

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Поморцева Анастасия Александровна



ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ
ТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ НА УЧАСТКАХ КУЧНОГО
ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА

Специальность 2.8.3. Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология,
геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат геолого-минералогических наук
Поспехов Г.Б.

Санкт-Петербург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ НА УЧАСТКАХ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА.....	12
1.1 Анализ опыта и перспективы использования технологии кучного выщелачивания при разработке золоторудных месторождений	12
1.2 Основные технологические аспекты кучного выщелачивания золота	17
1.3 Факторы, определяющие устойчивость штабелей кучного выщелачивания ...	20
1.4 Анализ изученности проблем обеспечения устойчивости штабелей кучного выщелачивания.....	29
1.5 Выводы по главе 1	40
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ШТАБЕЛЕЙ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА В ПРЕДЕЛАХ КУРАНАХСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ.....	42
2.1 Характеристика месторождений золота Куранахского рудного поля.....	42
2.2 Анализ инженерно-геологических условий эксплуатации штабелей кучного выщелачивания на территории Куранахского рудного поля	47
2.3 Технологические этапы процесса кучного выщелачивания из окомкованных песчано-глинистых золотосодержащих руд куранахского типа.....	54
2.4 Обоснование расчетной схемы для определения устойчивых параметров штабеля кучного выщелачивания золота.....	58
2.5 Выводы по главе 2.....	70
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ ОКОМКОВАННЫХ РУД КУРАНАХСКОГО ТИПА	72
3.1 Анализ гранулометрического состава.....	73
3.2 Определение влажности, водоустойчивости и плотности при плотном и рыхлом сложении класса -5 мм.....	80

3.3	Определение коэффициента фильтрации класса -5 мм	82
3.4	Оценка прочностных и деформационных свойств класса -5 мм	86
3.5	Определение прочности на растяжение отдельных включений в руде	90
3.6	Укрупнено-лабораторные стендовые испытания рудного материала.....	94
3.7	Полевые опытно-фильтрационные испытания	100
3.8	Выводы по главе 3.....	105
ГЛАВА 4 ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ ШТАБЕЛЯ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ.....		107
4.1	Анализ результатов маркшейдерских наблюдений за деформациями массива штабеля кучного выщелачивания.....	107
4.2	Характеристика сегрегации рудного материала массива штабеля кучного выщелачивания.....	110
4.3	Фильтрационное моделирование орошения штабеля кучного выщелачивания.....	113
4.4	Оценка устойчивости штабеля кучного выщелачивания	121
4.5	Рекомендации по инженерно-геологическому обеспечению устойчивости штабеля кучного выщелачивания.....	130
4.6	Выводы по главе 4.....	134
ЗАКЛЮЧЕНИЕ		137
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ		139
ПРИЛОЖЕНИЕ А Патент на изобретение		157
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт о внедрении результатов кандидатской диссертации на предприятие		158
ПРИЛОЖЕНИЕ В Фотографии материала для класса +1 мм отобранного методом ситового анализа при сухом способе рассева		159

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В связи с сокращением объемов запасов богатых золотосодержащих руд возникает потребность вовлечения в переработку забалансовых руд с низким содержанием золота, что позволяет значительно расширить сырьевую базу добычи благородных металлов предприятий минерально-сырьевого комплекса России. Технология кучного выщелачивания обеспечивает наиболее эффективное и рентабельное извлечение золота из некондиционного сырья. В пределах Куранахского рудного поля, параллельно с фабричным извлечением развивается технология кучного выщелачивания из окомкованных песчано-глинистых руд со средним содержанием золота 0,7 г/т, общими подтвержденными запасами на территории более 500 т. Помимо этого, данная технология имеет большие перспективы применения для переработки существующих отвалов золотодобывающих предприятий, содержащих концентрации золота, которые ранее считались некондиционными.

При проектировании и эксплуатации многоярусных штабелей кучного выщелачивания золота первоочередное значение имеет обеспечение устойчивости техногенного массива, что гарантирует способность сооружения функционировать в нормальном режиме с заданными параметрами в течение всего срока службы. В настоящее время вопросы формирования и изменения свойств при эксплуатации техногенных массивов штабелей, подлежащих выщелачиванию золота из окомкованных бедных песчано-глинистых руд куранахского типа недостаточно изучены, поскольку технология кучного выщелачивания получила широкое распространение только в начале 80-х годов за рубежом, а в 90-х годах и в нашей стране.

