах.

Таблица 3.5 – Технологические данные ДОФ АО «Карельский окатыш»

<i>Параметр</i>	<i>Значение</i>
Средний выход хвостов, тыс. т/год	21 190
Средний объем складирования сухих хвостов, тыс. м ³ /год	14 600
Средний расход сгущенной пульпы, подаваемой на хвостохранилище, м ³ /час	2 537,1
Средний расход исходной пульпы, подаваемой на хвостохранилище, м ³ /час	16 506,4
Средний расход воды в исходной пульпе, подаваемой на хвостохранилище, м ³ /час	16 211,63

Для начала примем, что количество хвостов соответствуют проекту. Рассчитаем ежегодный прирост объема складированных в хранилище глубоко обезвоженных хвостов. Сперва найдем массу влажных хвостов:

$$0,1 = \frac{m_{\text{хв.10\%}} - 21\,190\,000}{21\,190\,000} \cdot 100\%$$

$$m_{\text{хв.10\%}} = 23\,309\,000 \text{ т/год}$$

где 0,1 – влажность обезвоженного материала (доли ед.)

Тогда:

$$V_{\text{хв.10\%}} = \frac{m_{\text{хв.10\%}}}{\rho_{\text{хв.10\%}}} = \frac{23\,309\,000}{1,59} = 14\,659\,748,43 \text{ м}^3/\text{год}$$

или 14,66 млн м³/год. За весь расчетный период объем уложенных хвостов с весовой влажностью 10 % составит 293 194 968,6 млн м³ или 293,20 млн м³.

Теперь рассчитаем суммарный объем складирования рядовых и стуженных пульп при существующей технологии. Зная расходы пульпы, подаваемой на хвостохранилище в час, при режиме работы фабрики 24 часа в сутки и 363 рабочих суток в году получим $V_{суц} = 22\,103\,215,2$ м³/год, $V_{исх} = 143\,803\,756,8$ м³/год. Суммарный годовой объем пульп, подаваемой на хвостохранилище составит $V_{сумм} = 165\,906\,972$ м³/год. Таким образом за 20 лет будет выпущено $V_{пульпы} = 3\,318\,139\,440$ м³ или 3,32 млрд м³ пульпы.

Можно рассчитать, что при реализации технологии складирования глубоко обезвоженных хвостов (с $W = 10$ %) нагрузка на хвостохранилище снизится на 3,02 млрд м³ пульпы или в относительном выражении на 91,16 %. При этом количество уложенных хвостов обогащения в пересчете на сухую массу останется неизменным. Даже при условии использования не модифицированного варианта вибрационной машины, а стандартного, после обработки в котором влажность материала составляет около 15 %, снижение объема складирования составит более 90 %, что качественно изменит подход к оценке состояния массива и мониторингу его состояния.

Целесообразно рассмотреть альтернативные способы размещения глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов. Для условий АО «Карельский окатыш» предлагается несколько следующих схем. Первая схема предполагает размещение отходов на равнине с возведением ограждающих дамб из вскрышных пород или крупнозернистых фракций хвостов с 4-х сторон (рисунок 3.12). Для данной схемы наиболее рационально использование мобильного конвейера-стакера, размещаемого на гребне дамбы и имеющего возможность равномерного выпуска хвостов движением вдоль дорожной оси. Преимуществом схемы является возможность организации на противоположном гребне дамбы второго стакера и выпуска хвостов «навстречу» друг другу (более темный серый цвет на виде сбоку).

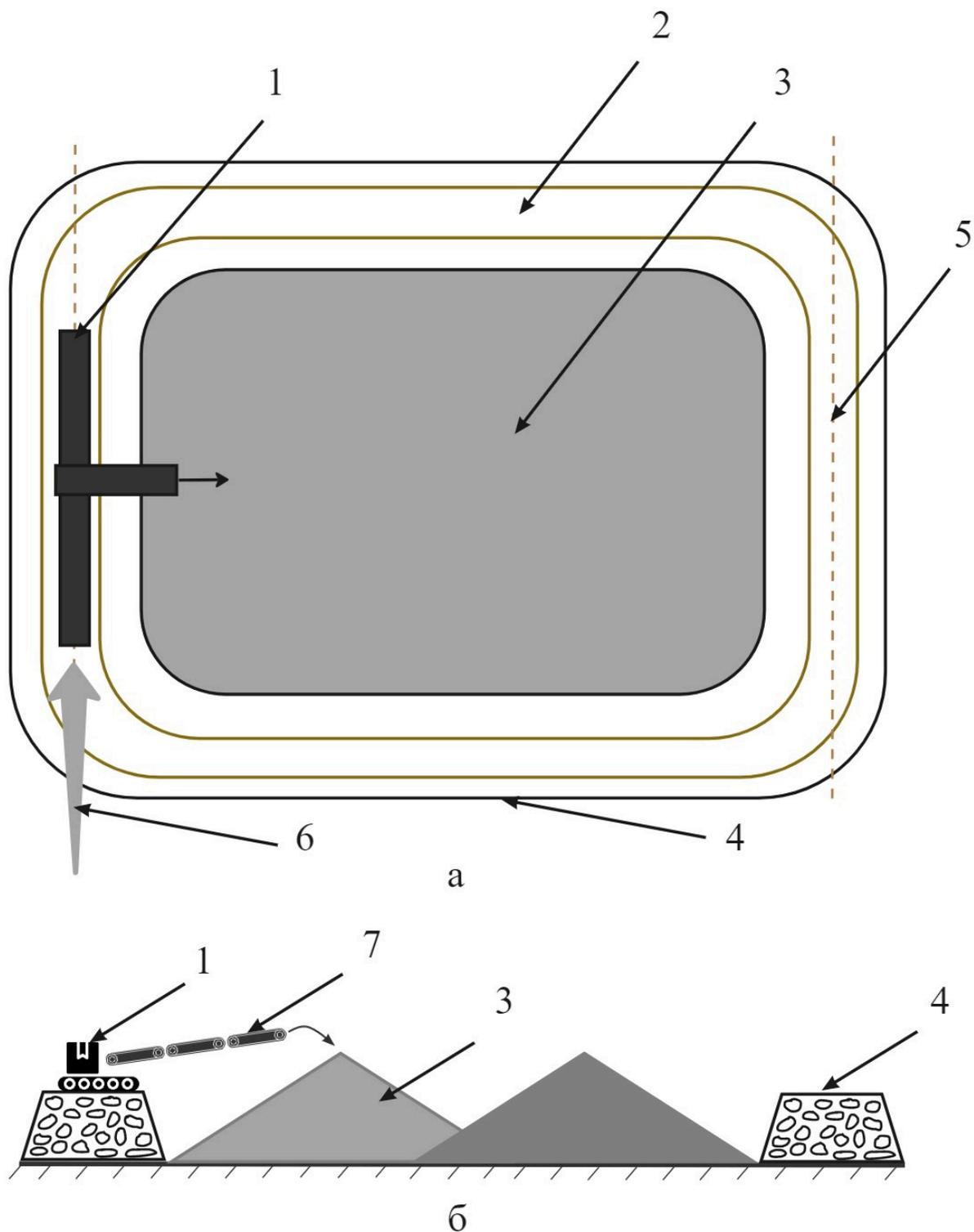


Рисунок 3.12 – Схема формирования хранилища глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов на равнине

а – вид сверху; б – вид сбоку

- 1 – система транспортирующих лент/мобильный конвейер-стакер; 2 – гребень дамбы;
 3 – обезвоженные хвосты; 4 – ограждающая дамба; 5 – дорожная ось;
 6 – питание от вибрационной машины; 7 – система выпускающих лент

Недостатками схемы является высокая землеемкость работ и их повышенный объем вследствие необходимости возведения ограждающих дамб со всех сторон, более высокое пылеобразование на начальных этапах формирования масса ввиду увеличенного пути хвостов от места выпуска к основанию хранилища. Также перемещение стакера по направлению от бровки к бровке ограничено шириной дороги, поэтому для наиболее полного заполнения хранилища необходимо наращивание длины выпускной конвейерной ленты с остановкой работ. Возведение ограждающих дамб при формировании хранилища такого типа в условиях АО «Карельский окатыш» является жизненно необходимым по климатическим условиям. В случае отсутствия дамб возможно растекание увлажненных хвостов по большой площади и ее загрязнение в связи с размывом массива осадками.

Следующая схема отличается от предыдущей наличием в основании хранилища небольшого возвышения, имеющего вид треугольника в разрезе (рисунок 3.13). В этом случае возвышение является центральной частью хранилища, выпуск хвостов производится непосредственно в центр хвостохранилища. При таком способе складирования также требуется возведение со всех сторон ограждающих дамб, однако наличие возвышения способствует формированию конуса с большим радиусом, что при прочих равных условиях исключает необходимость использования второго мобильного конвейера-стакера для полного заполнения хранилища. Достаточно наращивать высоту выпуска хвостов и перемещать стакер вдоль дорожной оси. Недостатком такого способа является снижение вместимости хвостохранилища, так как полезный объем сокращается на значение, которое занимает возвышение.

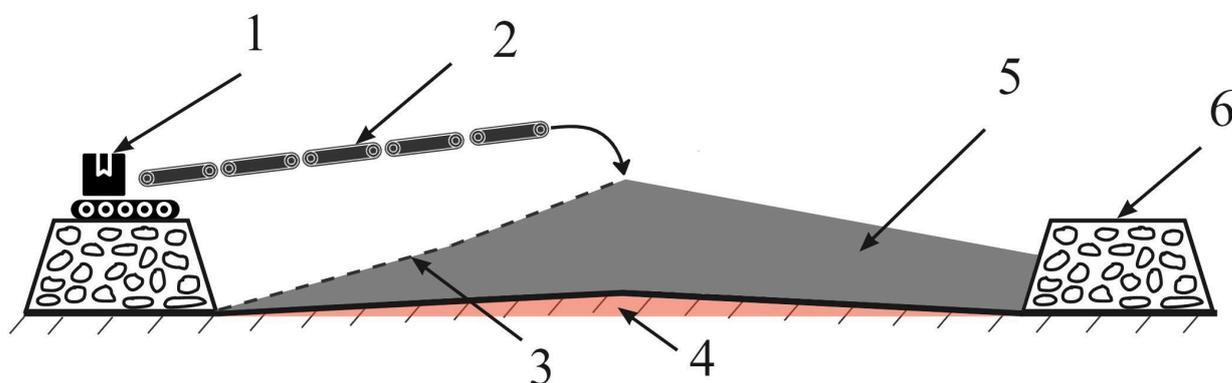


Рисунок 3.13 – Схема формирования хранилища глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов на возвышенность (вид сбоку)

1 – система транспортирующих лент/мобильный конвейер-стакер;

2 – система выпускающих лент; 3 – контур массива на начальном этапе формирования;

4 – возвышение в основании хранилища; 5 – контур массива по завершении формирования;

6 – ограждающая дамба

Также рассмотрим схему с формированием хвостохранилища на равнине не с гребня дамбы, а с основания (рисунок 3.14). В этом случае стакер последовательно движется вдоль дамбы, заполняя пространство хвостами. При достижении максимальной вместимости, возможно уплотнение складированных обезвоженных хвостов бульдозерной техникой, установка стакера на уплотненные хвосты и дальнейшее наращивание высоты массива по прежнему маршруту. Рисунок 3.15 иллюстрирует формирование последующих ярусов массива при полном заполнении выделенной территории хвостами. Данный способ делает возможным целенаправленное формирование ярусов с обеспечением нормативного коэффициента запаса устойчивости при необходимой конфигурации откосов.

Преимущество схемы в отсутствии дамбы с 4-й стороны во время формирования хвостохранилища, снижение пыления из-за нахождения стакера между дамбами. При таком способе возможно складирование на ранних этапах без ограждающих дамб, так как высота массива не будет превышать нескольких метров. В целом длина конвейерной ленты для питания стакера ограничена только выделенной для складирования площадью и теоретически перемещение всего комплекса установок по направлению на север или восток может исчисляться километрами. Таким образом период заполнения хвостохранилища составит годы и десятилетия с использованием всего лишь одного укладчика.

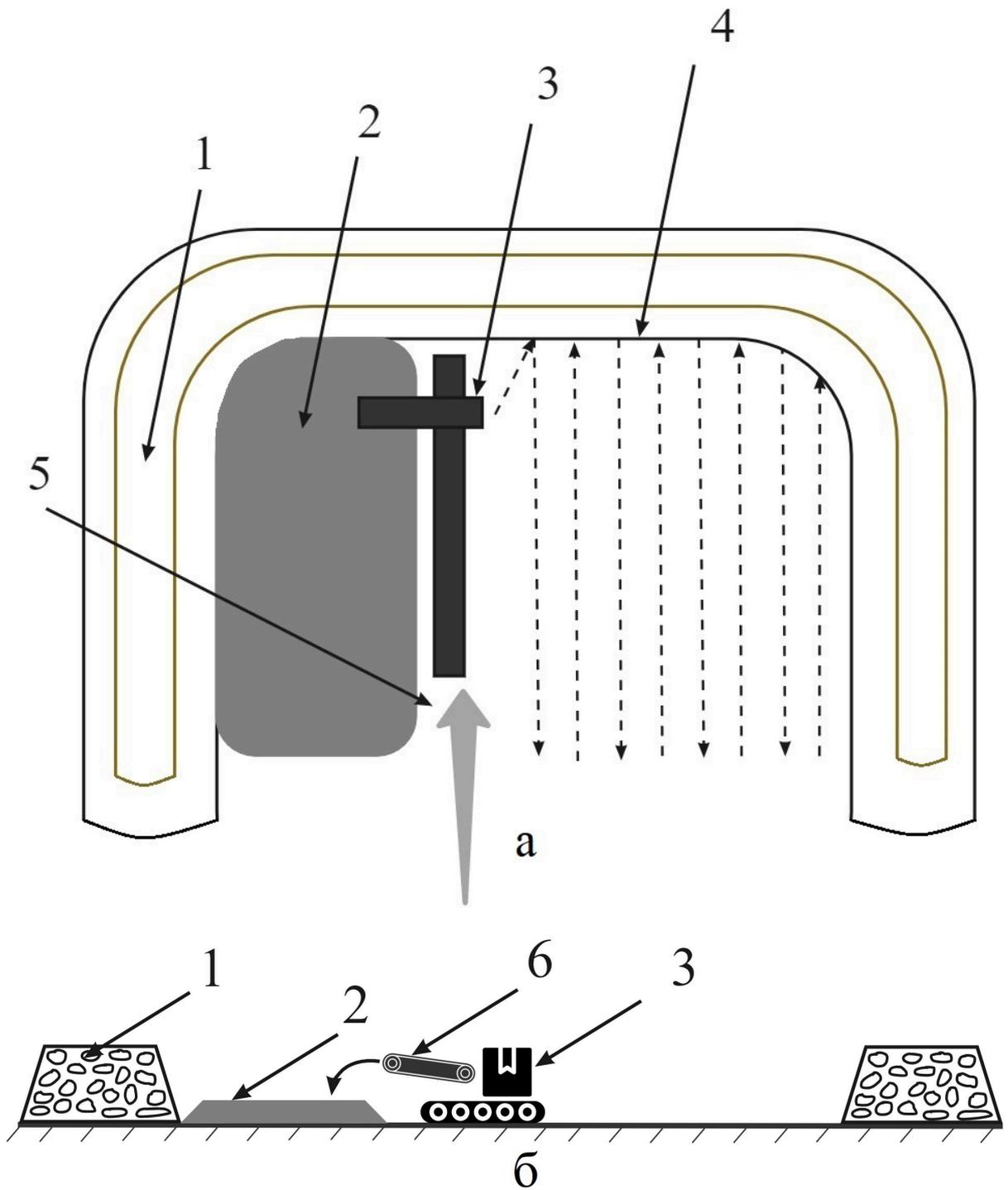


Рисунок 3.14 – Схема послойного формирования первого яруса хранилища глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов с основания

а – вид сверху; б – вид сбоку

1 – ограждающая дамба; 2 – обезвоженные хвосты; 3 – система транспортирующих лент/мобильный конвейер-стакер; 4 – контур площадки складирования;
5 – питание от вибрационной машины; 6 – система выпускающих лент

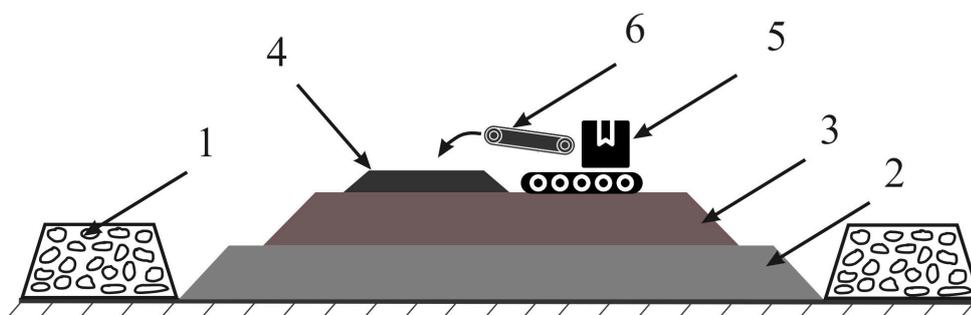


Рисунок 3.15 – Схема послойного формирования последующих ярусов хранилища глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов с основания

1 – ограждающая дамба; 2, 3 – первый и второй слой обезвоженных хвостов; 4 – формируемый слой обезвоженных хвостов; 5 – система транспортирующих лент/конвейер-стакер; 6 – система выпускающих лент

В условиях АО «Карельский окатыш» наиболее целесообразной схемой возведения хранилища обезвоженных отходов переработки железорудного сырья является укладка конвейерным транспортом с косогора «по склону». За счет действия силы тяжести обезвоженные хвосты скатываются к подножию возвышения и задерживаются нижними дамбами. Отрыв частиц хвостов от массива и их скатывание происходит постоянно до заполнения хранилища.

При этом способе главным условием безопасности становится возведение защитных ограждающих дамб в наиболее низкой части рельефа хранилища. Высота защитной дамбы определяется вместимостью хранилища и в случае складирования с возвышенности высота дамбы должна быть не меньше средней мощности слоя хвостов. Рассмотрим две оптимальные схемы складирования глубоко обезвоженных хвостов по предлагаемой технологии в условиях АО «Карельский окатыш». Первая схема складирования «по склону» приведена на рисунке 3.16.

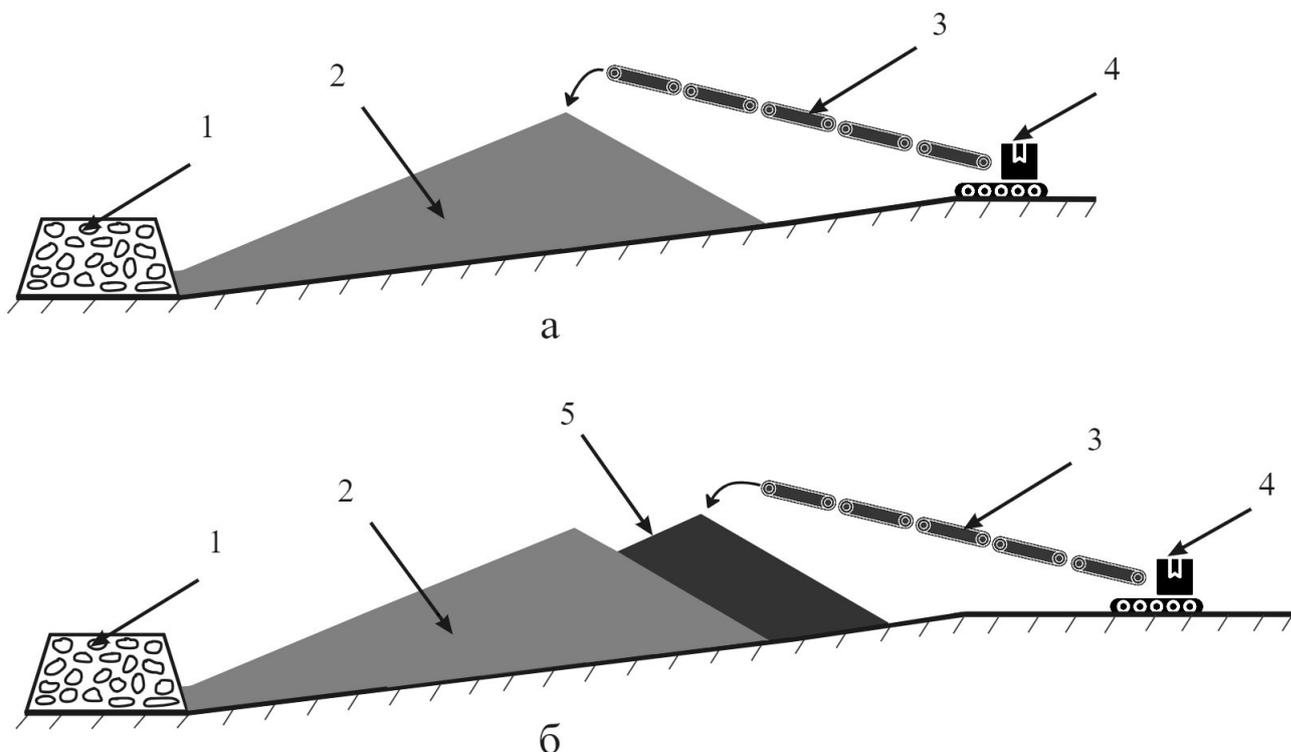


Рисунок 3.16 – Схема складирования глубоко обезвоженных хвостов «по склону» в условиях АО «Карельский окатыш» с перемещением укладчика

а – формирование первого слоя; б – формирование последующих слоев

1 – ограждающая дамба; 2 – первый слой обезвоженных хвостов;

3 – система выпускающих лент; 4 – система транспортирующих лент/конвейер-стакер;

5 – второй слой обезвоженных хвостов

По данной схеме укладчик устанавливается на верхней бровке уступа (рисунок 3.16 а). При достижении первым слоем проектной высоты укладчик перемещается в направлении от дамбы на новое место, откуда формируется второй слой (рисунок 3.16 б). Последующие слои формируются аналогичным образом до заполнения площадки хранилища. Нарращивание длины выпускающих лент не требуется. Возможно использование двух типов укладчиков:

- радиального конвейера-стакера со статичным выпуском в одну точку и формированием массива в виде конуса или возможностью поворота лент с формированием конуса, вытянутого в горизонтальном направлении;
- мобильного конвейера-стакера с перемещением вдоль склона по оси y с постепенным заполнением хранилища без движения по оси x .