Штабели кучного выщелачивания представляют собой насыпные сооружения, для обеспечения устойчивости которых в процессе эксплуатации большое значение имеют инженерно-геологические факторы. Недостаточный учет этих факторов может стать причиной развития различных деформаций техногенного массива, а также невозможности его эффективной эксплуатации с целью извлечения золота. Таким образом, инженерно-геологическое обеспечение

устойчивости техногенных массивов на участках кучного выщелачивания золота является актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы исследования

Вопросам комплексного развития и интенсификации применения технологии кучного выщелачивания, а также формирования рудных штабелей, посвящены труды Бочарова В.А., Воробьева А.Е., Дементьева В.Е., Зеленова В.И., Куркова А.В., Крыловой Г.С., Лушниковой Я.В., Санакулова К.С., Седельниковой Г.В., Секисова А.Г., Татаурова С.Б., Тчаро Х., Фазлуллина М.И., Чантурия В.А., Чекушиной Т.В., Bishop A.W. и других авторов.

Вопросам оценки устойчивости отвалов, формирования техногенных массивов и инженерно-геологическому изучению природно-технических систем посвящены работы Бабелло В.А., Бахасовой С.П., Гальперина А.М., Дашко Р.Э., Жабко А.В., Зотеева О.В., Иванова И.П., Кириченко Ю.Н., Киянца А.В., Кутеповой Н.А., Кутепова Ю.И., Мосейкина В.В., Певзнера М.Е., Протасова С.И., Сергиной Е.В., Фисенко Г.Л., Шпакова П.С. и других авторов.

Существующий опыт обеспечения устойчивости отвалов не охватывает вопросы формирования и изменения свойств техногенных массивов на участках кучного выщелачивания золота из окомкованных песчано-глинистых руд, определяющих их деформационное поведение.

Объект исследования – техногенный массив штабеля окомкованных песчано-глинистых золотосодержащих руд куранахского типа.

Предмет исследования – состав, свойства и процессы формирования техногенных массивов из окомкованных песчано-глинистых руд на участках кучного выщелачивания золота.

Цель диссертационной работы. Повышение устойчивости техногенных массивов из окомкованных песчано-глинистых руд на участках кучного выщелачивания золота при их формировании и промышленной эксплуатации.

Идея диссертационной работы заключается в том, что повышение устойчивости массива штабеля кучного выщелачивания достигается с помощью комплексного инженерно-геологического подхода, учитывающего прогноз

и изменение свойств, техногенного гидродинамического режима и напряженно-деформированного состояния массива золотосодержащих руд на различных этапах его формирования и эксплуатации.

Основные задачи исследования:

1. Анализ и обобщение опубликованных материалов по инженерно-геологическому изучению техногенных массивов на участках кучного выщелачивания золота.

2. Изучение состава, фильтрационных и физико-механических свойств песчано-глинистых окомкованных золотосодержащих руд куранахского типа.

3. Прогноз техногенного гидродинамического режима в штабеле кучного выщелачивания при его эксплуатации.

4. Оценка и прогноз развития напряженно-деформированного состояния массива штабеля на участках кучного выщелачивания золота.

5. Разработка рекомендаций по инженерно-геологическому обеспечению устойчивости техногенного массива штабеля на участках кучного выщелачивания.

Научная новизна работы:

Впервые проведены укрепленно-лабораторные и опытно-фильтрационные исследования окомкованных песчано-глинистых золото-содержащих руд куранахского типа.

Установлены общие закономерности формирования и изменения строения и свойств техногенных массивов штабелей кучного выщелачивания из окомкованных песчано-глинистых золотосодержащих руд на разных этапах их формирования и эксплуатации.

Разработан комплексный подход к инженерно-геологическому обеспечению устойчивости техногенных массивов штабелей кучного выщелачивания золота, на основе прогноза и мониторинга их гидродинамического режима и напряженно-деформированного состояния.