Вторая схема, представленная на рисунке 3.17, подразумевает минимальное перемещение укладчика по оси x и наращивание высоты массива путем увеличения длины выпускающих лент. По аналогии со схемой на рисунке 3.16 возможно использование обоих типов укладчиков в

зависимости от выбранного способа формирования массива. При организации складирования по схеме, показанном на рисунке 3.17, возможен выпуск хвостов в обе стороны понижения рельефа – либо одновременно, либо попеременно.

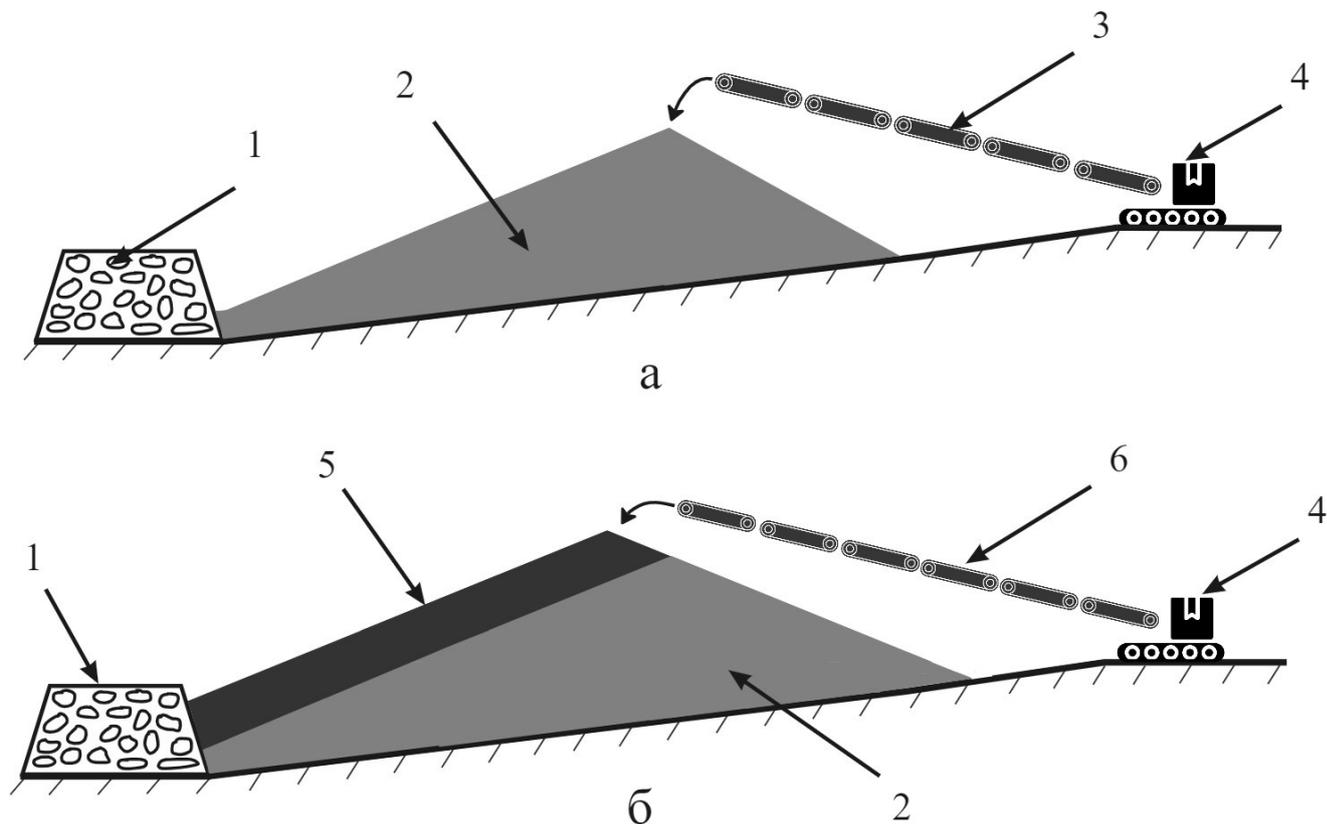


Рисунок 3.17 – Схема складирования глубоко обезвоженных хвостов «по склону» в условиях

АО «Карельский окатыш» с наращиванием длины выпускающей ленты

а – формирование первого слоя; б – формирование последующих слоев

1 – ограждающая дамба; 2 – первый слой обезвоженных хвостов; 3 – начальная система выпускающих лент; 4 – система транспортирующих лент/конвейер-стакер;

5 – второй слой обезвоженных хвостов; 6 – увеличенная система выпускающих лент

По схемам на рисунках 3.16 и 3.17 выпуск обезвоженных хвостов осуществляется с превышения в направлении ограждающих дамб. Перемещение оборудования для укладки хвостов возможно в любом горизонтальном направлении. Это позволяет равномерно заполнять емкость хранилища и изменять точку выпуска хвостов. В целом ограждающие дамбы возводятся для защиты оборудования и формирования емкости хвостохранилища. Также они являются преградой при возможном растекании обезвоженных хвостов вследствие их переувлажнения и сдерживают хаотичное распределение отходов обогащения железных руд при складировании. Предельный угол откосного сооружения определяется углом естественного откоса складированного материала. Для исследованных хвостов $\alpha = 33,4^\circ$. Также при укладке «по склону»

возможна организация послойного складирования с отсыпкой в направлении от дамбы по схеме, показанной на рисунке 3.14 (вид сверху).

Как было показано ранее, в текущих условиях работы хвостового хозяйства АО «Карельский окатыш» наиболее целесообразно производить обезвоживание предварительно сгущенных хвостов. При среднем расходе сгущенной пульпы на хвостохранилище в $2537,1 \text{ м}^3/\text{час}$ для бесперебойного глубокого обезвоживания предварительно сгущенных до 45 % хвостов потребуется 13 модифицированных вибрационных машин производительностью $250 \text{ м}^3/\text{час}$ каждая. 11 машин будут полностью обеспечивать необходимый объем обезвоживания, 2 машины в резерве на случай выхода из строя других машин. Итоговая общая схема возведения хранилищ глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов представлена на рисунке 3.18. Во избежание переувлажнения нижних слоев массива при проектировании хранилища рекомендуется установка трубчатой дренажной системы из перфорированных труб.

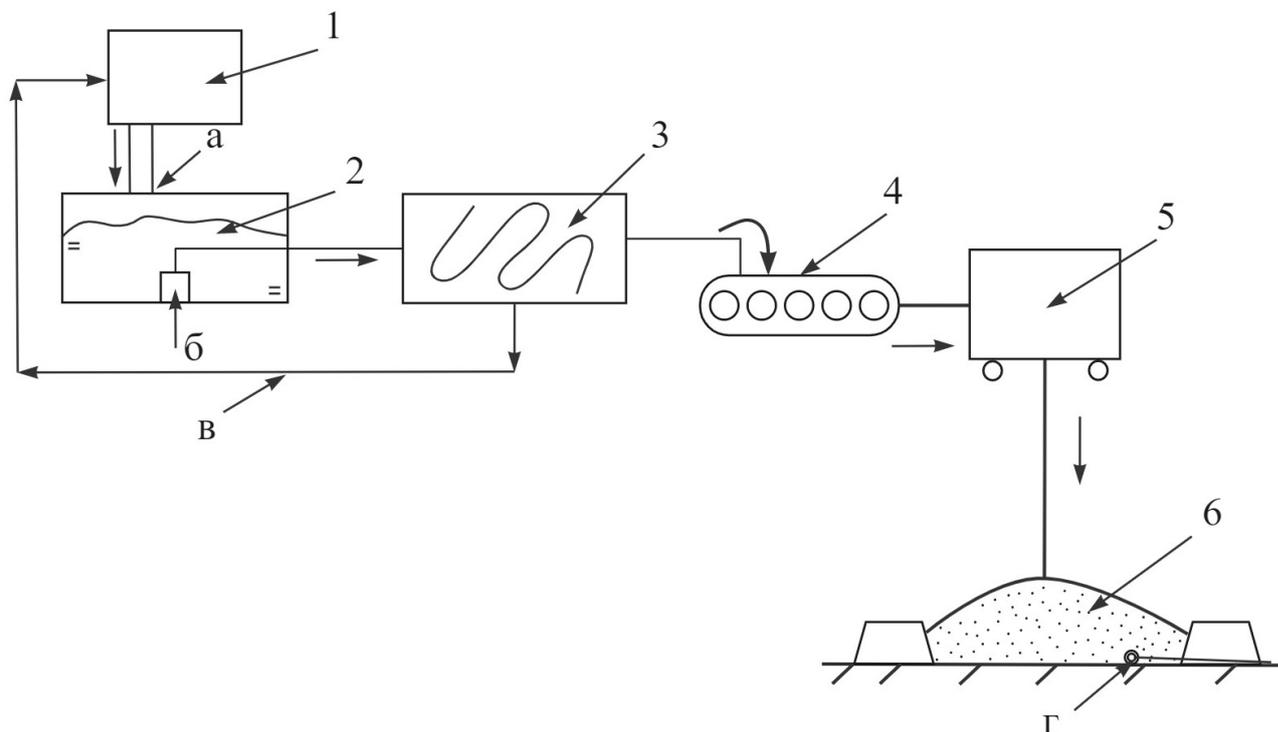


Рисунок 3.18 – Технологическая схема складирования предварительно глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов

а – подача исходной пульпы; б – насос для перекачки пульпы в вибрационную машину;

в – возврат осветленной воды на фабрику; г – трубчатый дренаж

1 – дробильно-обогажительная фабрика; 2 – резервуар исходной пульпы; 3 – модифицированная вибрационная машина; 4 – система конвейерных лент для транспортирования хвостов;

5 – конвейер-стакер; 6 – хранилище глубоко обезвоженных хвостов

При организации хранилища предварительно обезвоженных отходов переработки железорудного сырья в условиях АО «Карельский окатыш» годовой объем глубокого обезвоживания сгущенных до 45 % твердого хвостов составит 22 103 215,2 м³ с получением:

$$m_{\text{сух.хв}} = \frac{0,8182 \cdot 22\,103\,215,2}{1,2975} = 13\,938\,277,89 \text{ т/год}$$

При средней весовой влажности обезвоженных хвостов $W = 10\%$, итоговые масса и объем складирования составят:

$$m_{\text{хв.10\%}} = m_{\text{сух.хв.}} + 0,1 \cdot m_{\text{сух.хв.}} = 15,33 \text{ млн т/год}$$

или 306,60 млн т за проектные 20 лет

$$V_{\text{хв.10\%}} = \frac{m_{\text{хв.10\%}}}{\rho_{\text{хв.10\%}}} = 9,64 \text{ млн м}^3/\text{год}$$

или 211,45 млн м³ за проектные 20 лет

Таким образом, внедрение предлагаемой технологии обеспечивает складирование 65,78 % общего объема образующихся за год отходов обогащения железистых кварцитов. Обработка 100 % образующихся отходов обогащения возможна при внедрении большего количества вибрационных машин, однако повышение эффективности процесса глубокого обезвоживания ограничено возможностями комплексов по сгущению пульпы.

Выводы

1. Предлагаемый модифицированный вариант вибрационной машины обеспечивает обезвоживание пульпы железистых кварцитов до 8÷11 % остаточной весовой влажности в одном агрегате.
2. Исследование процесса обезвоживания в вибрационной машине показало, что наиболее эффективный режим работы находится в диапазоне частоты от 7 до 15 Гц, амплитуде колебательной скорости 0,07÷0,09 м/с и перепаде давления на фильтре 0,05 МПа.
3. Предложенные схемы формирования хранилища глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов позволяют обеспечить стабильную работу хвостового хозяйства на проектные 20 лет. Применение технологии послойной укладки или укладки «по склону» наиболее целесообразно для условий АО «Карельский окатыш», так как позволяет сократить площадь нарушаемой территории при сохранении необходимой вместимости хранилища.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ХРАНИЛИЩ ОБЕЗВОЖЕННЫХ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ

4.1 Классификация факторов возникновения и развития опасных горно-геологических явлений при формировании хранилищ отходов горно-обогатительных производств

Освоение недр на протяжении всей истории горного дела связано с проявлением опасных явлений и процессов, которые часто приводят к негативным социальным и экономическим последствиям. Сегодня большая часть аварийных и несчастных случаев с человеческими жертвами связаны с нарушениями технологии ведения горных работ и техники безопасности, геологическими процессами, вызванными как природными, так и техногенными факторами. Нужно отметить, что ежегодно разрабатываются новые технологии и средства защиты, которые направлены на снижение количества нештатных ситуаций, а соответственно, социальных, экономических и экологических рисков в процессе разработки месторождений. Однако, усложнение условий добычи полезных ископаемых является фактором, повышающим вероятность проявления негативных горно-геологических явлений (ГГЯ). Это определяет необходимость постоянного совершенствования техники и методов ведения горных работ, для создания и внедрения которых необходима максимально полная и достоверная информация о состоянии геологической среды.

Опасным геологическим процессом, согласно ГОСТ Р 22.0.03-2020 [267] называют событие геологического происхождения или результат деятельности геологических процессов, возникающих в земной коре под действием различных природных или геодинамических факторов или их сочетаний, оказывающих либо могущих оказать поражающие воздействия на людей, сельскохозяйственных животных и растения, объекты экономики и окружающую среду. При этом нормативное определение опасного горно-геологического процесса или явления отсутствует.

В отличие от природных геологических процессов, главной причиной возникновения и активизации горно-геологических явлений служит антропогенный фактор. Поэтому можно сказать, что горно-геологические явления при формировании техногенных массивов являются комплексом процессов, возникающих в массивах пород и вызванных воздействием человека на геологическую среду. Для безопасного формирования хранилищ отходов горного производства чрезвычайно важно надежно выявлять и прогнозировать развитие геодинамических процессов, влияющих на состояние горнотехнических объектов. Сегодня это достигается организацией соответствующих мероприятий, созданием систем управления безопасностью и контроля состояния ГПТС, зачастую уникальных и зависящих от типа объекта наблюдения.

В России в последние два десятилетия надзорными органами осуществляется постоянное повышение требований к обеспечению безопасности при эксплуатации опасных объектов, в том числе на добывающих предприятиях. Одним из таких инструментов становится непрерывный, в том числе автоматизированный, мониторинг состояния объектов и контроль соблюдения требований эксплуатации объектов, заложенных в проекте. В данной работе предлагается комплекс критериев по оценке состояния горнотехнических сооружений, позволяющий проектировать системы сбора и анализа данных, отвечающих требованиям российской нормативной базы (294-ФЗ от 26.12.2008, Приказ МПР РФ от 21.05.2001 N 433, 68-ФЗ от 21.12.1994 [268-270]), а также учитывающих основные международные тенденции развития и опыт в данной отрасли.

Разработка системы контроля безопасности формирования откосного горнотехнического сооружения начинается с идентификации опасных горно-геологических явлений исследуемой ГПТС. Под идентификацией понимается системная классификация ГГЯ, анализ факторов, обуславливающих развитие отдельно взятого ГГЯ и определение показателей, отражающих степень развития отдельно взятого ГГЯ (или групп ГГЯ в целом).

В силу многообразия горнотехнических сооружений единый набор критериев не может быть напрямую использован для всех сооружений. Для решения данной задачи автором были рассмотрены существующие примеры типизации и классификации процессов и вызванных ими явлений при:

- ведении открытых горных работ;
- складировании на земной поверхности отходов добычи и обогащения твердых полезных ископаемых;
- оценке состояния естественных склонов на оползнеопасных участках.

Был проведен подробный анализ многочисленных исследований, посвященных классификации экзогенных геологических процессов и развития ГГЯ [23, 42, 51, 186, 212, 230, 271-279]. В результате была произведена систематизация опасных горно-геологических явлений, свойственных разным типам техногенных откосных сооружений, и предложена их классификация [280]. Проведенная дифференциация горно-геологических явлений представляется четырехуровневой – определены классы, подклассы, типы и факторы, обуславливающие развитие опасных геологических процессов:

1. Класс – идентифицирует само явление, указывает его принадлежность к определенному опасному инженерно-геологическому процессу (например, оползни; фильтрационное разрушение горных пород; просадочные явления и другие).

2. Подкласс – генетически классифицирует горно-геологические явления (например, оползни бортов глубоких карьеров; оползни внешних и внутренних отвалов; оползни откосных сооружений дамб намывного массива; обрушения отвалов вскрышных пород; оплывание горных пород и т.д.). Под генезисом в данной систематизации понимается происхождение горнотехнического объекта в результате определенного технологического процесса его возведения.

3. Тип – максимально детализирует подкласс, выделяются инженерно-геологические, гидрогеологические и горно-технологические особенности развития явлений (например, оползни внешних и внутренних отвалов делятся на над подошвенные, подошвенные, подподошвенные; оплывание горных пород представлено типами фильтрационные и консистентные оплывины).

4. Факторы – обуславливают развитие горно-геологических явлений. Представляют собой набор физико-географических, инженерно-геологических, гидрогеологических и горно-технологических параметров, сочетание которых является необходимым условием возникновения и развития процесса определенного типа. К факторам были отнесены связность пород, обводненность массива пород, физико-механические свойства грунтов оснований и складированных материалов, интенсивность и характер атмосферных осадков, наличие водоносного горизонта в основании сооружения и т.д.

В основу предложенной классификации положены базовые научно-методологические классификации: инженерно-геологическая, являющаяся наиболее обобщающей и взятая за основу при определении классов ГГЯ; геотехнологическая, рассматривающая конкретные откосные горнотехнические сооружения и элементы откосов, что служило основой для выделения типов ГГЯ и факторов; геологическая, необходимая для идентификации относительно редких и малоизученных явлений.

В таблице 4.1 приведена частичная и упрощенная классификация наиболее вероятных горно-геологических явлений, возникающих при формировании хранилищ отходов переработки железорудного сырья в условиях АО «Карельский окатыш». Упрощение заключается в объединении некоторых подклассов и типов ГГЯ в один, объединении части факторов в группы. В основу классификации положено разделение хвостохранилищ по степени обезвоживания складированных отходов и способу возведения дамб намывных массивов.

Таблица 4.1 – Классификация горно-геологических явлений в массивах отходов переработки железорудного сырья АО «Карельский окатыш»

<i>Класс</i>	<i>Подкласс</i>	<i>Тип</i>	<i>Факторы</i>	<i>Результат</i>
Фильтрационное разрушение	Оплывание намывного массива отходов обогащения железных руд, дамба центральная или в сторону верхового откоса	Опльвины Консистентные опльвины Фильтрационные опльвины	Водонасыщенное состояние отложений	Гидродинамическая авария в результате течения водонасыщенных отложений, разрушение дамб
			Давление пульпы	
			Гидростатическое взвешивание частиц	
			Высокопористые и сильносжимаемые отложения	
			Вынос песчаных частиц	
Фильтрационное разрушение	Суффозия намывного массива отходов обогащения железных руд, дамба центральная или в сторону верхового откоса	Внутренняя суффозия Внешняя суффозия	Гранулометрический состав	Гидродинамическая авария в результате суффозионного выноса или перемещения материала, разрушение дамб
			Давление пульпы	
			Гидростатическое взвешивание частиц	
Фильтрационное разрушение	Подмыв и разрушение откосов намывного массива отходов обогащения руд, дамба центральная или в сторону верхового откоса	Промоины и размыв откоса поверхностными водами	Атмосферные осадки	Разрушение дамб
			Движение потока жидкости	
			Вынос частиц	
Оползень	Оползень дамбы намывного массива отходов обогащения железных руд, дамба в сторону низового откоса	Надподошвенный оползень Подошвенный оползень Подподошвенный оползень	Давление пульпы	Переход части массива в водонасыщенное состояние вследствие снижения пористости и ухудшения фильтрационных свойств дамб
			Гидростатическое взвешивание частиц	
			Суффозия	
			Снижение пористости материалов	
Оползень	Оползень массива глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов	Надподошвенный оползень	Атмосферные осадки	Оползание вследствие чрезмерной нагрузки и переувлажнения верхней части массива
			Гидростатическое взвешивание частиц	
			Перегрузка массива	

<i>Класс</i>	<i>Подкласс</i>	<i>Тип</i>	<i>Факторы</i>	<i>Результат</i>
Оползень	Оползень массива глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов	Подошвенный оползень	Снижение пористости отложений	Переход слоя отложений в водонасыщенное состояние, образование поверхности ослабления, капиллярное поднятие жидкости и переувлажнение грунтов оснований, тиксотропное разжижение отложений
			Гидростатическое взвешивание частиц	
			Водоносный горизонт в основании	
			Суффозия	
			Прочностные характеристики грунтов оснований	
			Гранулометрический состав отложений	
Оползень	Оползень массива глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов	Подподошвенный оползень	Гидростатическое взвешивание частиц	Капиллярное поднятие жидкости и переувлажнение грунтов оснований, оползневая деформация массива
			Прочностные характеристики грунтов оснований	
			Перегрузение массива	
Оползень	Оползень массива глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов	Оползень выдавливания Оползень оплывания Оползень проседания	Переувлажненные глинистые породы в основании или теле массива	Оползневая деформация массива
			Водонасыщенное состояние отложений	
			Сильносжимаемые грунты основания	
Просадочные явления	Просадка массива глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов	Просадка массива нарушенной структуры	Увлажнение отложений	Деформация откоса
			Уплотнение отложений	
			Наличие слабого основания	

Как видно из таблицы 4.1, наиболее частыми факторами развития негативного процесса являются гидрогеологические: гидростатическое взвешивание частиц в результате перехода отложений в водонасыщенное состояние, фильтрационный вынос частиц в результате установления техногенного водоносного горизонта в теле массива и другие. Влияющие факторы для объектов различного типа и подкласса могут быть одинаковыми, однако массивы обезвоженных отходов обладают более серьезным запасом прочности и менее подвержены воздействию указанных факторов [280, 281].

Использованный подход при систематизации опасных горно-геологических явлений позволяет строить деревья возможных исходов для каждого объекта и оценивать риски проявления конкретного негативного процесса, вызванного природными или техногенными факторами. Важно отметить, что в Российской Федерации риск-ориентированный подход при оценке экологической безопасности является приоритетным, поэтому приведенная классификация представляется актуальной. Пример дерева исходов при анализе инженерно-геологических и гидрогеологических факторов развития негативного горно-геологического процесса приведен на рисунке 4.1. Для упрощения рисунка принято допущение, что складирование рядовых пульп производится только в хранилища с дамбами, возведенными в сторону или верхового, или низового откоса. Некоторые повторяющиеся вопросы пропущены.

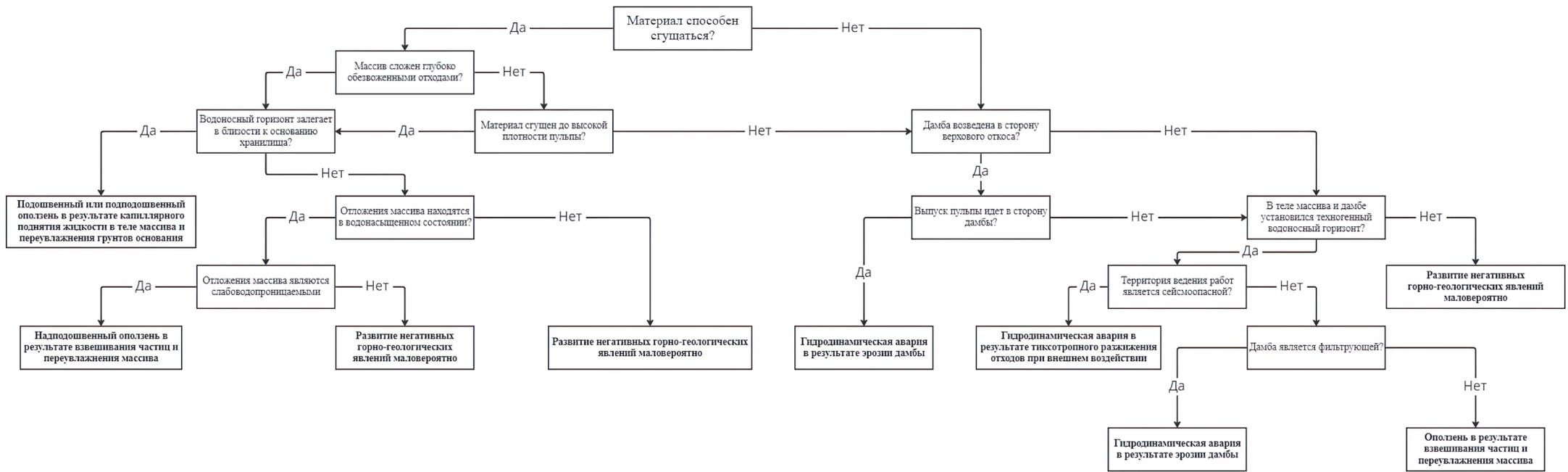


Рисунок 4.1 – Пример дерева исходов при анализе факторов развития негативных горно-геологических процессов в массивах хранилищ отходов переработки железорудного сырья

Анализ можно представить в виде односложных ответов на поставленные вопросы. Начнем с первого вопроса – способность материала сгущаться. Если проведенные исследования свойств отходов показали, что они способны к сгущению, тогда наиболее безопасным вариантом размещения хвостов представляется их складирование в сгущенном или глубоко обезвоженном виде. При отрицательном ответе на первый вопрос реализуется складирование отходов в хвостохранилища намывного или наливного типа в виде низкоплотной пульпы. Точно также при отрицательном ответе на вопрос о сгущении материала до высокой плотности пульпы предполагается, что пульпы складировуются в намывное или наливное хвостохранилище.

Далее задавая последовательные вопросы, касающихся характеристик техногенных отложений массива и дамб, можно прийти к наиболее вероятным классам, подклассам или типам явлений, свойственных данному сооружению. На примере приведенного на рисунке 4.1 дерева исходов можно заключить, что для хранилищ пульп с низкой плотностью вероятным негативным процессом становится фильтрационное разрушение пород в результате их оплывания или суффозии. При складировании обезвоженных отходов обогащения массивы наиболее склонны к оползневым явлениям.

В приведенном примере отсутствуют некоторые вопросы, наличие которых предполагается логикой анализа состояния массива. Например, при анализе массива глубоко обезвоженных отходов присутствует вопрос о степени водонасыщенности отложений, при анализе намывных массивов этого вопроса нет. Это связано с тем, что при выпуске рядовых несгущенных пульп отложения массива при его формировании могут находиться только в состоянии полного водонасыщения. Поэтому данный вопрос будет излишним.

Визуальное представление иерархии факторов возникновения и развития выделенных ГГЯ наиболее удобно выразить трехуровневым деревом, которое отображает зависимость показателя состояния массива горных пород или техногенных отложений от факторов различной природы (рисунок 4.2).

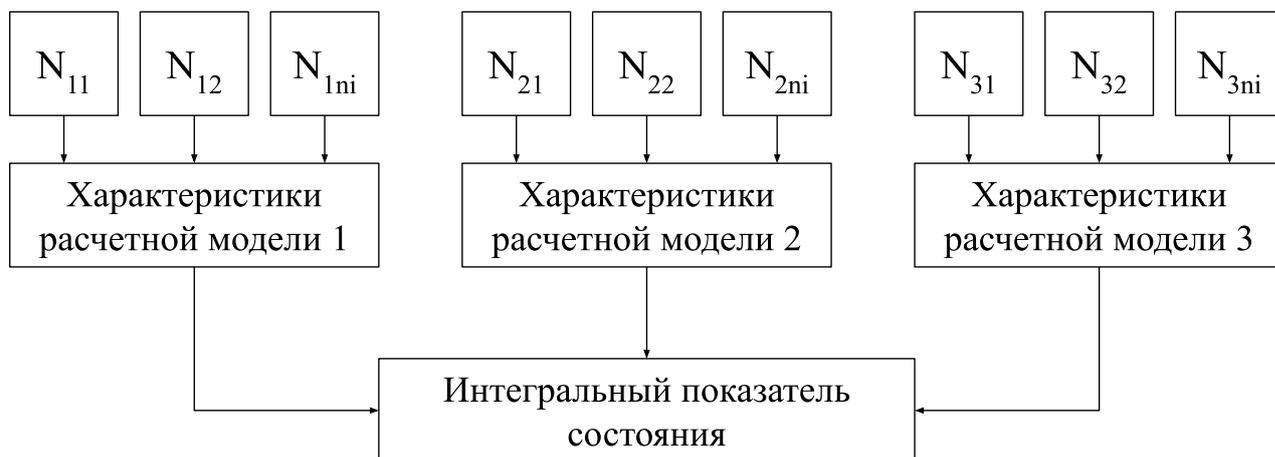


Рисунок 4.2 – Иерархия факторов возникновения и развития горно-геологических явлений при оценке интегрального показателя состояния массива пород

Верхний уровень (корень дерева) – это непосредственно интегральный показатель состояния. Горнотехнические сооружения в целом можно охарактеризовать двумя интегральными показателями состояния – коэффициентом запаса устойчивости откоса и несущей способностью основания. Последний обязательно необходимо учитывать при возведении хранилища на слабых основаниях, особенно при формировании массива на намывных территориях.

Второй уровень дерева – это характеристики, входящие в расчетную модель интегрального показателя состояния. Третий уровень дерева – численные характеристики (N_{11} , $N_{12} \dots N_{1i}$), отображающие состояние окружающей среды и интенсивность техногенной нагрузки: температура (является важной характеристикой при оценке состояния массива многолетнемерзлых горных пород), уровень реки, протекающей в непосредственной близости от борта карьера или техногенного массива, количество осадков в единицу времени, плотность, удельное сцепление, угол внутреннего трения и другие показатели физико-механических свойств грунтов оснований и техногенных отложений массивов.

Для качественного управления состоянием горнотехнических сооружений необходим механизм для оценки степени влияния конкретного фактора на устойчивость массива. Проведенное автором обобщение опыта оценки состояния бортов карьеров, откосов отвалов и дамб гидротехнических сооружений позволило сделать заключение, что все факторы, влияющие на устойчивость породного массива, можно разделить на две категории с точки зрения динамики их изменения – быстро меняющиеся и медленно меняющиеся факторы [282, 283]. Поэтому

необходимые для оценки состояния откосного горнотехнического объекта характеристики были разделены на четыре типа в зависимости от скорости изменения их показателей во времени:

1. Динамические. Значения динамически изменяющихся параметров измеряются минимум один раз в сутки, к таким характеристикам можно отнести деформации откосного сооружения, уровни техногенного водоносного горизонта в теле дамбы намывного хвостохранилища или водонасыщенного отвала.

2. Квазидинамические. Для обеспечения достоверности информации и необходимой точности квазидинамические параметры необходимо измерять от одного раза в неделю до нескольких раз в год.

3. Квазистатические. Значения данных параметров необходимо измерять один раз в несколько лет. К этой группе можно отнести показатели физико-механических свойств техногенных отложений и грунтов оснований массивов.

4. Статические. К данному типу параметров относятся расположение объекта, климатические условия территории, рельеф местности, а также эксплуатационные характеристики, предусмотренные проектом.

Применение разработанной типизации позволяет обосновать периодичность получения данных о состоянии горнотехнического сооружения по «весу» или «вкладу» значения той или иной характеристики в интегральную оценку состояния объекта. В таблице 4.2 приведена рекомендуемая периодичность сбора информации о показателях свойств массивов и грунтов оснований хранилищ в соответствии с разработанной классификацией ГГЯ. В столбце с наименованием ГГЯ даны типы явлений и вид откосного горнотехнического сооружения.

В таблице присутствует разделение периодичности собираемых данных в зависимости от состояния окружающей среды и характера работ по формированию и эксплуатации хранилища:

- стационарный режим – штатное ведение намывных или отвальных работ при климатической норме для данного региона;
- нестационарный режим – нештатное изменение технологии намыва или отвалообразования и интенсивности работ; резкая перемена климатических условий, рост интенсивности атмосферных осадков, изменение характера и продолжительности осадков, изменение режима поверхностного стока.

Таблица 4.2 – Рекомендуемая периодичность сбора инженерно-геологических и гидрогеологических данных о показателях свойств отложений массивов и грунтов оснований при развитии горно-геологических явлений

<i>Горно-геологическое явление</i>	<i>Гидрогеологическая информация</i>		<i>Инженерно-геологическая информация</i>	
	Стационарный режим	Нестационарный режим	Стационарный режим	Нестационарный режим
Оплывины в намывных массивах	1 раз в неделю	Ежедневно	1 раз в 5 лет	1 раз в год
Суффозия намывного массива	1 раз в неделю	Ежедневно	1 раз в 5 лет	1 раз в год
Промоины и размыв намывного массива	1 раз в неделю	Ежедневно	1 раз в 5 лет	1 раз в год
Надподошвенный оползень дамбы намывного массива	1 раз в 2 недели	Ежедневно	1 раз в 5 лет	1 раз в год
Подподошвенный оползень дамбы намывного массива	1 раз в 2 недели	Ежедневно	1 раз в 5 лет	1 раз в год
Надподошвенный оползень массива глубоко обезвоженных хвостов	1 раз в 2 недели	1 раз в неделю	1 раз в 5 лет	1 раз в 5 лет
Пододошвенный оползень массива глубоко обезвоженных хвостов	1 раз в месяц	1 раз в неделю	1 раз в 5 лет	1 раз в 5 лет
Подподошвенный оползень массива глубоко обезвоженных хвостов	1 раз в месяц	1 раз в неделю	1 раз в 5 лет	1 раз в 5 лет
Оползни выдавливания, оплывания и проседания массива глубоко обезвоженных хвостов	1 раз в месяц	1 раз в 2 недели	1 раз в 5 лет	1 раз в 5 лет
Просадка массива глубоко обезвоженных хвостов	1 раз в месяц	1 раз в 2 недели	1 раз в 5 лет	1 раз в 5 лет

Согласно таблице 4.2 основным контролируемым гидрогеологическим параметром является уровень воды в контрольных скважинах (уровень техногенного водоносного горизонта или депрессионной кривой). Организуются визуальные или инструментальные наблюдения, направленные на выявление и оценку следующих процессов, являющихся основными факторами активизации негативного ГГЯ:

- при фильтрационном разрушении хранилища (оплывины, суффозия, промоины и размыв) – выявление точек выхода фильтрационного потока из откоса, контроль чистоты фильтрующейся жидкости (оценка количества взвешенных частиц в воде), определение расходов воды через дамбы;

- при оползневых и просадочных явлениях – степень инфильтрации атмосферных осадков в массив, расходы подземных вод (гидродинамический режим) и их выходы на поверхность.

Основным контролируемым инженерно-геологическим параметром являются физико-механические свойства отложений, слагающих массив, и грунты оснований. Для этого необходимо проведение полевых и лабораторных исследований, целью которых является определение следующих свойств: гранулометрический состав отложений массива и материалов дамб, компрессионные характеристики и прочностные свойства грунтов оснований и техногенных отложений, консистенция хвостов (коэффициент водонасыщения), влажность, плотность и другие. Состав собираемых инженерно-геологических данных един для всех объектов, склонных к развитию в их массивах выделенных ГГЯ.

Представленные рекомендации являются одним из условий качественного управления состоянием массивов горных пород, а также проектирования современных систем мониторинга горнотехнических объектов.

4.2 Риск-ориентированный подход при анализе устойчивости хранилищ отходов обогащения твердых полезных ископаемых

На сегодняшний день на всех стадиях жизненного цикла горного предприятия Федеральным законом №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [157] и «Правилами безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [284] установлена процедура производственного контроля, в сферу которого входит обязательная разработка и поддержание функционирования систем управления промышленной и экологической безопасностью и мероприятий по предупреждению, локализации и ликвидации последствий аварий на объекте. Сфера применимости риск-ориентированного подхода регламентируется статьей 8.1 Федерального закона № 294-ФЗ [268].

В странах Западной Европы, Северной Америки, Австралии риск-ориентированный подход применяется достаточно давно и является основополагающим при оценке безопасности функционирования природно-техногенных систем. На сегодняшний день существует ряд рекомендаций, проведен ряд фундаментальных исследований [285-289] применительно к различным отраслям промышленности. Описанная выше формализованная структура в виде дерева позволяет легко переходить от принципиальной к математической модели, при необходимости применять различные способы оценки и полностью автоматизировать процесс расчетов, отследить все возможные исходы и оценить вероятности того или иного исхода.

Было установлено, что эффективность контроля промышленной и экологической безопасности наблюдаемых откосных сооружений обеспечивается при условии соблюдения следующих принципов [12, 71, 288]:

- непрерывности, то есть контроля состояния массива на протяжении всего периода его формирования и эксплуатации, в результате чего поэтапно возрастает точность расчетной модели;
- адаптации расчетной модели к контрольной системе в соответствии с получаемой информацией;
- обратной связи;
- полноты исследований, включающих получение достоверной информации о состоянии массива и свойствах пород основания, материалов дамб и техногенных отложений.

Статья 11 Федерального закона № 116-ФЗ регламентирует требования к организации системы управления промышленной безопасностью (СУПБ) на опасном производственном объекте (ОПО), к которым относятся все предприятия горнодобывающего комплекса. Следует выделить следующие общие задачи, решение которых требуется от систем управления промышленной безопасностью:

- идентификация, анализ и прогнозирование риска аварий на опасных производственных объектах и связанных с такими авариями угроз;
- координация работ по предупреждению аварий и инцидентов на опасных производственных объектах;
- планирование и реализация мер по снижению риска аварий на опасных производственных объектах, в том числе при выполнении работ или оказании услуг на опасных производственных объектах сторонними организациями либо индивидуальными предпринимателями;
- осуществление производственного контроля соблюдения требований промышленной безопасности;

- своевременная корректировка мер по снижению риска аварий на опасных производственных объектах;
- информационное обеспечение деятельности в области промышленной безопасности (на опасных производственных объектах I класса опасности устанавливается режим постоянного государственного надзора в соответствии с положениями Федерального закона № 294-ФЗ).

Основная цель анализа риска аварий – установление степени аварийной опасности ОПО и (или) его составных частей для заблаговременного предупреждения следующих угроз:

- причинения вреда жизни и здоровью людей, вреда животным, растениям, окружающей среде;
- безопасности государства, имуществу физических и юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу;
- возникновения аварий и (или) чрезвычайных ситуаций техногенного характера.

Также анализ риска аварий производится для разработки, плановой реализации и своевременной корректировки обоснованных рекомендаций по снижению риска аварий и (или) мероприятий, направленных на снижение масштаба последствий аварий и размера ущерба, нанесенного в случае аварии на ОПО [290].

Согласно ч. 2 «Общие рекомендации», п. 7 [291], указанный приказ Ростехнадзора рекомендуется использовать в качестве основы для разработки отраслевых методических рекомендаций, руководств и методик по проведению анализа риска аварий на ОПО различных отраслей промышленности, транспорта и энергетики. Рекомендации по анализу риска аварий при необходимости могут дополняться и уточняться в соответствующих руководствах по безопасности, отражающих отраслевую специфику и технологические особенности ОПО. Соответственно данный документ (в настоящей и прошлых редакциях) служит методологической базой для создания руководств по анализу опасностей и оценке риска аварий на ОПО и, в том числе, для разработки систем управления промышленной безопасностью. Используя приведенные состав и стадии проведения анализа риска ОПО [291], была разработана структура анализа риска аварий на горнотехнических объектах предприятий горнодобывающей промышленности (рисунок 4.3) [290]:

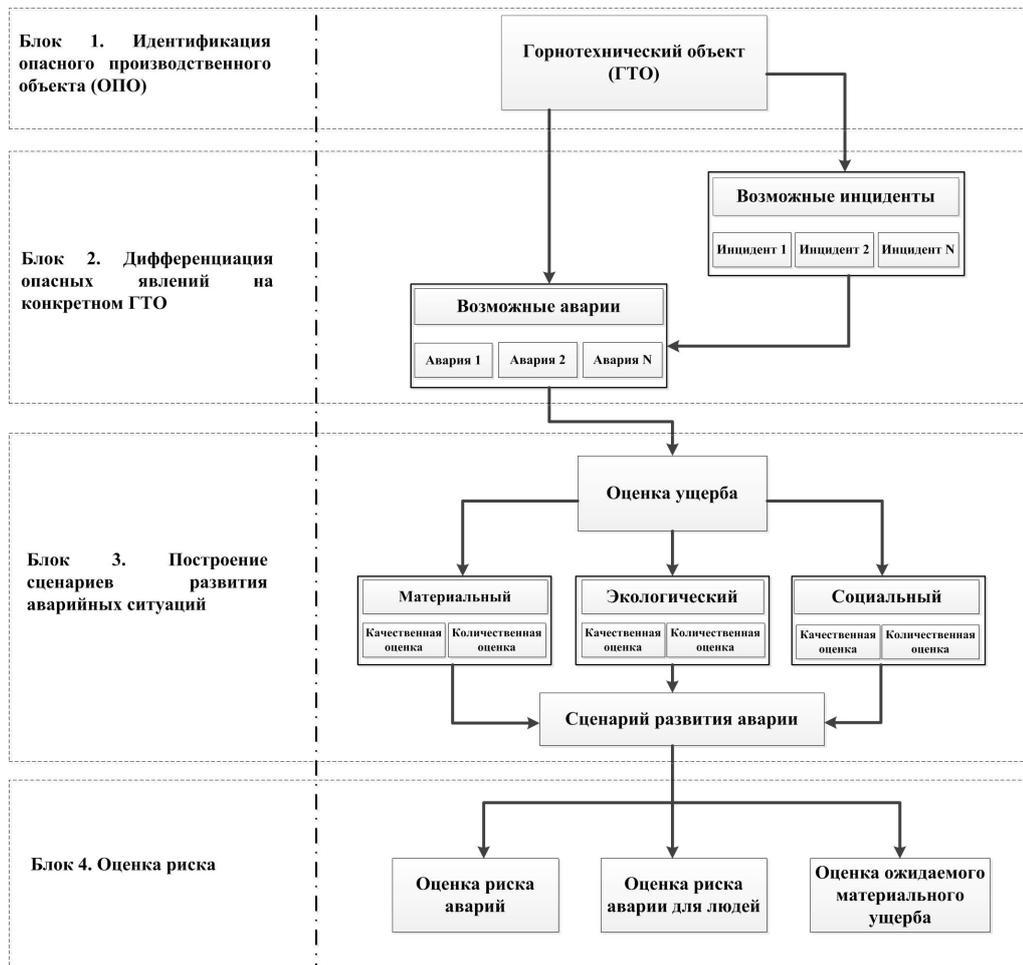


Рисунок 4.3 – Структура оценки риска аварии на горнотехническом объекте

Предлагаемая структура оценки риска аварии является частью системы управления промышленной безопасностью на горнодобывающем предприятии. Согласно нормативному определению, СУПБ называется комплекс взаимосвязанных организационных и технических мероприятий, осуществляемых организацией, эксплуатирующей опасные производственные объекты, в целях предупреждения аварий и инцидентов на опасных производственных объектах, локализации и ликвидации последствий таких аварий.