Соответствие паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.3. Горнопромышленная

и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр по пунктам:

4. Методы оценки устойчивости подземных выработок, бортов карьеров, откосов уступов и отвалов, а также подземных и наземных сооружений под воздействием горных работ;

9. Методы и системы обработки геологической, маркшейдерской и геофизической информации, а также методы моделирования месторождений, прогнозирования горно-геологических условий, явлений и процессов;

12. Инженерно-геологическое обеспечение управления состоянием массивов горных пород, обоснование проектов сокращения нарушенных горными работами территорий и восстановления экологического равновесия;

14. Геологические, маркшейдерские и геофизические исследования техногенных массивов (месторождений полезных ископаемых), хвостохранилищ и отвалов для обеспечения их экологической безопасности, утилизации и получения дополнительных источников минерального сырья на всех этапах деятельности объектов горнодобывающей промышленности;

15. Лабораторные и полевые геофизические методы и средства исследования состава, строения, свойств и состояния горных пород и массивов. Геологический, геофизический и маркшейдерский мониторинг функционирования горнотехнических систем и геологической среды при разработке месторождений полезных ископаемых;

17. Разработка методов и технологий исследования и мониторинга горногеологических и горнотехнических условий освоения и эксплуатации месторождений полезных ископаемых и подземных хранилищ нефти и газа.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Обоснованы оптимальные параметры техногенного массива штабеля на участке кучного выщелачивания золота и интенсивность его орошения.

2. Разработано, апробировано и запатентовано устройство для определения характеристик песчано-глинистых окомкованных руд, которое может быть использовано для оценки геотехнических и фильтрационных параметров

окомкованных руд, подлежащих переработке методом кучного выщелачивания (Приложение А).

3. Получен акт внедрения результатов кандидатской диссертации от 16.06.2022, подтверждающий, что результаты диссертации использованы АО «Полюс Алдан» при обосновании оптимальных параметров формирования и эксплуатации многоярусных штабелей промышленного комплекса кучного выщелачивания (Приложение Б).

4. Результаты диссертационной работы могут быть использованы при разработке проектов кучного выщелачивания в пределах куранахского рудного поля и на других объектах. А также внедрены в учебный процесс при освоении дисциплин: «Инженерная геология месторождений полезных ископаемых», «Математические методы в инженерной геологии», «Инженерно-геологические изыскания».

Методология и методы исследования. Обобщение и анализ опубликованных результатов отечественных и зарубежных авторов, специализирующихся на изучении устойчивости техногенных массивов, проведение и анализ лабораторных и экспериментальных исследований в том числе методами физического моделирования, полевые опытно-фильтрационные работы, а также численное моделирование и сопоставление результатов исследований с натурными данными.

На защиту выносятся научные положения:

1. Песчано-глинистые окомкованные руды являются специфическими техногенными грунтами, характеризующимися значительным снижением прочности окатышей до практически нулевых значений и резким уменьшением коэффициента фильтрации при полном водонасыщении вследствие взаимодействия с технологическими растворами, что необходимо учитывать при прогнозе устойчивости многоярусных штабелей на участках кучного выщелачивания золота.

2. Фильтрационная неоднородность техногенного массива в штабелях кучного выщелачивания из окомкованных песчано-глинистых руд куранахского

типа определяется сегрегацией рудного материала при его отсыпке и последующими изменениями структуры массива в процессе орошения технологическими растворами.

3. Прогноз техногенного гидродинамического режима при обосновании оптимальной интенсивности орошения окомкованных песчано-глинистых руд на участках кучного выщелачивания должен осуществляться на основе моделей ненасыщенной фильтрации с учетом калибровки их параметров с помощью укрупненно-лабораторных испытаний.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается достаточным объемом и корректностью выполненных лабораторных и экспериментальных исследований, применением современных методов математического моделирования на основе численных методов и сопоставлением полученных результатов с натурными данными, а также с результатами полученными другими авторами.

Личный вклад автора – анализ отечественного и зарубежного научного опыта по теме исследования, участие в выполнении лабораторных и экспериментальных исследований, выполнение численного моделирования, обобщение и анализ полученных данных, представление результатов исследования в качестве статей и докладов на научных конференциях российского и международного уровня.