Систематизация горно-геологических явлений, приведенная в пункте 4.1, является фундаментом для следующих элементов СУПБ:

1. Определение набора показателей, отражающих состояние и направление развития ГГЯ и частоты контроля изменяющихся параметров.
2. Определение набора критериев, характеризующих безопасность эксплуатации горнотехнического объекта и соответствующих управляющих решений при их превышении.
3. Определение набора сценариев опасных, внештатных и аварийных ситуаций на исследуемой ГПТС.
4. Оценка рисков аварии на горнопромышленном объекте.

Одной из основных целей функционирования СУПБ является идентификация, анализ и расчет степени аварийной опасности ОПО и разработка мероприятий, направленных на снижение масштаба последствий аварий и размера ущерба, нанесенного в случае аварии на ОПО. На основе исследований состава и стадий проведения анализа риска ОПО была обобщена структура анализа риска аварий на предприятиях горнодобывающей промышленности. Предлагаемая структура оценки риска аварии на горнодобывающем объекте состоит из четырех блоков:

- блок 1 представляет собой массив данных, описывающих горнотехнический объект в контексте анализа риска аварии в структуре разрабатываемой системы управления промышленной безопасностью;
- блок 2 включает анализ опасностей, выявление условий, источников возникновения аварий, их видов с конкретизацией для рассматриваемого горнотехнического объекта;
- блок 3 отвечает за построение сценариев развития аварийной ситуации на рассматриваемом горнотехническом объекте с оценкой ущерба от данной аварии;
- блок 4 определяет возможность и степень тяжести последствий в случае реализации построенного сценария аварийной ситуации для здоровья человека, имущества и окружающей природной среды [290].

Согласно приказу Министерства природных ресурсов и экологии РФ о мониторинге недр, одной из основных задач государственного мониторинга состояния недр является разработка, обеспечение реализации и анализ эффективности мероприятий по обеспечению экологически безопасного недропользования и охраны недр, а также по предотвращению или снижению негативного воздействия опасных геологических процессов [269]. В свою очередь законы [268-270] регламентируют правомерность и необходимость доведения сигналов оповещения и экстренной информации до органов управления опасного производственного объекта или единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций и населения в автоматическом и (или) автоматизированном режимах.

Проведенный анализ опыта внедрения систем мониторинга на горных предприятиях и современная нормативно-правовая база показывают, что качественное информационное обеспечение геотехнологий позволит значительно снизить риск аварийных ситуаций и минимизировать социальные и экономические потери. Построение системы управления промышленной безопасностью на горном предприятии должно основываться на блоке «Оценка риска аварии» и возможных ее последствий.

4.3 Разработка модели управления безопасностью формирования хранилищ глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов и мониторинга устойчивости их откосов

При разработке программ организации сбора информации приведенная выше систематизация (типизация) характеристик оценки состояния горнотехнического сооружения позволяет определить с одной стороны периодичность измерений, а с другой – их методику. В большинстве случаев частота замеров определяется на основе соответствующей нормативной документации, но также нередки случаи определения состава и периодичности собираемых данных на основе опыта и экспертного мнения специалиста, отвечающего за данный вопрос на предприятии. Применение разработанной системы позволяет обосновать периодичность получения данных о состоянии объектов и значениях отдельных параметров по комплексу критериев, что является одной из главных задач при управлении состоянием массива и проектировании современных систем мониторинга горнотехнических объектов.

Таким образом, для современных горнодобывающих компаний основополагающим ресурсом становится информация. Данные, получаемые в ходе выполнения инженерно-геологических изысканий, лабораторных исследований или собираемые посредством автоматизированного мониторинга, не всегда позволяют достоверно оценить состояние исследуемого объекта, так как зачастую информация представляется разрозненной. Для построения объективных моделей состояния горнотехнической системы необходимо уметь определять следующие показатели входящей информации: важность, полнота и достаточность, адекватность, релевантность и толерантность.

Сведения, необходимые для решения задачи обеспечения безопасности формирования откосного техногенного сооружения, наиболее удобно выразить в виде объектно-характеристической таблицы (ОХТ). Данная таблица представляет собой двухмерную матрицу. В каждой строке таблицы приводятся наименования объектов или явлений, а в столбцах указаны наименования характеристик, значения которых используются для решения задачи [292]. Сумму всех объектно-характеристических таблиц назовем информационным кадастром. В конечном итоге, информационный кадастр отдельно взятого горнодобывающего предприятия, рассматриваемого как система взаимодействующих компонентов, должен состоять из ряда ОХТ, построенных для каждого эксплуатируемого объекта – карьера, намывного техногенного массива, насыпного техногенного массива, дамбы хвостохранилища и других откосных сооружений. Ниже представлена типовая схема объектно-характеристической таблицы откосного горнотехнического сооружения (рисунок 4.4).

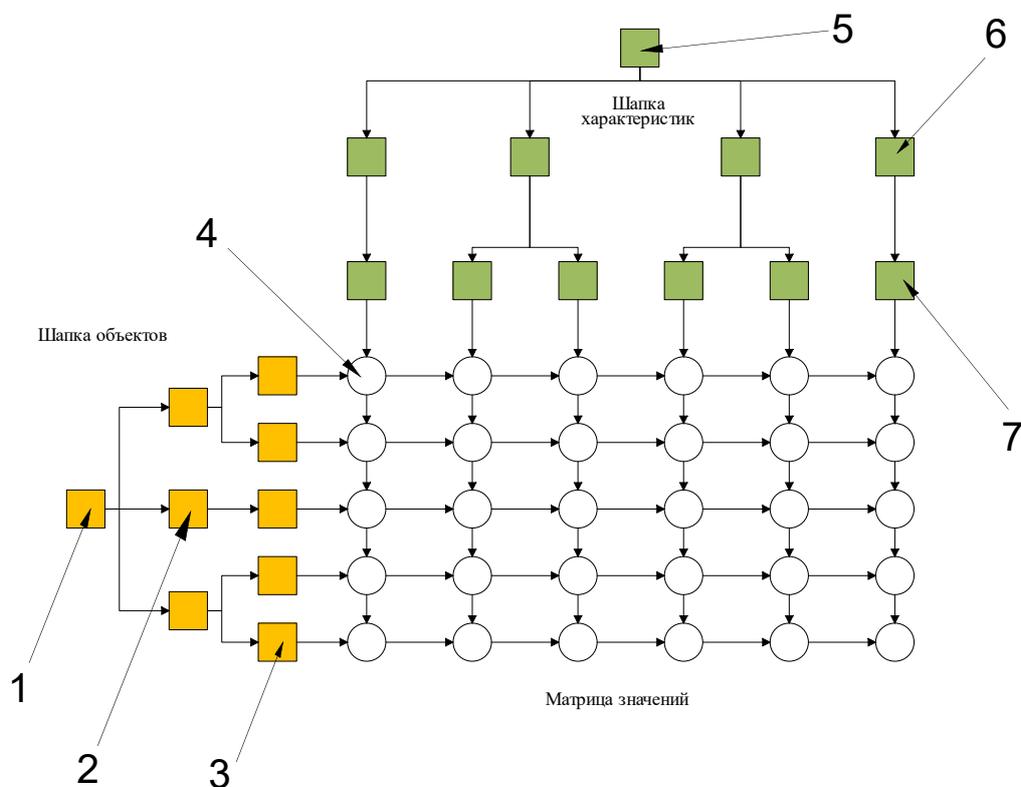


Рисунок 4.4 – Типовая объектно-характеристическая таблица горнотехнического сооружения
 1, 2, 3 – объекты 1, 2 и 3-го уровней соответственно; 4 – значения характеристик объектов;
 5, 6, 7 – характеристики 1, 2 и 3-го уровней соответственно

Примерами объектов и характеристик в ОХТ откосного горнотехнического сооружения могут являться соответственно:

- основание хранилища отходов обогащения твердых полезных ископаемых и физико-механические свойства грунтов основания (сцепление, плотность, угол внутреннего трения);
- техногенный массив и влажность слагающих его отложений;
- техногенный массив и физико-механические свойства намывных или насыпных техногенных отложений;
- уступ и геометрические параметры уступа;
- уступ и физико-механические свойства пород уступа.

Наиболее подробно остановимся на оценке полноты и релевантности информации в структуре разрабатываемой системы оценки риска возникновения аварийной ситуации при формировании хвостохранилищ. В общем случае, полнотой информации называется показатель, позволяющий оценить меру достаточности собираемой информации или получаемых данных для

решения соответствующего круга задач. Релевантностью называется показатель, характеризующий соответствие информации конкретным целям в рамках решаемой задачи.

Рассмотрим методику оценки полноты и релевантности информации, собираемой на техногенном массиве. Обозначим как A_{ab} элемент, находящийся в строке a и столбце b рассматриваемой ОХТ, причем:

$$A_{ab} = \begin{cases} 1 & \text{(информация имеется)} \\ 0 & \text{(информация отсутствует)} \end{cases}$$

Введем коэффициент полноты информации $K_{\text{полноты}}$:

$$K_{\text{полноты}} = \frac{\sum_{\forall a} \sum_{\forall b} A_{ab}}{mn}, \quad (4.1)$$

где \forall – квантор всеобщности;

m и n – соответственно число строк и столбцов в ОХТ

Необходимо учесть важность элементов. Обозначим коэффициент важности каждого элемента строки a и столбца b как $K_{ab}^{\text{важн}}$. Тогда величина взвешенности полноты информации примет вид:

$$K_{\text{полноты}}^{\text{важн}} = \frac{\sum_{\forall a} \sum_{\forall b} A_{ab} K_{ab}^{\text{важн}}}{mn \sum_{\forall a} \sum_{\forall b} K_{ab}^{\text{важн}}} \quad (4.2)$$

Далее количественно выразим релевантность информации через коэффициент релевантности $K^{\text{рел}}$, представляющий собой отношение объема релевантной информации $N^{\text{рел}}$ к общему объему поступившей информации N :

$$K^{\text{рел}} = \frac{N^{\text{рел}}}{N} \quad (4.3)$$

Сперва оценим фактографическую информацию, то есть информацию, содержащую конкретные сведения о конкретном объекте – о техногенном массиве. Допустим, имеется информационный кадастр всех техногенных массивов отдельно взятого предприятия. Релевантность i -й ОХТ выразится как:

$$K_i^{\text{рел}} = \frac{\sum_{\forall a} \sum_{\forall b} A_{abi}^{\text{рел}}}{m_i n_i}, \quad (4.4)$$

где

$$A_{abi}^{\text{рел}} = \begin{cases} 1 & \text{(A}_{ab} \text{ } i\text{-й ОХТ соответствует решаемой задаче)} \\ 0 & \text{(не соответствует задаче)} \end{cases}$$

С учетом $K_{ab}^{важн}$, коэффициент релевантности примет вид:

$$K_i^{рел} = \frac{\sum_{\forall a} \sum_{\forall b} A_{abi}^{рел} K_{abi}^{важн}}{m_i n_i \sum_{\forall a} \sum_{\forall b} K_{abi}^{важн}} \quad (4.5)$$

Для всего информационного кадастра:

$$K_i^{рел} = \frac{\sum_{\forall i} \sum_{\forall a} \sum_{\forall b} A_{abi}^{рел} K_{abi}^{важн}}{\sum_{\forall a} m_i n_i} \quad (4.6)$$

С учетом $K_{ab}^{важн}$ элементов объектно-характеристических таблиц:

$$K_i^{рел} = \frac{\sum_{\forall i} \sum_{\forall a} \sum_{\forall b} A_{abi}^{рел} K_{abi}^{важн}}{\sum_{\forall i} m_i n_i \sum_{\forall a} \sum_{\forall b} K_{abi}^{важн}} \quad (4.7)$$

На рисунке 4.5 представлена предлагаемая упрощенная схема описания массива, соответствующая принципам построения объектно-характеристических таблиц. Ромбами на схеме обозначены запротоколированные процессы, описывающие взаимодействие объектов. Расчетные уровни характеристик представлены в скругленных прямоугольниках. Значения характеристик в кругах можно измерить или рассчитать на основе методов, описанных в сущностях (прямоугольники), обладающих параметрами состояния. Данная схематизация всех составляющих элементов отдельно взятого объекта (хранилища глубоко обезвоженных хвостов), входящих и исходящих потоков информации позволяет унифицировать процесс оценки состояния различных ГПТС и управлять всем многообразием систем по единым принципам.

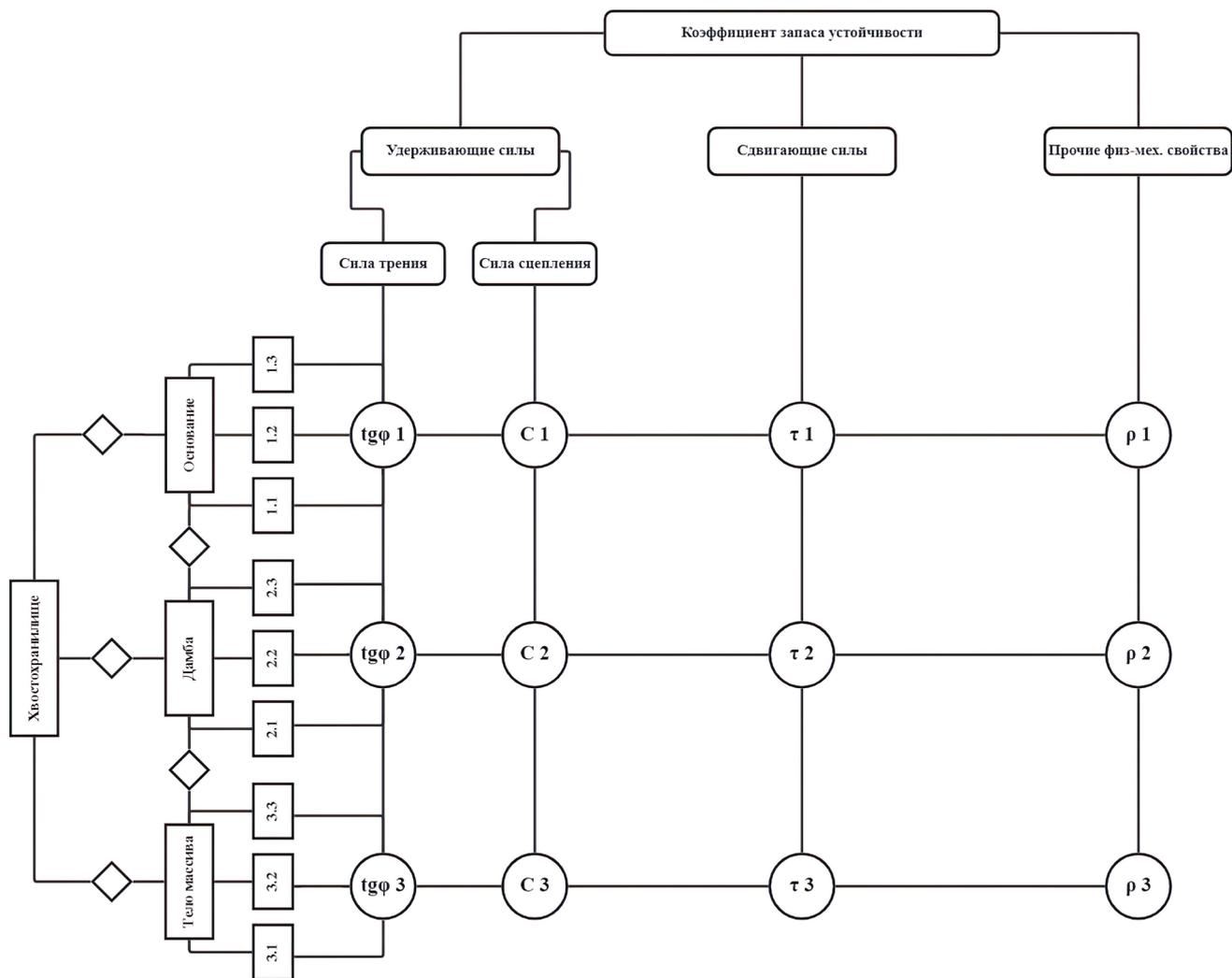


Рисунок 4.5 – Формализованная схема описания хранилища глубоко обезвоженных отходов переработки железорудного сырья в структуре мониторинга безопасности отвальных работ

В соответствии с рисунком 4.5 объект «Хвостохранилище» состоит из 3 подобъектов или объектов 2-го уровня – тела массива (хвостов), дамбы и основания хранилища. Каждый объект второго уровня состоит из минерального скелета (собственно частиц), воды и воздуха – на рисунке это обозначено номерами с 1.1 по 3.3. Объекты первого и второго уровней находятся во взаимодействии согласно процессам, описанным в ромбах. Параметры состояния всех трех уровней объектов можно выразить определенными значениями, в данном примере это физико-механические свойства. В свою очередь коэффициент внутреннего трения и сцепление отнесены к третьему уровню характеристик, имеющих единый корень «Коэффициент запаса устойчивости». На пересечении объектов и характеристик получаем расчетные или измеренные значения, которые используются для интегральной оценки состояния объекта. При

необходимости более полного исследования объекта схема может быть расширена до требуемого уровня детализации.

Для безопасного формирования хранилища глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов рекомендуется организация комплексного мониторинга состояния, включающего инструментальные измерения, в том числе автоматизированные, полевые и лабораторные исследования свойств отложений и грунтов оснований. Необходимый объем информации достигается путем сбора данных посредством инженерно-геологического, гидрогеологического, деформационного и технологического мониторинга.

Цель инженерно-геологического мониторинга – изучение строения, состава и свойств грунтов оснований и дамб обвалования, техногенных отложений; геодинамических процессов и явлений, сопровождающих формирование и функционирование ГПТС.

Гидрогеологический мониторинг состояния необходим для наблюдений за: изменением гидрогеомеханических и гидродинамических процессов, развивающихся в техногенном массиве; гидродинамическим режимом подземных вод; фильтрационными процессами при установлении техногенного водоносного горизонта в теле массива.

Деформационный мониторинг включает наблюдения за деформациями откосных сооружений и их элементов, смещением земной поверхности. При технологическом мониторинге осуществляется контроль соответствия конфигурации массива проекту, соблюдения технологических режимов отвалообразования для обеспечения безопасного угла откоса сооружения, его высоты.

Автоматизированный контроль параметров осуществляется организацией постоянно действующей наблюдательной системы. Основные средства системы мониторинга – контрольно-измерительная аппаратура, в дистанционном режиме передающая информацию об основных гидрогеологических параметрах (уровнях воды в наблюдательных скважинах). Целесообразно устанавливать датчики струнного типа на контакте основание–техногенный массив, в середине массива и в месте наиболее отрицательных форм рельефа площадки хвостохранилища.

На примере смоделированного хранилища площадью 21,83 км² и средней мощностью слоя хвостов 50 м рассмотрим периодичность сбора информации о состоянии объекта при складировании глубоко обезвоженных отходов на весь период его жизненного цикла. Была составлена схема расположения выработок для определения свойств грунтов оснований и отложений массивов без учета первичных исследований при выборе площадки хранилища (рисунок 4.6). На рисунке красными точками отмечены участки для проведения буровых работ по исследованию массива и заложению контролирующих датчиков, синими точками отмечено заложение датчиков для наблюдений за состоянием ограждающей дамбы. Данное количество

скважин является минимальным необходимым условием безопасного формирования и эксплуатации хранилища. С учетом всего вышеизложенного был предложен состав мониторинга хранилища, сложенного глубоко обезвоженными отходами обогащения руд железистых кварцитов. В таблице 4.3 приведена периодичность сбора информации о состоянии массива.

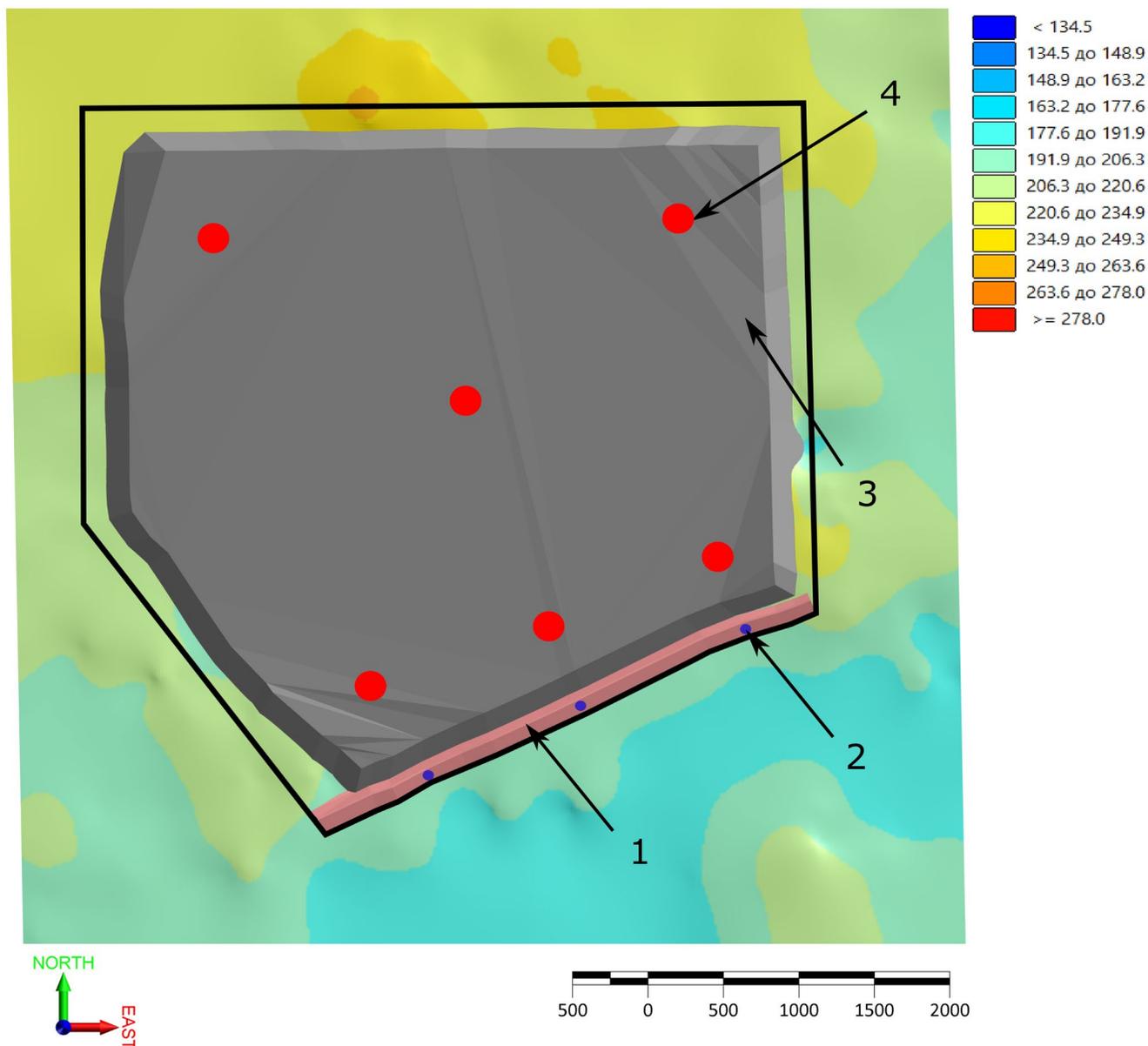


Рисунок 4.6 – Схема расположения наблюдательных и исследовательских скважин хранилища предварительно глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов
 1 – ограждающая дамба; 2 – гидрогеологические наблюдательные скважины;
 3 – тело массива (хвосты); 4 – исследовательские скважины

Таблица 4.3 – Периодичность сбора информации о состоянии массива, сложенного предварительно глубоко обезвоженными отходами обогащения железистых кварцитов

<i>Параметр</i>	<i>Тип параметра</i>	<i>Вид мониторинга</i>	<i>Периодичность измерений</i>
Рельеф	Статический	-	1 раз при выборе площадки хранилища
Климат	Статический	-	1 раз при выборе площадки хранилища
Конфигурация хранилища	Статический	-	1 раз при разработке проекта
Физико-механические свойства техногенных отложений	Квазистатический	Инженерно-геологический	Раз в 5 лет при условии низкой сжимаемости отложений
Физико-механические свойства грунтов основания	Квазистатический	Инженерно-геологический	То же, что и для техногенных отложений
Физико-механические свойства хвостов	Квазидинамический	Инженерно-геологический	Раз в полгода или при изменении технологии обогащения
Уровень воды на границе основание–массив	Квазидинамический	Гидрогеологический	1 раз в месяц
Уровень воды в теле дамбы	Квазидинамический	Гидрогеологический	1 раз в месяц
Визуальные наблюдения деформаций	Динамический	Деформационный	1 раз в неделю
Объем складирования	Динамический	Технологический	Ежедневно
Соответствие конфигурации хранилища проекту	Динамический	Технологический	Ежедневно

В отличие от мониторинга хранилищ водонасыщенных отложений, мониторинг хранилища глубоко обезвоженных хвостов отличается составом собираемой информации и ее периодичностью. Так регулярные ежедневные измерения гидрогеологических параметров – порового давления и напоров подземных вод, расходов воды через ограждающие дамбы, положение депрессионной поверхности и других – рекомендуется проводить в случае перехода массива в водонасыщенное состояние. При начальных $W = 10\%$ и $S_r = 0,3$ мгновенный переход массива в водонасыщенное состояние может произойти при выпуске в хранилище колоссального объема жидкости, невозможного в условиях складирования обезвоженных хвостов. В климатической зоне республики Карелия осадки в таком объеме не наблюдаются, однако с учетом величины инфильтрации и испарения влаги дополнительные измерения могут

потребоваться по истечении 6,71 лет после окончания формирования массива. С учетом возможности подтопления основания хранилища в обязательном порядке необходим контроль уровней воды на границе основание–массив в автоматизированном режиме. Поэтому при стационарном режиме ведения отвальных работ необходимая частота получения гидрогеологических данных составляет 1 раз в месяц, при изменении условий окружающей среды или технологии ведения работ – еженедельно.

Информация о рельефе, климате и конфигурация хранилища устанавливается при разработке проекта и влияет на выбор степени обезвоживания складированных хвостов и максимальную вместимость.

Исследования грунтов оснований и уплотненных техногенных отложений должны включать проведение работ для уточнения их прочностных свойств, отбор проб для определения физико-механических свойств грунтов и отложений в лабораторных условиях.

Исследования свойств хвостов обязательно должны включать анализ гранулометрического и минерального состава для оценки их способности к сгущению до требуемой величины остаточной влажности.

Результаты сбора информации посредством мониторинга используются для расчета интегрального показателя состояния массива с помощью программных средств и выработки дальнейших мероприятий по обеспечению его устойчивости в случае нахождения массива в предельном состоянии. Для этого предварительно определяются критические показатели, которые необходимо рассчитывать в следующей последовательности:

1. Определение нормативного коэффициента запаса устойчивости исходя из класса ответственности сооружения и технологических требований.
2. Построение инженерно-геологической модели на определенный момент времени с указанием физико-механических свойств пород и уровня техногенного водоносного горизонта (при его наличии).
3. Создание геомеханической модели, отражающей положение наислабейшей кривой скольжения при штатном ведении процесса отвалообразования.
4. Расчет критических объемов воды, способствующего переходу отложений в водонасыщенное состояние и формированию техногенного водоносного горизонта в теле массива.
5. Построение гидрогеологической модели с учетом фильтрационных свойств техногенных отложений массива в случае формирования техногенного водоносного горизонта.

6. Создание уточненной геомеханической модели, учитывающей изменение физико-механических свойств отложений и пород дамб и отражающей положение наислабейшей кривой скольжения.

Пункты 5 и 6 не являются обязательными при отсутствии положительного водного баланса территории ведения отвальных работ. В итоге для управления состоянием техногенных массивов, сложенных глубоко обезвоженными отходами обогащения руд, предлагается комплекс мероприятий, состоящий из:

- идентификации факторов, вносящих наибольший вклад в интегральный показатель состояния горнотехнического объекта;
- выбора метода снижения негативного воздействия факторов;
- определения технологических схем для безопасного ведения процесса формирования хранилища, в том числе с выбором технологий сгущения и глубокого обезвоживания обрабатываемых пульп.

Выводы

1. Оперативная оценка текущего состояния горнотехнического сооружения производится на основе совокупности постоянно обновляющейся инженерно-геологической, гидрогеологической и геомеханической информации, получаемой посредством мониторинга и инженерно-геологических исследований.
2. Проведенная систематизация опасных горно-геологических явлений позволила выделить классы, подклассы, типы и факторы развития наиболее вероятных негативных процессов при организации хранилищ отходов переработки железорудного сырья.
3. Предложенная четырехуровневая классификация опасных горно-геологических явлений позволяет прогнозировать поведение техногенного массива в зависимости от физико-географических и горно-геологических условий размещения хранилища и принимать необходимые управленческие решения для предотвращения аварийной ситуации.
4. На основе выделенных классов негативных горно-геологических явлений и факторов их развития построено дерево вероятных исходов при организации хранилищ отходов переработки железорудного сырья с различными показателями физико-механических свойств складированных материалов.
5. Предложена типизация характеристик, основанная на скорости изменения контролируемых показателей и позволяющая обосновать необходимую и достаточную периодичность получения данных о состоянии откосных горнотехнических объектов.

6. Разработана структура и состав мониторинга состояния хранилища глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов, заключающаяся в организации системы инструментальных наблюдений, определении физико-механических свойств техногенных отложений, пород оснований и материала, слагающего дамбы обвалования, в полевых и лабораторных условиях с заданной периодичностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации, представляющей собой законченную научно-квалификационную работу, на основе выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований изменения свойств отходов обогащения железистых кварцитов и поведения сложенных ими массивов под влиянием природных и технологических факторов решена актуальная научная задача формирования хранилищ предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов, что имеет важное значение для обеспечения эффективности и безопасности их сооружения и эксплуатации.

Основные научные результаты, выводы и рекомендации, полученные лично автором:

1. Показано, что имеющие наибольшее распространение хранилища отходов переработки железорудного сырья, относящиеся к намывному типу, чаще всего подвержены разрушениям и деформационным явлениям, поэтому перспективным выглядит отказ от складирования пульпы с низкой концентрацией твердого и переход к складированию сгущенных или глубоко обезвоженных хвостов.

2. Проведенные испытания физико-механических свойств хвостов мокрой магнитной сепарации Костомукшского железорудного месторождения показали, что исследуемый материал представлен мелкозернистыми неоднородными слабосжимаемыми песками и имеет следующие усредненные характеристики: плотность $\rho = 1450 \text{ кг/м}^3$, угол внутреннего трения $\varphi = 29,5^\circ$.

3. Определены основные физико-географические, инженерно-геологические, гидрогеологические и технологические факторы, влияющие на устойчивость и вместимость хранилищ отходов обогащения железистых кварцитов. Установлено, что учет особенностей рельефа местности при складировании предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов позволяет сократить площадь, занимаемую хранилищем, до 45 %.

4. На основе компьютерного моделирования получены зависимости коэффициента запаса устойчивости хранилищ глубоко обезвоженных хвостов от характеристик грунтов оснований (угол внутреннего трения, сцепление, плотность), значения угла откоса, высоты массива и его конфигурации.

5. Проведенное исследование процесса глубокого обезвоживания отходов обогащения железистых кварцитов в модифицированной вибрационной машине с получением хвостов с остаточной весовой влажностью 8–11 % позволило определить оптимальные динамический и частотный диапазоны колебаний, обеспечивающие наиболее эффективную работу оборудования.

6. Разработана технологическая схема складирования предварительно обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов в условиях предприятия АО «Карельский окатыш», включающая предварительное сгущение пульпы, ее подачу в вибрационную машину для глубокого обезвоживания и дальнейшее транспортирование в хранилище системой конвейерных лент с укладкой хвостов послойно или «по склону».

7. Разработана четырехуровневая классификация негативных горно-геологических явлений, свойственных массивам отходов переработки железорудного сырья, позволяющая построить дерево возможных исходов при анализе состояния массивов и разработать систему мониторинга состояния хранилища глубоко обезвоженных отходов обогащения железистых кварцитов.

8. Создана система контроля состояния хранилищ отходов переработки железорудного сырья, позволяющая обосновать необходимую периодичность получения инженерно-геологических и гидрогеологических данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Трубецкой К.Н., Потапов М.Г., Винницкий К.Е., Мельников Н.Н., Мироненков В.А. и др. Справочник. Открытые горные работы. – М.: Горное бюро, 1994. – 590 с
2. Нурок Г.А. Гидромеханизация открытых горных разработок. – М.: Недра, 1970. – 584 с
3. Русский И.И. Отвальное хозяйство карьеров. – М.: Недра, 1971. – 240 с
4. Доклад о Целях в области устойчивого развития, 2022 год [Электронный ресурс] // Официальный сайт Организации Объединенных Наций. – Режим доступа: <https://unstats.un.org> (дата обращения 11.03.2023)
5. Шарипов Д.Ш. Гидродинамические и гидростатические силы как факторы, влияющие на устойчивость хвостохранилищ // Науки о Земле и недропользование. – 2021. – Т. 44. – № 1 (74). – с. 63-72
6. Пигарева Т.А., Абакумов Е.В. Биологические параметры почв и техногенных субстратов хвостохранилищ предприятия по добыче железной руды // Теоретическая и прикладная экология. – 2015. – № 1. – с. 28-33
7. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2021 году [Электронный ресурс] // Официальный сайт Министерства природных ресурсов РФ. – Режим доступа: <https://www.mnr.gov.ru> (дата обращения 11.03.2023)
8. State of World Mine Tailings Portfolio 2020 [Электронный ресурс] // State of Worldmine Tailings 2020. – Режим доступа: www.worldminetailingsfailures.org (дата обращения 28.03.2022)
9. Кириченко Ю.В. Геоэкологические аспекты формирования техногенных массивов // Геология и разведка. – 1999. – № 6. – с. 124-129
10. Кириченко Ю.В. Управление состоянием массивов гидроотвалов для эффективного использования намывных грунтов // Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – М.: МГИ, 1983. – 151 с
11. Даванков А.Ю., Безганс В.Э. К вопросу оптимального формирования территорий угольных разрезов // Технология и механизация добычи угля открытым способом. – М.: Недра, 1985. – с. 28-33
12. Ржевский В.В. Процессы открытых горных работ. – М.: Недра, 1978. – 541 с
13. Ржевский В.В., Болотова Л.Е. Экология горного производства. – М.: МГИ, 1988. – 243 с
14. Трубецкой К.Н. Ресурсосберегающие технологии и их роль в экологии и рациональном природопользовании при освоении недр // Экологические проблемы горного производства. Тезисы докладов конференции. – М.: Изд. МГГУ, 1993
15. А.М. Гальперин, Ю.И. Кутепов, Ю.В. Кириченко, А. В. Киянец, А.В. Крючков, В.С. Круподеров, В.В. Мосейкин, В.П. Жариков, В.В. Семенов, Х. Клапперих, Н. Тамашкович, Х. Чешлок. Освоение техногенных массивов на горных предприятиях: Монография. – М.: Издательство «Горная книга», 2012. – 336 с
16. Гальперин А.М., Мосейкин В.В., Ларичев Л.Н., Щёкина М.В. Освоение техногенных месторождений хвостохранилищ // В сборнике: Сергеевские чтения, 2018. – с. 102-106
17. Гальперин А.М., Панфилов А.Ю., Пуневский С.А., Пелагеин И.В. Гидрогеомеханический мониторинг намывных сооружений горных предприятий // Гидротехническое строительство. – 2011. – № 1. – с. 19-24
18. Трубецкой К.Н., Чантурия В.А., Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Комплексное освоение месторождений и глубокая переработка минерального сырья. – М.: Наука, 2010. – 437 с
19. Федеральный закон № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. – Режим доступа: <http://www.consultant.ru> (дата обращения 05.04.2021)
20. Приказ Министерства природных ресурсов РФ № 536 от 04.12.2014 «Об утверждении Критериев отнесения отходов к I-V классам опасности по степени негативного

- воздействия на окружающую среду» [Электронный ресурс] // ИПП Гарант.ру. – Режим доступа: <http://base.garant.ru> (дата обращения 05.04.2021)
21. В.А. Кныш, Ф.Д. Ларичкин, М.А. Невская, С.В. Федосеев и др. Рациональное использование вторичных минеральных ресурсов в условиях экологизации и внедрения наилучших доступных технологий: монография. – Апатиты : Издательство ФИЦ КНЦ РАН, 2019. – 252 с
 22. Бобович Б.Б. Переработка промышленных отходов: Учебник для вузов. – М.: «СП Интермет Инжиниринг», 1999. – 445 с
 23. Ершов В.В. Основы горнопромышленной геологии: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1988. – 326 с
 24. Ершов В.В., Попова Г.Б., Новиков А.А. Основы геологии: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1986. – 310 с
 25. Кутепов Ю.И. Научно-методические основы инженерно-геологического обеспечения отвалообразования при разработке угольных месторождений // Диссертация на соискание ученой степени докт. техн. наук. – М.: МГГУ, 1999. – 351 с
 26. Гальперин А.М., Зайцев В.С., Кириченко Ю.В. Инженерно-геологическое и геотехническое обеспечение возведения, консервации и рекультивации гидроотвалов и хвостохранилищ (анализ 30-летнего опыта) // Геоэкология. – 2000. – № 4. – с. 307-315
 27. Гальперин А.М., Кириченко Ю.В., Фёрстер В., Шеф Х.-Ю. Геоэкологическое обоснование рекультивации намывных горнотехнических сооружений // Горный журнал. – 1988. – № 7. – с. 56-61
 28. Пашкевич М.А. Техногенные массивы и их воздействие на окружающую среду. – СПб.: СПГИ (ТУ), 2000. – 230 с
 29. Трубецкой К.Н., Уманец В.Н., Никитин М.Б. Классификация техногенных месторождений, основные категории и понятия. Горный журнал. – 1989. – № 12. – с. 27-29
 30. Техногенные грунты [Электронный ресурс] // Горная энциклопедия. – Режим доступа: <http://www.mining-enc.ru> (дата обращения 15.05.2021)
 31. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация [Электронный ресурс] // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс». – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru> (дата обращения 15.05.2021)
 32. Гальперин А.М., Кириченко Ю.В. Инженерно-геологическое обеспечение складирования городских отходов с применением горных технологий // В сборнике: Экологические проблемы горного производства, 1995. – с. 490-494
 33. Кириченко Ю.В., Кононенко А.Е. Рекультивация откосов отвальных массивов с использованием средств гидромеханизации // В сборнике: Гидромеханизация-98, 1999. – с. 193-196
 34. Гальперин А.М., Дьячков Ю.Н. Гидромеханизированные природоохранные технологии. – М.: Недра, 1993. – 252 с
 35. Нурок Г.А. Технология и проектирование гидромеханизации горных работ. – М.: Недра, 1965
 36. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Ермошкин В.В., Жариков В.П. Инженерно-геологическое и экологическое обоснование рекультивации гидроотвалов вскрышных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 2. – с. 141-148
 37. Нурок Г.А., Лутовинов А.Г., Шерстюков А.Д. Гидроотвалы на карьерах. – М.: Недра, 1977. – 311 с
 38. Нурок Г.А. Направление развития гидромеханизации горных разработок на карьерах // Тезисы докладов Всесоюзной научной конференции «Интенсификация открытых разработок месторождений полезных ископаемых», 1983. – с. 106-109
 39. Нурок Г.А. Процессы и технология гидромеханизации открытых горных работ. – М.: Недра, 1985. – 471 с

40. Антоненко Л.К., Зотеев В.Г., Коваленко А.И. и др. Основы проектирования, строительства и эксплуатации хвостохранилища большой вместимости // Горный журнал. – 1990. – № 11. – с. 43-46
41. Ялтанец И.М. Выбор параметров гидромеханизации на карьерах. – М.: Недра, 1980. – 165 с
42. Гальперин А.М. Управление состоянием намывных массивов на горных предприятиях. – М.: Недра, 1988. – 199 с
43. Антоненко Л.К., Зотеев В.Г. Проблемы безопасной эксплуатации хвостохранилищ и пути их решения // Горный журнал. – 1988. – № 1. – с. 65-67
44. Певзнер М.Е., Костовецкий В.П. Экология горного производства. – М.: Недра, 1990. – 230 с
45. А.М. Гальперин, В. Фёрстер, Х.Ю. Шеф. Техногенные массивы и охрана природных ресурсов: Том I. Насыпные и намывные массивы. – М.: МГГУ, 2006. – 391 с
46. В.И. Кибирев, Г.А. Райлян, Г.Т. Сазонов, Н.В. Тимофеев. Гидравлическое складирование хвостов обогащения: справочник. – М.: Недра, 1991. – 207 с
47. Резников Л.И., Богатырев В.П. Добыча угля на разрезах Кузбасса. – Кемерово: Кемеровское книжное издание, 1975. – 262 с
48. Белых В.И., Гальперин А.М., Кириченко Ю.В. Инженерно-геологический и геотехнический мониторинг намывных техногенных массивов // Геология и разведка. – 2000. – № 4. – с. 93-99
49. Мироненко В.А., Стрельский Ф.П. Практическое применение принципов гидрогеомеханики в целях повышения промышленной и экологической безопасности горных работ // Инженерная геология. – 1989. – № 5. – с. 3-14
50. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Основы гидрогеомеханики. – М.: Недра, 1974. – 296 с
51. Гальперин А.М. Геомеханика открытых горных работ: Учебник для вузов. – М.: Издательство МГГУ, 2003. – 473 с
52. Steven G. Vick. Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams. – Vancouver, Canada: BiTech Publishers Ltd, 1990. – 381 p. DOI: 10.14288/1.0394902
53. Зарецкий Ю.К. Теория консолидации грунтов. – М.: Наука, 1967. – 270 с
54. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А. Изучение порового давления в намывных массивах // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2006. – № 2. – с. 205-215
55. Ческидов В.В. Комплексное зондирование намывных отложений гидроотвала № 2 разреза «Кедровский» // Горная промышленность. – 2011. – № 6 (100). – с. 70-76
56. Fredlund D.G., Rahardjo H., Fredlund M.D. Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice. New-York: John Wiley & Sons, Inc, 2012. – 926 p. DOI: 10.1002/9781118280492
57. Eckert W.F., Masliyah J.H., Gray M.R., Fedorak P.M. Prediction of Sedimentation and Consolidation of Fine Tails // AIChE Journal. – 1996. – Vol. 42 (4). – pp. 960-972. DOI: 10.1002/aic.690420409
58. Galperin A.M., Moseikin V.V., Kutepov Yu.I., Derevyankin V.V. Assessment of State of Water-Saturated Mine Waste for the Justification of Engineering Structure Designs at Open Pit Mines // Eurasian Mining. – 2017. – № 1. – pp. 6-9. DOI: 10.17580/em.2017.01.02
59. Нурок Г.А., Марченко С.М., Медников Н.Н., Гальперин А.М. Эффективность гидравлического складирования полускальных пород на разрезах Кузбасса // В сборнике: Технология добычи угля открытым способом. – М.: ЦНИЭИуголь, 1974. – с. 39
60. Лутовинов А.Г. Намыв отвалов и земляных сооружений с учетом их рекультивации // В сборнике: Гидромеханизация и проблемы охраны окружающей среды. – М.: МГИ, 1981. – с. 106-109
61. Ю.Н. Малюшицкий, Т.Т. Фазалов, Ю.П. Степанов. Укладка сухих пород на старые гидроотвалы угольных разрезов // Уголь. – 1975. – № 5. – с. 50-51

62. Егорова И.В., Астапова В.А. Геоэкология. Геоэкологические аспекты рекультивации гидроотвалов и хвостохранилищ горных предприятий // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2013. – № 3. – с. 216-223
63. Кириченко Ю.В. Повышение емкости гидроотвалов разрезов Кузбасса // В сборнике: Гидромеханизация и проблемы охраны окружающей среды. – М.: МГИ, 1981. – с. 68-69
64. Кириченко Ю.В. Управление состоянием массивов гидроотвалов и использование их территорий // В сборнике: Добыча угля открытым способом. – М.: ЦНИЭИУголь, 1983. – № 6. – с. 16-18
65. Кириченко Ю.В., Макарова Т.В., Уваров М.П. Инженерно-геологическое обоснование новых технологий формирования дренажных элементов на гидроотвалах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2004. – № 5. – с. 217-220
66. Калашник Н.А. 4D-моделирование консолидации грунтов хвостохранилища АО «Ковдорский ГОК» // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2019. – Т. 11 (4). – с. 10-15. DOI: 10.25702/KSC.2307-5228.2019.11.4.10-15
67. Калашник А. И., Запорожец Д. В., Калашник Н. А. Идентификация фильтрационно-деформационных процессов в теле ограждающей дамбы хвостохранилища // Вестник Кольского научного центра РАН. – 2013. – № 2 (13). – с. 13-16
68. Гальперин А.М. Повышение устойчивости гидроотвалов угольных разрезов. – М.: ЦНИЭИУголь, 1973. – 25 с
69. Гальперин А.М. Обеспечение устойчивости дамб и повышение емкости хвостохранилищ песчано-гравийных карьеров // Научные труды МГИ. – 1975. – с. 188-190
70. Крячко О.Ю. Управление отвалами открытых горных работ. – М.: Недра, 1980. – 255 с
71. Панюков П.Н., Ржевский В.В., Истомина В.В., Гальперин А.М. Геомеханика отвальных работ на карьерах. – М.: Недра, 1972. – 184 с
72. Горлов В.Д. Рекультивация земель на карьерах. – М.: Недра, 1981. – 264 с
73. Гальперин А.М., Кириченко Ю.В., Кутепов Ю.И. Комплексный подход к экологически безопасному освоению техногенных массивов // Горная Промышленность. – 2011. – № 5 (99). – с. 22
74. Панов Б.С., Проскурня Ю.А. Модель самовозгорания породных отвалов угольных шахт Донбасса // Геология угольных месторождений: Межвузовский тематический научный сборник. – Екатеринбург: ДонНТУ, 2002, – с. 274-281
75. Потапов С.С., Максимович Н.Г., Паршина Н.В. Список минералов горелых отвалов Челябинского и Кизеловского угольных бассейнов // Минеральное сырье Урала. – 2006. – № 6 (10). – с. 43-52
76. Лапин А.А., Меркулова А.П., Посыльный В.Я. Причины самовозгорания породных отвалов в антрацитовых районах Восточного Донбасса // Тр. ШахтНИУИ. – 1963. – Т. III. – с. 86-105
77. Рылов В.Г., Гамов М.И., Вялов В.И., Наставкин А.В. Оценка пожароопасности шахтопластов по данным изучения склонности углей к самовозгоранию // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2012. – № 4. – с. 98-102
78. Брагина П.С., Цибарт А.С., Завадская М.П., Шарипова А.В. Почвы на отвалах вскрышных пород в лесостепной и горно-таежной зонах Кузбасса // Почвоведение. – 2014. – № 7. – с. 878
79. Солнцева Н.П., Никифорова Е.М. Влияние угледобычи на геохимию ландшафтов (на примере Подмосковского и Кизеловского бассейнов) // Доклады всесоюзной научной конференции «Охрана геологической среды от отрицательного воздействия предприятий горнодобывающего профиля». – М.: МГУ, 1984. – с. 54-59
80. John N. Carras, Stuart J. Day, Abou Saghafi, David J. Williams. Greenhouse gas emissions from low-temperature oxidation and spontaneous combustion at open-cut coal mines in Australia // International Journal of Coal Geology. – 2009. – vol. 78. – pp. 161-168

81. Гамов М.И., Гордеев И.В. Основные факторы и экологические последствия самовозгорания отвалов угольных шахт восточного Донбасса // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2017. – № 2 (194). – с. 92-100
82. M. Misz-Kennan, M. Fabiańska. Thermal transformation of organic matter in coal waste from Rymer Cones (Upper Silesian Coal Basin, Poland) // International Journal of Coal Geology. – 2010. – vol. 81. – pp. 343-358
83. R.V. Finkelman. Potential health impacts of burning coal beds and waste banks // International Journal of Coal Geology. – 2004. – vol. 59. – pp. 19-24
84. Осанлу М., Атаеи М. Факторы, влияющие на выбор площадки для размещения породных отвалов карьеров // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2003. – № 2. – с. 49-54
85. Еремин Г.М. Эффективные способы размещения отвалов на горных склонах в условиях Севера // Горный журнал. – 2001. – № 7. – с. 43-47
86. Noble T.L., Parbhakar-Fox A., Berry R.F., Lottermoser B. Mineral dust emissions at metalliferous mine sites // Environmental Indicators in Metal Mining. – Switzerland: Springer, 2017. – pp. 281-306. DOI: 10.1007/978-3-319-42731-7_16
87. Lilic N., Cvjetic A., Knezevic D., Milisavljevic V., Pantelic U. Dust and noise environmental impact assessment and control in Serbian mining practice // Minerals. – 2018. – Vol. 8. – p. 34
88. C. Cai, B. Xiong, Y. Zhang et al. Critical Comparison of Soil Pollution Indices for Assessing Contamination with Toxic Metals // Water, Air, and Soil Pollution. – 2015. – Vol. 226, Issue 10. – p. 352
89. D. Hocking, P. Kuchar, J.A. Plambeck, R.A. Smith. The Impact of Gold Smelter Emissions on Vegetation and Soils of a Sub-Arctic Forest-Tundra Transition Ecosystem // Journal of the Air Pollution Control Association. – 1978. – Vol. 28, Issue 2. – pp. 133-137
90. Макарова В.Н. Влияние отвалов металлургического производства на состояние атмосферного воздуха // Территория новых возможностей. Вестник Владивостокского государственного университета экономики и сервиса. – 2020. – № 1 (48). – с. 115-120
91. Крылов Д.А. Золошлаковые отвалы угольных ТЭС России // Энергия: экономика, техника, экология. – 2019. – № 9. – с. 42-54
92. Калашник Н.А. Компьютерное моделирование насыпной земляной плотины как прототип ограждающей дамбы хвостохранилища // Международный научно-исследовательский журнал. – 2012. – № 4. – с. 54-55
93. Буренкова В.В., Буренков П.М. Отечественный опыт оценки фильтрационной прочности несвязанных грунтов тела плотины и основания // Природообустройство. – 2020. – № 4. – с. 84-91
94. Саинов М.П., Чечеткин И.П. Оценка трещиностойкости ядра каменно-земляной плотины с учетом порового давления [Электронный ресурс] // Вестник Евразийской науки. – 2020. – № 4. – Режим доступа: <https://esj.today> (дата обращения 02.05.2021)
95. Калашник А.И., Калашник Н.А., Запорожец Д.В. Исследование состояния насыпного гидротехнического сооружения на моренном основании // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. – 2014. – № 6. – с. 93-98
96. Stanwick P.A., Stanwick S.D. The vale Brazilian dam collapse: an ethical and engineering disaster // American Journal of Sciences and Engineering Research. – 2019. – Vol. 2 (6). – pp. 6-11
97. Van Niekerk, H.J., Viljoen, M.J. Causes and consequences of the merriespruit and other tailings-dam failures // Land Degradation and Development. – 2005. – Vol. 16 (2). – pp. 201-212. DOI: 10.1002/ldr.681
98. Wei, Z., Yin, G., Wang et al. Design, construction and management of tailings storage facilities for surface disposal in China: Case studies of failures // Waste Management and Research. – 2013. – Vol. 31 (1). – pp. 106-112. DOI: 10.1177/0734242X12462281

99. Kossoff D., Dubbin W.E., Alfredsson M., Edwards S.J., Macklin M.G., Hudson-Edwards K.A. Mine tailing dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation // *Applied Geochemistry*. – 2014. – Vol. 51. – pp. 229-245. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2014.09.010
100. De Almeida I.M., Filho J.M.J., De Gouveia Vilela R.A. Reasons for investigating the organizational dynamics of the Vale tailings dam disaster in Brumadinho, Minas Gerais state, Brazil // *Cadernos de Saude Publica*. – 2019. – Vol. 35 (42019), ee00027319. DOI: 10.1590/0102-311X00027319
101. Salvador G.N., Leal C.G., Brejão G.L. et al. Mining activity in Brazil and negligence in action // *Perspectives in Ecology and Conservation*. – 2020. – Vol. 18 (2). – pp. 139-144. DOI: 10.1016/j.pecon.2020.05.003
102. Silva Rotta L.H., Alcântara E., Park E. et al. The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2020. – Vol. 90, 102119. DOI: 10.1016/j.jag.2020.102119
103. Thompson, F., de Oliveira, B.C., Cordeiro, M.C. et al. Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River // *Science of the Total Environment*. – 2020. – Vol. 705, art. no. 135914. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135914
104. De Carvalho D.W. The Brumadinho dam rupture disaster, Brazil 2019: analysis of the narratives about a disaster from the perspective of disaster law // *Revista de Estudos Constitucionais, Hermeneutica e Teoria do Direito*. – 2020. – Vol. 12, Issue 2. – pp. 227-238. DOI: 10.4013/rechtd.2020.122.04
105. Cambridge, M., Shaw, D. Preliminary reflections on the failure of the Brumadinho tailings dam in January 2019 // *Dams and Reservoirs*. – 2019. – Vol. 29 (3). – pp. 113-123. DOI: 10.1680/jdare.19.00004
106. Porsani, J.L., de Jesus, F.A.N., Stangari, M.C. GPR survey on an iron mining area after the collapse of the tailings Dam I at the Córrego do Feijão mine in Brumadinho-MG, Brazil // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11 (7), art. no. 860. DOI: 10.3390/RS11070860
107. Deqiang Cheng, Yifei Cui, Zhenhong Li, Javed Iqbal. Watch Out for the Tailings Pond, a Sharp Edge Hanging over Our Heads: Lessons Learned and Perceptions from the Brumadinho Tailings Dam Failure Disaster // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13 (9), art. no 1775. DOI: 10.3390/rs13091775
108. Two years after Brumadinho disaster, safety concerns persist at Vale [Электронный ресурс] // Официальный сайт Industrial Union. – Режим доступа: <http://www.industrial-union.org> (дата обращения 01.06.2021)
109. De Carvalho D.W. The ore tailings dam rupture disaster in Mariana, Brazil 2015: what we have to learn from anthropogenic disasters // *Natural Resources Journal*. – 2019. – Vol. 59 (2). – pp. 281-300
110. Segura F.R., Nunes E.A., Paniz F.P. et al. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil) // *Environmental Pollution*. – 2016. – Vol. 218. – pp. 813-825. DOI: 10.1016/j.envpol.2016.08.005
111. H. Agurto-Detzel, M. Bianchi, M. Assumpção et al. The tailings dam failure of 5 November 2015 in SE Brazil and its preceding seismic sequence // *Geophysical Research Letters*. – 2016. – Vol. 43 (10). – pp. 4929-4936. DOI: 10.1002/2016GL069257
112. Hatje V., Pedreira R.M.A., De Rezende C.E. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7 (1), 10706. DOI: 10.1038/s41598-017-11143-x
113. Miranda L.S., Marques A.C. Hidden impacts of the Samarco mining waste dam collapse to Brazilian marine fauna – An example from the staurozoans (Cnidaria) // *Biota Neotropica*. – 2016. – Vol. 16 (2), e20160169. DOI: 10.1590/1676-0611-BN-2016-0169
114. Burritt R.L., Christ K.L. Water risk in mining: Analysis of the Samarco dam failure // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – Vol. 178. – pp. 196-205. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.042

115. Manhart A., Vogt R., Priester M. et al. The environmental criticality of primary raw materials – A new methodology to assess global environmental hazard potentials of minerals and metals from mining // *Mineral economics*. – 2019. – Vol. 32 (1). – pp. 91-107. DOI: 0.1007/s13563-018-0160-0
116. Gelencsér, A., Kováts, N., Turóczy, B. The red mud accident in Ajka (Hungary): Characterization and potential health effects of fugitive dust // *Environmental Science and Technology*. – 2011. – Vol. 45 (4). – pp. 1608-1615. DOI: 10.1021/es104005r
117. Ruyters, S., Mertens, J., Vassilieva, E. The red mud accident in Ajka (Hungary): Plant toxicity and trace metal bioavailability in red mud contaminated soil // *Environmental Science and Technology*. – 2011. – Vol. 45 (4). – pp. 1616-1622. DOI: 10.1021/es104000m
118. Marsi, I., Selmeczi, I., Koloszar, L. Geologic mapping and environmental analyses in the vicinity of the damaged red sludge reservoir at Kolontár // *Central European Geology*. – 2012. – Vol. 55 (3). – pp. 307-328. DOI: 10.1556/CEuGeol.55.2012.3.5
119. Owen, J.R., Kemp, D., Lèbre, É. et al. Catastrophic tailings dam failures and disaster risk disclosure // *International Journal of Disaster Risk Reduction*. – 2020. – Vol. 42, 101361. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2019.101361
120. Winkler, D., Bidló, A., Bolodár-Varga, B. et al. Long-term ecological effects of the red mud disaster in Hungary: Regeneration of red mud flooded areas in a contaminated industrial region // *Science of the Total Environment*. – 2018. – Vol. 644. – pp. 1292-1303. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.059
121. Mecs, J. Some technical aspects of the tailing dam failure at the Ajka red mud reservoirs // 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics, ICSMGE 2013. – Vol. 4. – pp. 3309-3312
122. The Ajka tailings dam failure, 2010 [Электронный ресурс] // Официальный сайт the Stava 1985 Foundation. – Режим доступа: <https://www.stava1985.it> (дата обращения 11.04.2021)
123. Glotov V.E., Chlachula J., Glotova L.P., Little E. Causes and environmental impact of the gold-tailings dam failure at Karamken, the Russian Far East // *Engineering Geology*. – 2018. Vol. 245. – pp. 236-247. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.08.012
124. Кириченко Ю.В. Инженерно-геологическое обеспечение экологической безопасности формирования техногенных массивов // Диссертация на соискание ученой степени докт. техн. наук. – М.: МГИ, 2001. – 383 с
125. Саркисян А.А. Обоснование методов и технических средств геолого-маркшейдерского мониторинга гидроотвалов // Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – М.: МГИ, 1998. – 169 с
126. Липский И.В. Разработка гидромеханизированных природоохранных технологий для горнотехнической и строительной практики // Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – М.: МГИ, 2000. – 177 с
127. Васильева А.Д. Инженерно-геологическое обоснование устойчивости высоких отвалов угольных месторождений Кузбасса // Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – СПб.: СПГУ, 2019. – 186 с
128. Lin, Y.N., Park, E., Wang, Y. et al. The 2020 Hpakant Jade Mine Disaster, Myanmar: A multi-sensor investigation for slope failure // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 177. – pp. 291-305. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.05.015
129. Chronology of major tailings dam failures [Электронный ресурс] // WISE Uranium Project. – Режим доступа: <http://www.wise-uranium.org> (дата обращения 18.08.2021)
130. Castro, G., Troncoso, J. Effects of 1985 Chilean earthquake on three tailing dams // *Proceedings of the Fifth Chilean Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, 1989
131. Castro, G., Poulos, S.J. Factors affecting liquefaction and cyclic mobility // *ASCE J Geotech Eng Div*. – 1977. – Vol. 103 (6). – pp. 501-516
132. Ishihara, K. Post-earthquake failure of a tailings dam due to liquefaction of the pond deposit // *Proc., Inter. Conf. On Case Histories in Geotechnical Engineering*, 1984

133. Vargas, C.O. Analysis and seismic design of tailings dams and liquefaction assessment // *Advances in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2019. – Vol. 7. – pp. 392-416
134. Gordon W.W. The new expertise required for designing safe tailings storage facilities // *Soils and Rocks*. – 2021. – Vol. 44 (3), e2021067521. DOI: 10.28927/SR.2021.067521
135. Wilson, G.W., Wickland, B., & Weeks, B. Designing tailings and waste rock systems for chemical and physical stability // *Proceedings of the 9th Australian Acid and Metalliferous Drainage (AMD) Workshop, Burnie, Tasmania, 2017*
136. Petkovšek, G., Hassan, M.A.A.M., Lumbroso, D., Roca Collell, M. A Two-Fluid Simulation of Tailings Dam Breaching // *Mine Water and the Environment*. – 2021. – Vol. 40 (1). – pp. 151-165. DOI: 10.1007/s10230-020-00717-3
137. На пути к более безопасной переработке отходов рудного сырья [Электронный ресурс] // Официальный сайт Metso:Outotec. – Режим доступа: <https://www.mogroup.com/ru> (дата обращения 18.02.2022)
138. Shields, D. Innovations in Tailings Disposal // *1st Symp. on Mine and Preparation Plant Refuse Disposal, Nat. Coal Assn., 1974*. – pp. 86-90
139. Robinsky, E. Tailings Disposal by the Thickened Discharge Method for Improved Economy and Environmental Control // *Proc. 2nd Int. Tailing Symp.* – San Francisco, 1979. – pp. 75-95
140. Баранов В.Ф. Системы сгущения и складирования отвальных хвостов (обзор мировой практики) // *Обогащение руд*. – 2009. – № 3. – с. 43-48
141. Watson, A.H., Corser, P.G., Garces Pardo et al. A comparison of alternative tailings disposal methods – the promises and realities // *Mine Waste 2010: Proceedings of the First International Seminar on the Reduction of Risk in the Management of Tailings and Mine Waste, Australian Centre for Geomechanics, Perth*. – 2010. – pp. 499-514
142. J. Rayo, R. Fuentes, R. Orellana. Large tailings disposal – conventional versus paste // *Proc. of the 12th Intern. Seminar on Past and Thickened Tailings «Past 2009», Vina del Mar, Chile*. – Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2009. – pp. 271-281
143. C. Aldea, B. Cornelius. Paste backfill mix // *International Mining*. – 2010. – pp. 79-80
144. Boger, D., Scales, P. and Sofrá, F. Rheological Concepts, Paste and Thickened Tailings – A Guide. – Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2006. – pp. 25-37
145. Виноградский Э.Б. Техничко-экономическое обоснование сгущения хвостовых пульп в горнорудной промышленности // *Обогащение руд*. – 2010. – № 6. – с. 39-43
146. W. Lugão, M. Almeida, A. Guimarães, F et al. Dry Stacking of Cycloned Tailings // *Belo Horizonte, Brazil*. – 17-20 June 2013
147. Актуальность внедрения пастового сгущения на обогатительных предприятиях России и СНГ. Интервью с И.Г. Корнеевым, генеральным директором ЗАО «Тране Текникк» [Электронный ресурс] // *Горная промышленность*. – Режим доступа: <https://mining-media.ru> (дата обращения 15.01.2022)
148. Комплекс пастового сгущения хвостов Metso Outotec на Учалинском ГОКе снизил техногенную нагрузку на окружающую среду [Электронный ресурс] // Официальный сайт Metso:Outotec. – Режим доступа: <https://www.mogroup.com/ru> (дата обращения 15.01.2022)
149. Рекультивация карьера и переработка хвостов. Учалинский ГОК объединил два направления в один новый проект [Электронный ресурс] // *Корпоративный журнал УГМК № 13, 2017*. – Режим доступа: <https://www.ugmk.com> (дата обращения 15.01.2022)
150. M. Davies. Filtered Dry Stacked Tailings – The Fundamentals [Электронный ресурс] // *Proceedings Tailings and Mine Waste, Vancouver, BC, 2011*. – Режим доступа: <https://www.researchgate.net> (дата обращения 15.01.2022)
151. Lupo, J., & Scharnhorst. Tailings Disposal and Management. In R. // *SME Mineral Processing & Extractive Metallurgy Handbook Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME)*. – 2019. – pp. 1115–1131

152. Davies, M.P., Rice, S. An alternative to conventional tailings management «Dry stack» filtered tailings // Proc. 8th International Conference on Tailings and Mine Wastes 01, Fort Collins, CO, USA. – 2001. – pp. 411-420
153. Bussie`re, B. Colloquium 2004: hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches // Can. Geotech. J. 44 (9). – 2007. – pp. 1019-1052
154. Stewart, T., Atkins, L. Engineering Properties of Combined Coarse and Fine Coal Waste. – U.S. Bureau of Mines, RI 8623, 1982
155. Frankfort, J. A Milling Process Providing Flexibility to Tailings Disposal Methods // Symp. on Uranium Mill Tailings Management, Colorado State University. – 1978. – Vol. 1. – pp. 21-29
156. Von Michaelis, H. Belt Filtration for the Uranium Industry // Proc. 2nd Symp. on Uranium Mill Tailings Management, Colorado State University. – 1979. – pp. 95-115
157. Федеральный закон № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [Электронный ресурс] // ИПП Гарант.ру. – Режим доступа: <http://ivo.garant.ru> (дата обращения 07.08.2021)
158. Федеральный закон № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» [Электронный ресурс] // ИПП Гарант.ру. – Режим доступа: <http://base.garant.ru> (дата обращения 07.08.2021)
159. Федеральный закон № 174-ФЗ «Об экологической экспертизе» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. – Режим доступа: <http://www.consultant.ru> (дата обращения 07.08.2021)
160. ПБ 06-123-96 «Правила безопасности при эксплуатации хвостовых, шламовых и гидроотвальных хозяйств» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. – Режим доступа: <http://www.consultant.ru> (дата обращения 07.08.2021)
161. Бондарик Г.К Ярг Л.А. Природно-технические системы и их мониторинг // Инженерная геология. – 1990. – № 5. – с. 3-9
162. Геолого-маркшейдерское обеспечение мониторинга состояния устойчивости карьерных откосов // Инновационные технологии сбора и обработки геопространственных данных для управления природными ресурсами: материалы международной конференции, 18-19 сентября 2012 г. – Алматы, 2012. – с. 18-23
163. Израэль Ю.А Глобальная система наблюдений. Прогноз и оценка окружающей природной среды. Основы мониторинга // Метеорология и гидрология. – 1974. – № 7. – с. 3-8
164. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. – Л.: Гидрометеиздат. – 1984. – 560 с
165. ГОСТ Р 22.1.02-95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование. Термины и определения [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов «Консорциум кодекс». – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru> (дата обращения 07.08.2021)
166. Трофимов В.Т. О мониторинге геологических, литотехнических и эколого-геологических систем // Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем: Труды Междунар. конф., 24-25 мая 2007 г., г. Москва, геологический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова. – М.: Изд-во МГУ, 2007. – с. 7-13
167. Владимиров В.А., Воробьев В.Л., Осипов В.И. Природные опасности России. Природные опасности и общество. Тематический том. – М.: КРУК, 2002. – 248 с
168. Постоев Г.П. О мониторинге для целей снижения риска чрезвычайной ситуации на объектах размещения магистральных трубопроводов на оползневых (оползнеопасных) склонах // Оценка и управление природными рисками: материалы Общерос. конф. «Риск – 2000». – М.: Анкил, 2000. – с. 429-432
169. Осипов В.И. Природные опасности: мониторинг и оповещение // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2013. – № 3. – с. 209-215

170. П.С. Шпаков, А.Г. Урузбиева, А.И. Маневич. Инженерно-геологический и геоэкологический мониторинг состояния сложных объектов горнодобывающего комплекса // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 8. – с. 406-413
171. Ческидов В.В., Маневич А.И. Инженерно-геологическое обеспечение мониторинга устойчивости оползневых склонов в условиях транспортного строительства // Горные науки и технологии. – 2016. – № 1. – с. 51–59. DOI:10.17073/2500-0632-2016-1-51-57
172. Гальперин А.М., Ческидов В.В., Бородин Ю.В. и др. Прогноз и контроль нестационарных геомеханических процессов в горнотехнической и строительной практике // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2014. – № 6. – с. 553-559
173. Простов С.М. Методическое обеспечение комплексного мониторинга физического состояния и прогноза устойчивости откосных сооружений угольных разрезов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – № 6 (100). – с. 5-9
174. Гальперин А.М., Кутепов Ю.И., Круподеров В.С. и др. Мониторинг и освоение техногенных массивов на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 12. – с. 131-142
175. Гальперин А.М., Пуневский С.А., Бородин Ю.В. и др. Развитие технических средств и способов гидрогеомеханического мониторинга отвальных сооружений // Маркшейдерия и недропользование. – 2015. – № 3 (77). – с. 22-30
176. Гальперин А.М., Зуй В.Н., Пелагеин И.В. Удаленный контроль устойчивости дамб хвостохранилищ и гидроотвалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – ОВ 1. – с. 403-410
177. Сычкова Ю.В., Санникова А.П. Маркшейдерский мониторинг открытой разработки месторождений полезных ископаемых // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: сборник статей по материалам XVII междунар. студ. науч.-практ. конф. № 2 (17)
178. Ожигина С.Б., Урдубаев Р.А., Ожигин Д.С. и др. Мониторинг состояния бортов глубоких карьеров АО «ССГПО» // Интерэкспо ГеоСибирь. – 2015. – т. 1. – № 2. – с. 210-215
179. Оглоблин Д.Н., Рейзенкинд И.Я. Первый опыт аэрофотосъемки карьеров // Горный журнал. – 1969. – № 2. – с. 73-76
180. Рейзенкинд И.Н. Новые способы маркшейдерских съемок карьеров. – М.: Госгортехиздат, 1963. – 324 с
181. Лобанов А.Н. Аналитическая фототриангуляция с применением электронно-цифровой вычислительной машины. – М., Недра, 1975. – 292 с
182. М.Г. Мустафин, А.П. Санникова. Оценка устойчивости борта карьера с учетом данных цифровой фотосъемки поверхностей обнажения // Записки Горного института. – 2012. – Т. 199. – с. 276-280
183. Гальперин А.М., Мосейкин В.В., Пуневский С.А., Семенова Е.А. Проблемы геомеханики и инженерной геологии в техногенных массивах // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2018. – № 1. – с. 5-13. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-1-1-5-13
184. *Kurenkov D.S.* Experience of Engineering-Geological Monitoring Systems Use on Mining Enterprises // Scientific Reports on Resource Issues: Conference proceedings, Freiberg, 2017. – vol. 1. – pp. 19-22
185. Огильви А.А. Основы инженерной геофизики. Учебник. – М., Недра, 1990. – 501 с
186. Bell F.G. Engineering Geology 2nd edition. – Elsevier Ltd., 2007. – 593 p
187. Аксенова Г.Я. Минерало- и структурообразование при обжиге окатышей из руды месторождения Костомукша: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук. – М.: Ленинград, 1984
188. От Костомукши до Корпанги [Электронный ресурс] // Глобус геология и бизнес. – Режим

- доступа: <https://www.vnedra.ru> (дата обращения 27.04.2022)
189. Развитие сооружений хвостового хозяйства УПКиО АО «Карельский окатыш» на период 2018-2043 гг [Электронный ресурс] // Проектная документация АО «Механобринжиниринг». – Режим доступа: <https://www.kostomuksha-city.ru> (дата обращения 18.11.2021 г.)
 190. Государственный стандарт Союза ССР: ГОСТ 16350-80. Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов «Консорциум кодекс». – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru> (дата обращения 15.02.2023)
 191. Климат и средняя погода круглый год в г. Костомукша [Электронный ресурс] // Weather Spark. – Режим доступа: <https://ru.weatherspark.com> (дата обращения 15.02.2023)
 192. Свод правил: СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов «Консорциум кодекс». – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru> (дата обращения 15.02.2023)
 193. Горьковец В.Я., Максимович Л.А., Раевская М.Б. Костомукша – крупнейший комплексный рудный объект республики Карелия // Институт Геологии КарНЦ, – 2011. – с. 188-196
 194. В.Я. Горьковец, М.Б. Раевская, О.И. Володичев и др. Геология и метаморфизм железисто-кремнистых формаций Карелии. – Л.: Наука, 1991. – 171 с
 195. Горьковец В.Я, Раевская М.Б., Белоусов Е.Ф., Инина К.А. Геология и металлогения района Костомукшского железорудного месторождения. – Петрозаводск: КФ АН СССР, 1981 г. – 143 с
 196. Журавлева Ф.М., Малышева Т.Я. Окатыши из концентратов железистых кварцитов. – М.: Металлургия, 1991. – 127 с
 197. С.В. Петров, Т. А. Головина. Минералогия и геохимия благородных металлов во вмещающих породах и рудах Костомукшского месторождения железистых кварцитов (Карелия) // Вестник ВГУ, серия: Геология. – 2006. – № 2. – с. 149-158
 198. Малышева Т.Я., Долицкая О.А. Петрография и минералогия железорудного сырья: Учебное пособие для вузов. – М.: МИСиС, 2004. – 423 с
 199. Л.И. Леонтьев, Ю.С. Юсфин, Т.Я. Малышева и др. Сырьевая и топливная база черной металлургии: Учебное пособие для вузов. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 304 с
 200. Пантелеева Н.Ф., Думов А.М. Магнитные методы обогащения полезных ископаемых: Курс лекций. – М.: МИСиС, 2009. – 105 с
 201. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов «Консорциум кодекс». – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru> (дата обращения 15.02.2023)
 202. Кириченко Ю.В., Щёкина М.В., Сенченко Д.С., Ческидов В.В. Лабораторный практикум по дисциплине «Науки о Земле» для студентов специальности «Инженерная защита окружающей среды». – Часть 2. – М.: МГГУ, 2011. – 49 с
 203. ГОСТ 22733-2016. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов «Консорциум кодекс». – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru> (дата обращения 18.07.2022)
 204. ГОСТ 25584-2016. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов «Консорциум кодекс». – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru> (дата обращения 18.07.2022)
 205. Чаповский Е.Г. Лабораторные работы по грунтоведению и механике грунтов. Изд. 4-е. – М.: Недра, 1975. – 304 с

206. Lupo, J., Hall, J. Dry stack tailings – Design considerations. Tailings and Mine Waste'10 // Proceedings of the 14th International Conference on Tailings and Mine Waste, 2011. – pp. 327-334
207. Ma, C., Zhang, C., Chen, Q., Pan, Z., Ma, L. On the effect of void ratio and particle breakage on saturated hydraulic conductivity of tailing materials // Geomechanics and Engineering. – 2021. – 25 (2). – pp. 159-171
208. Newman, P., R. White, et al. Paste – The Future of Tailings Disposal? // International Conference on Mining and the Environment, Skelleftea, Sweden, 2001. – pp. 594-603
209. Ю.В. Кириченко, В.В. Ческидов, С.А. Пуневский. Геомеханика: инженерно-геологическое обеспечение управления состоянием массивов горных пород: учеб. пособие. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2017. – 90 с
210. Рекомендации по проектированию хвостовых хозяйств предприятий металлургической промышленности. – М.: Стройиздат, 1975. – 176 с
211. Годлевская Г.И., Кутепов Ю.И., Норватов Ю.А. Определение в натуральных условиях показателей фильтрационной консолидации пород гидроотвалов. – М.: Инженерная геология. – 1985. – № 2. – с. 109-114
212. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. – М.: Недра, 1965. – 378 с
213. Рекомендации по инженерно-геологическому обоснованию параметров отвалов сухих пород, отсыпаемых на гидроотвалах. – Л.: ВНИМИ, 1985. – 82 с.
214. Н.А. Цытович, Ю.К. Зарецкий, М.В. Малышев и др. Прогноз скоростей осадков оснований сооружений. – М.: Стройиздат, 1967. – 330 с
215. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: Высшая школа, 1979. – 272 с
216. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии. – М.: Высшая школа, 1968. – 629 с
217. Флорин В.А. Основы механики грунтов. ч. 1, Н. – М.: Гостройиздат, 1961. – 356 с
218. С.А. Coulomb. Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problèmes de statique relatifs a l'architecture // Geotechnique. – 1776. – Vol. 17. – pp. 11-26
219. W. Fellenius. Calculations of the Stability of Earth Dams // Proceedings of the Second Congress of Large Dams. – 1936. – Vol. 4. – pp. 445-463
220. A.W. Bishop. The use of slip circles in stability analysis of slopes // Geotechnique. – 1955. – № 1 (5). – pp. 7-17
221. Stability analysis of Slopes with Dimensionless Parameters // Thesis for the Doctor of Science in the Field of Civil Engineering, Harvard University Soil Mechanics Series, 1954. – 87 p
222. N.R. Morgenstern, V.E. Price. The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces // Geotechnique. – 1965. – № 1 (15). – pp. 79-93
223. S.K. Sarma. Stability Analysis of Embankment and Slopes // Geotechnique. – 1973. – Vol. 23 (3). – pp. 423-433
224. E.A. Spencer. Method of analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces // Geotechnique. – 1967. – № 1 (17). – pp. 11-26
225. Р.Р. Чугаев. Расчёт устойчивости земляных откосов и бетонных плотин на нескальном основании по методу круглоцилиндрических поверхностей обрушения. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 144 с
226. Г.Л. Фисенко. Прочностные характеристики массива горных пород // В сборнике: Механика горных пород и маркшейдерское дело. – М.: Углетехиздат, 1959. – с. 91-100
227. В.Н. Зверинский, Л.К. Либерман. Определение параметров однородных и многослойных откосов // В книге: Устойчивость откосов на карьерах. – Белгород-Орджоникидзе, 1974. – с. 93-96
228. А.Б. Фадеев. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с
229. Е.В. Федоренко. Метод расчета устойчивости путем снижения прочностных характеристик // Транспорт РФ. – 2013. – № 6. – с. 24-26
230. Панюков П.Н. Инженерная геология. – М.: Недра, 1978. – 296 с

231. Попов В.Н., Байков Б.Н. Технология отстройки бортов карьеров. – М.: Недра, 1991. – 252 с
232. С.П. Бахаева, Д.В. Гурьев. Прогноз параметров дамбы на основе моделирования напряженно-деформированного состояния откоса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – № 1 (113). – с. 12-17
233. Жабко, А.В. О проблемах и современных методах оценки устойчивости откосов на открытых горных работах // Проблемы недропользования. – 2018. – № 3 (18). – с. 96-107
234. Жариков, В.П. Инженерно-геологическое и гидрогеологическое обоснование эксплуатации и рекультивации гидроотвалов вскрышных пород Центрального Кузбасса // Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – М.: МГГУ, 2005. – 186 с
235. Ю.А. Кашников, С.Г. Ашихмин, Д.В. Шустов. Управление процессом сдвижения горных пород при подработке борта карьера // Маркшейдерский вестник. – 2009. – № 6 (74). – с. 47-53
236. Сергина Е.В. Комплексный мониторинг состояния природно-технических систем открытой разработки угольных месторождений // Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук: – СПб.: СПГУ, 2015. – 165 с
237. Ческидов В.В. Инженерно-геологическое исследование пород основания ограждающих дамб хвостохранилища Стойленского ГОКа для повышения точности определения текущего коэффициента запаса устойчивости // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – с. 351-360
238. Ческидов, В.В. Гидрогеомеханический мониторинг состояния откосных сооружений // Горная промышленность. – 2017. – № 4 (134). – с. 78-80
239. Мальнева И.В. Оценка интенсивности выветривания как важнейшего фактора развития экзогенных геологических процессов на участках предполагаемого размещения строительных объектов (на примере Северного Кавказа) // В сборнике: Сергеевские чтения. – М.: РУДН, 2012. – с. 45-49
240. Куренков Д.С. Оценка временной изменчивости свойств горных пород // Исследования по геоинформатике: труды Геофизического центра РАН. – 2017. – Vol. 5. – № 2. – с. 54-60. DOI: 10.2205/2017BS045
241. Терцаги К. Теория механики грунтов. – М.: Госстройиздат, 1961. – 507 с
242. Дашко Р.Э., Каган А.А. Механика грунтов в инженерно-геологической практике. – М.: Недра, 1977. – 237 с
243. Дашко Р.Э. К проблеме фильтрационной консолидации: структура и свойства воды в глинистых грунтах // Грунтоведение. – 2013. – т. 2. – № 3. – с. 36-47
244. Дашко Р.Э. Исследования и анализ процесса консолидации водонасыщенных глинистых грунтов // Грунтоведение. – 2014. – т. 1. – № 4. – с. 30-53
245. Федоров Г.Б., Дудченко О.Л., Куренков Д.С. Разработка виброакустического модуля для тонкой очистки буровых растворов // Записки Горного института. – 2018. – т. 234. – с. 647-651. DOI: 10.31897/PMI.2018.6.647
246. Fedorov G.B., Dudchenko O.L., Kurenkov D.S. Vibroacoustic module for waste-water treatment of mining enterprises // Scientific Reports on Resource Issues: Conference Proceedings, Freiberg, 2018. – Vol. 1. – pp. 339-344
247. Kurenkov D.S., Fedorov G.B., Dudchenko O.L. Use of Vibroacoustics in Fine Cleaning of Drilling Fluids // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: Scientific Conference Abstracts, Saint-Petersburg, 2019. – p. 294
248. Агафонов Ю.Г., Дудченко О.Л., Федоров Г.Б. Инфразвуковая техника и технология – инновационное направление в интенсификации процессов горного производства // Науковий вісник національного гірничого університету. – 2014. – № 2. – с. 99-104
249. Agafonov J.G., Dudchenko O.L., Fedorov G.B. Infrasonics for intensification of mining practices // Scientific Reports on Resource Issues: Innovations in Mineral Resource Value

- Chains: Geology, Mining, Processing, Economics, Safety, and Environmental Management, Freiberg, 2014. – Vol. 1. – pp. 176-183
250. Drebenstedt C., Agafonov J.G., Fedorov G.B. Research and development of waste waters vibroacoustic purification methods for mining enterprises // Proc. IMWA: Mining Meets Water – Conflicts and Solutions, 2016. – pp. 859-866
251. Dudchenko O.L., Fedorov G.B., Andreev A.A. Innovative method for the classification of coal slurries // Ugol'. – 2018. – № 6. – pp. 67-71. DOI: 10.18796/0041-5790-2018-6-67-71
252. Dudchenko O.L., Fedorov G.B. Vibroacoustic technique for intensification of coal preparation // Ugol'. – 2019. – № 4. – pp. 62-66. DOI: 10.18796/0041-5790-2019-4-62-66
253. Ivanov M.V., Ksenofontov B.S. Intensification of flotation treatment by exposure to vibration // Water Science and Technology. – 2014. – Vol. 69 (7). – pp. 1434-1439. DOI: 10.2166/wst.2014.046
254. Дудченко О.Л., Федоров Г.Б. О резонансном режиме виброакустического фильтрования промышленных вод горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 7. – с. 178-180
255. Rimsky-Korsakov A.V. Infrasound equipment and technology – a new direction of intensification of liquid-phase processes // Vestnik of Academy of Sciences of the USSR, Moscow, 1980. – №. 7. – pp. 11–18
256. A. Chakravorty. Process intensification by pulsation and vibration in miscible and immiscible two component systems Author links open overlay panel // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. – 2018. – Vol. 133. – pp. 90-105. DOI: 10.1016/j.cep.2018.09.017
257. G.J. Jameson, J.F. Davidson. The motion of a bubble in a vertically oscillating liquid: theory for an inviscid liquid, and experimental results // Chemical Engineering Science. – 1966. – Vol. 21 (1). – pp. 29-34. DOI: doi.org/10.1016/0009-2509(66)80004-0
258. Ямщиков В.С., Заховаев М.Т., Рехтман В.И., Федоров Г.Б. Способ классификации тонкоизмельченного продукта // Авторское свидетельство SU 1118409 A1, 15.10.1984
259. Shkundin S.Z. Woolsey J.R. Self-purification acoustic screen filter systems for mine waste water // Environmental Issues and Management of waste in Energy and Mineral Production, Balkems, Rotterdam, 2000. – pp. 361-367
260. Ямщиков В.С., Бут А.Б., Заховаев М.Т. и др. Фильтр для очистки жидкости // Авторское свидетельство SU 774570 A1, 30.10.1980
261. Ямщиков В.С., Черкашин Н.В., Федоров Г.Б. и др. Способ промывки и классификации полезных ископаемых и устройство для его осуществления // Авторское свидетельство SU 1459712 A1, 23.02.1989
262. Куренков Д.С. Инженерно-геологическое обоснование технологии глубокого обезвоживания отходов обогащения железных руд // Горная промышленность. – 2023. – № 1. – с. 57-62. DOI: 10.30686/1609-9192-2023-1-57-62
263. Condon P. Dry stack tailings disposal at the Greens Creek Mine, Admiralty Island, Alaska [Электронный ресурс] // Proceedings of the 19th Mend ML/ARD Workshop, Vancouver, BC, Canada, November 28-29, 2012. – Режим доступа: <https://bc-mlard.ca> (дата обращения 27.02.2022),
264. Condon P., Lear K. Geochemical and geotechnical characterization of filter pressed tailings at the Greens Creek Mine, Admiralty Island, Alaska // Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage, St. Louis, MO, USA, March 26-30, 2006
265. Neuffer D., Scott C. Dry Stack Tailings in Cold Regions: Opportunities and Constraints [Электронный ресурс] // SRK Europe. – Режим доступа: <https://www.srk.com> (дата обращения 27.02.2022)
266. Mine Environment Neutral Drainage (MEND) Program [Электронный ресурс] // Study of tailings management technologies (MEND Report 2.50.1), 2017. – Режим доступа: <http://mend-nedem.org> (дата обращения 27.02.2022)

267. ГОСТ Р 22.0.03-2020. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Природные чрезвычайные ситуации. Термины и определения [Электронный ресурс] // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс». – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru> (дата обращения 13.06.2021)
268. Федеральный закон № 294-ФЗ «О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля». [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. – Режим доступа: <https://consultant.ru> (дата обращения 08.08.2022)
269. Приказ МПР РФ от 21.05.2001 № 433 «Об утверждении Положения о порядке осуществления государственного мониторинга состояния недр Российской Федерации» [Электронный ресурс] // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс». – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru> (дата обращения 08.08.2022)
270. Федеральный закон № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. – Режим доступа: <https://consultant.ru> (дата обращения 08.08.2022)
271. Ломтадзе В.Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика. – Л.: Недра, 1977. – 480 с
272. Иванов И.П., Тржцинский Ю.Б. Инженерная геодинамика: Учебник. – СПб: Наука, 2001. – 416 с
273. Осипов В.И. Опасные экзогенные процессы. – М.: ГЕОС, 1999. – 290 с
274. Бондарик Г.К., Пендин В.В., Ярг Л.А. Инженерная геодинамика: Учебник. – М.: КДУ, 2007. – 440 с
275. Демин А.М. Оползни в карьерах: анализ и прогноз. – М.: ГЕОС, 2009. – 79 с
276. Bromhead E.N. The Stability of Slopes. – Taylor & Francis, 2005. – 416 p
277. Chowdhury R., Flentje P., Bhattacharya G. Geotechnical Slope Analysis. – CRC Press, 2010. – 721 p
278. Duncan J.M., Wright S.G. Soil Strength and Slope Stability. – John Wiley & Sons, Inc., 2005. – 309 p
279. Werner E.D., Friedman H.P. (Eds.) Landslides: causes, types, and effects. – Nova Science Publishers, 2010. – 417 p
280. Куренков Д.С. Системы комплексного мониторинга горнотехнических сооружений // Проблемы недропользования. Международный форум-конкурс молодых ученых 19-21 апреля 2017. Сборник научных трудов, часть II, Санкт-Петербург. – с. 199
281. Kurenkov D.S. Status Management of Man-Made Massifs to Enhance Operational Efficiency of Mining Waste Storages // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: Scientific conference abstracts, Saint-Petersburg, 2021. – pp. 179-180
282. Cheskidov, H. Grobler, D. Kurenkov, A. Lipina. Slope Monitoring Systems Design for Mining Enterprises // E3S Web Conf. 174 01025 (2020). DOI: 10.1051/e3sconf/20201740102
283. V.V. Cheskidov, A.V. Lipina, A.I. Manevich & D.S. Kurenkov. Status Monitoring of Sloping Structures // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. – London: CRC Press, 2019. – pp. 41-47. DOI: 10.1201/9780429398063
284. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08 декабря 2020 г. № 505 об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. – Режим доступа: <http://www.consultant.ru> (дата обращения 08.08.2022)
285. R.A. Pastorok, S.M. Bartell, S. Ferson, L.R. Ginzburg. Ecological Modeling in Risk Assessment: Chemical Effects on Populations, Ecosystems, and Landscapes. – New York, CRC Press, 2016. – 302 p
286. G. Suter. Ecological Risk Assessment: Second Edition. – New York, CRC Press, 2016. – 624 p

287. J. Glasson, R. Therivel. Introduction to environmental impact assessment. –New York, CRC Press, 2019. – 381 p. DOI: 10.4324/9780429470738
288. M. Reed, T. Alvarez, S. Chelinho et. al. A risk assessment example for soil invertebrates using spatially explicit agent-based models // Integrated Environmental Assessment and Management. – 2016. – № 12 (1). – pp. 58-66. DOI:10.1002/ieam.1713
289. R.A. Pastorok, D.V. Preziosi. Beyond qualitative assessment of ecosystem services // Integrated Environmental Assessment and Management. – 2011. – № 7 (4). – pp. 693-695. DOI: doi: 10.1002/ieam.263
290. Ческидов В.В., Куренков Д.С., Маневич А.И. Современные методы и средства оперативного контроля на горных предприятиях для обеспечения экологической и промышленной безопасности // Горный информационно-аналитический бюллетень – 2017. – № 6. – с. 188-199
291. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11 апреля 2016 г. № 144 об утверждении руководства по безопасности «Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах» [Электронный ресурс] // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс». – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru> (дата обращения 08.08.2022)
292. Сорочинский А.А. Объектно-характеристическая база данных, как промежуточный этап хранения информации в системе большой размерности // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2009. – Т. 9. – № 4. – с. 39-42

**ПРИЛОЖЕНИЕ А. РАСЧЕТЫ УСТОЙЧИВОСТИ МНОГОЯРУСНЫХ МАССИВОВ,
СЛОЖЕННЫХ ОБЕЗВОЖЕННЫМИ ХВОСТАМИ ЖЕЛЕЗИСТЫХ КВАРЦИТОВ**

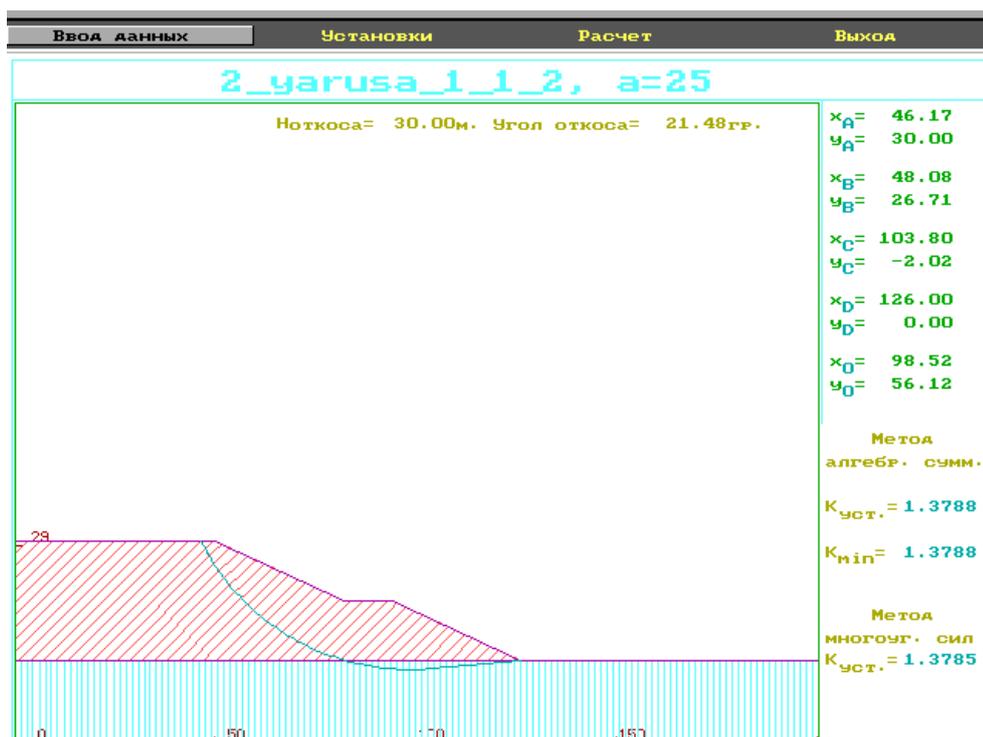


Рисунок А.1 – Расчет коэффициента запаса устойчивости и положение наислабейшей кривой скольжения при двухъярусном варианте 1.1.2*

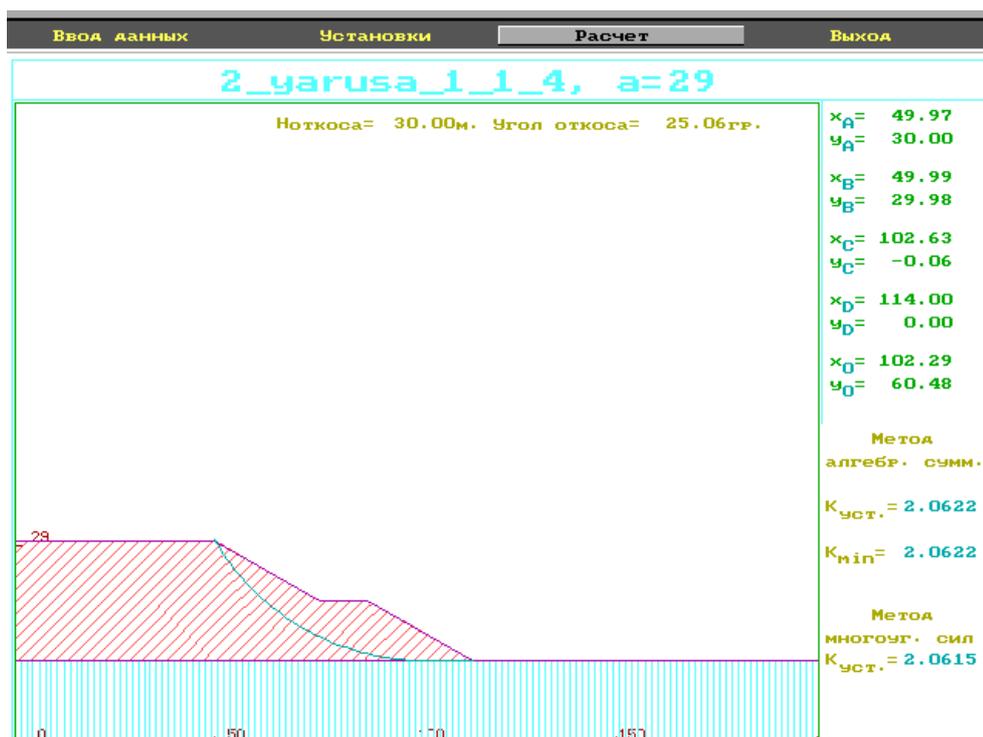


Рисунок А.2 – Расчет коэффициента запаса устойчивости и положение наислабейшей кривой скольжения при двухъярусном варианте 1.1.4+



Рисунок А.3 – Расчет коэффициента запаса устойчивости и положение наислабейшей кривой скольжения при двухъярусном варианте 1.2.1*



Рисунок А.4 – Расчет коэффициента запаса устойчивости и положение наислабейшей кривой скольжения при двухъярусном варианте 1.2.3_

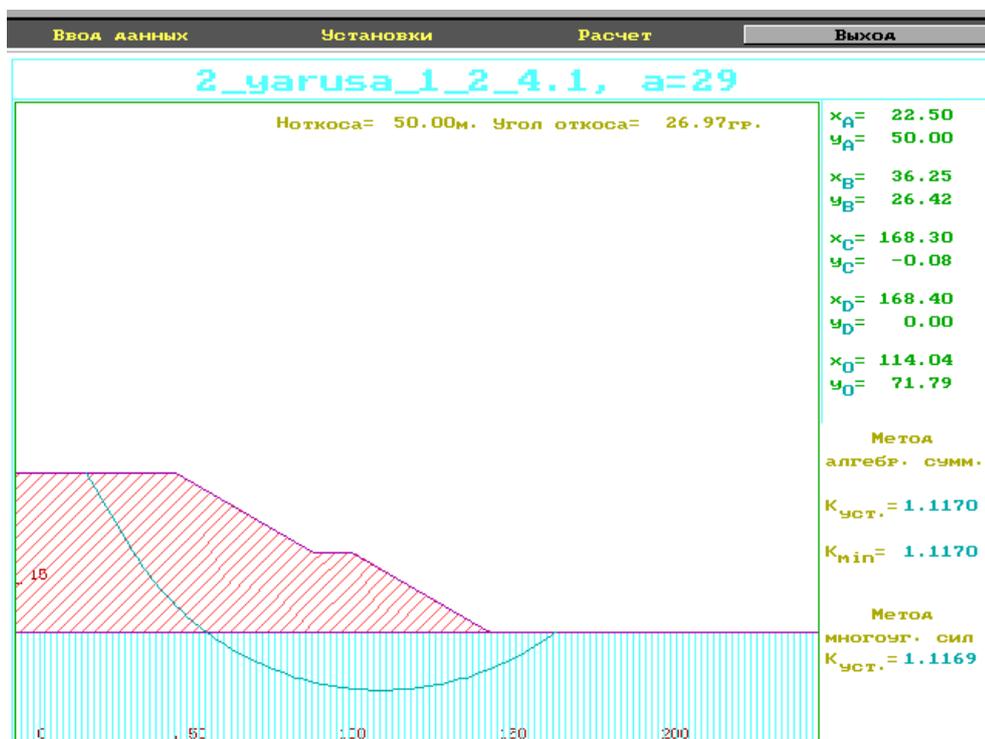


Рисунок А.5 – Расчет коэффициента запаса устойчивости и положение наислабейшей кривой скольжения при двухъярусном варианте 1.2.4*



Рисунок А.6 – Расчет коэффициента запаса устойчивости и положение наислабейшей кривой скольжения при двухъярусном варианте 1.2.4+

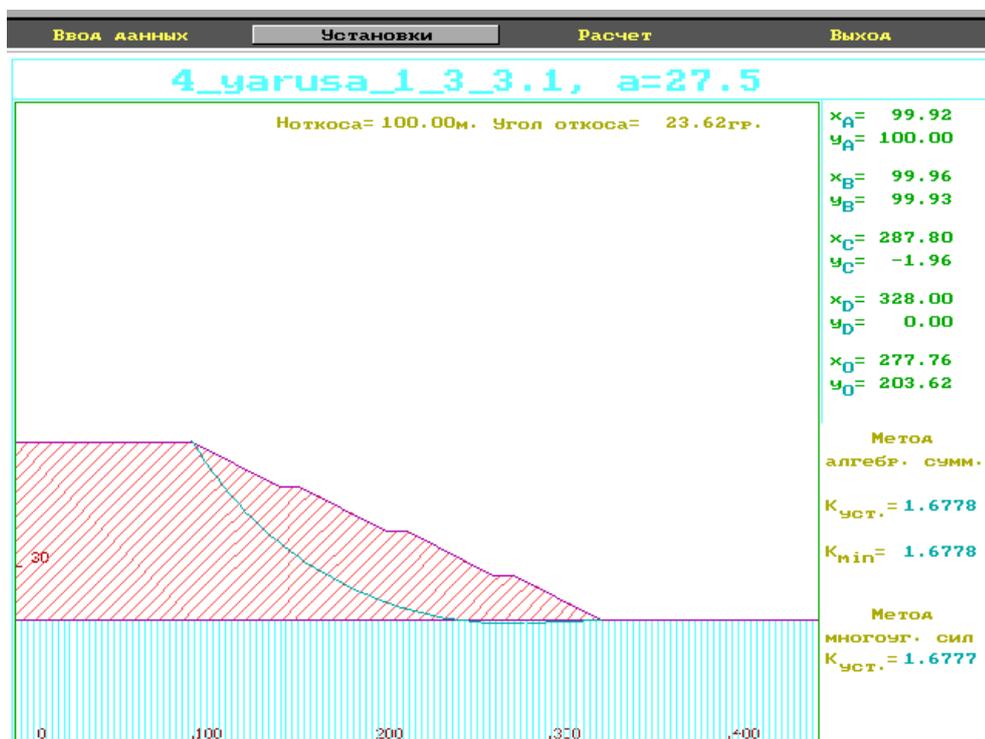


Рисунок А.7 – Расчет коэффициента запаса устойчивости и положение наислабейшей кривой скольжения при четырехъярусном варианте 1.3.3₁

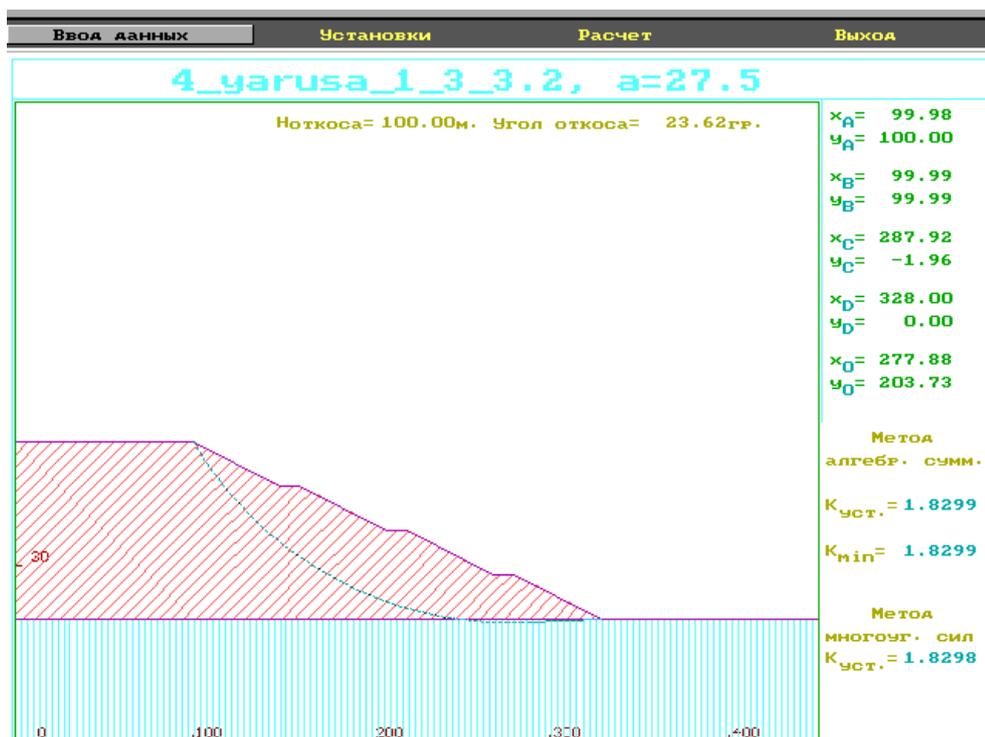


Рисунок А.8 – Расчет коэффициента запаса устойчивости и положение наислабейшей кривой скольжения при четырехъярусном варианте 1.3.3₂