Материалы, положенные в основу диссертации, обработаны и интерпретированы автором лично.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах, международных форумах и конференциях: 59-я студенческая научная конференция по горному делу в Краковской Горно-Металлургической академии, 6 декабря 2018 г., Краков, Польша; Международная научная конференция «FarEastCon». Дальневосточный федеральный университет, 2- 4 октября 2018 г., Владивосток; 70-й студенческий форум Фрайбергской горной академии, 6 июня 2019 г., Фрайберг, Германия; Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России:

IX Всероссийская научно-практическая конференция. Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 10-12 апреля 2019 г., Якутск; 8-я Международная конференция по математическому моделированию в естественных науках, 26-29 августа 2019 г., Братислава, Словакия; 12-й Российско-Германский сырьевой форум, 27 ноября 2019 г., Горный университет, Санкт-Петербург; XXVIII Международный научный симпозиум «Неделя горняка», 29 января 2020 г., МИСиС, Москва; Международная научная конференция «FarEastCon», 6-9 октября 2020 г., Дальневосточный федеральный университет, Владивосток; 16-я научно-практическая конференция и выставка «Инженерная и рудная геофизика 2020», 14-18 сентября 2020 г., Пермь; XXIX Международный научный симпозиум «Неделя горняка», 25-29 января 2021 г., МИСиС, Москва; Международная научно-техническая конференция «Науки о Земле и окружающей среде», 25-26 января 2021 г., Владивосток; 10-я Международная конференция по математическому моделированию в естественных науках «IC-MSQUARE 2021», 6-9 сентября 2021 г., Греция; Международная научно-практическая конференция «Development of Science in the XXI Century», 25-26 апреля 2024 г., г. Дортмунд, Германия; Международная научно-практическая конференция «Science and Technologies», 29 апреля 2024 г., г. Петрозаводск.

Публикации по работе. По теме диссертации опубликовано 6 печатных работ (пункты списка литературы №10, 67, 83, 86 – 87, 135), в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение (Приложение В).

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 160 страницах машинописного текста, содержит 4 главы, введение и заключение, список литературы из 153 наименований, 90 рисунков, 23 таблицы и 3 приложения.

Благодарности. Автор выражает глубокую благодарность и признательность научному руководителю к.г.-м.н. Поспехову Г.Б., к.г.н. Поморцеву О.А., д.т.н. Карасеву М.А., к.т.н. Маринину М.А., а также коллективу Научного центра геомеханики и проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за содействие и помощь в проведении исследований диссертационной работы.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ НА УЧАСТКАХ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА

1.1 Анализ опыта и перспективы использования технологии кучного выщелачивания при разработке золоторудных месторождений

Благодаря высоким темпам развития золоторудной отрасли, Россия располагается на третьем месте по добычи золота, уступая только Китаю и Австралии [73]. На долю России приходится около 80% всего объема добываемого золота в Европе. Одним из главных конкурентных преимуществ российского золота является его себестоимость. Две российских компании входят в первую пятерку рейтинга по добыче золота с самой низкой себестоимостью [11]. Лидером рынка золота в 2018 году в этом отношении стала компания «Полиметалл», с себестоимостью добычи 425 долларов за одну унцию на руднике «Светлое» в Хабаровском крае, занявшем первое место рейтинга. Третью позицию занимает компания «Полюс», с себестоимостью добычи 468 долларов за унцию на месторождении «Олимпиада» в Красноярском крае. На четвертом месте рейтинга с себестоимостью добычи 477 долларов за одну унцию рудник «Воро» компании «Полиметалл» в Свердловской области [11]. Следует отметить, что в 2022 году российские золотодобывающие компании столкнулись с ростом внутренних издержек, включая инфляцию и увеличение затрат на логистику из-за сбоев в цепочках поставок. Несмотря на это, на сегодняшний день себестоимость отечественного золота остается ниже среднемирового уровня [12].

К настоящему времени запасы золота в России распределяются следующим образом: 69,3% – золоторудные месторождения, 24% – комплексные месторождения, 6,7% – россыпные месторождения [73]. Из 26 золотодобывающих регионов в РФ около 80% всего объема добычи обеспечивают всего 8 субъектов России (рисунок 1.1) [43, 73].



Рисунок 1.1 – Показатели добычи золота по регионам РФ в год [43]

Анализ динамики разведанных запасов золота в России (рисунок 1.2) указывает на рост запасов категории С2 по сравнению с АВС1. Такая тенденция может свидетельствовать об ухудшении качества ресурсной базы, что связано как с исчерпанием легко разрабатываемых месторождений, так и с вовлечением в разведку все более сложных по геолого-структурным условиям объектов [43, 46, 73]. В этих условиях для развития золотодобывающей отрасли требует не только наращивание объемов геологоразведочных работ, но и активного вовлечения в эксплуатацию нетрадиционных источников минерального сырья.

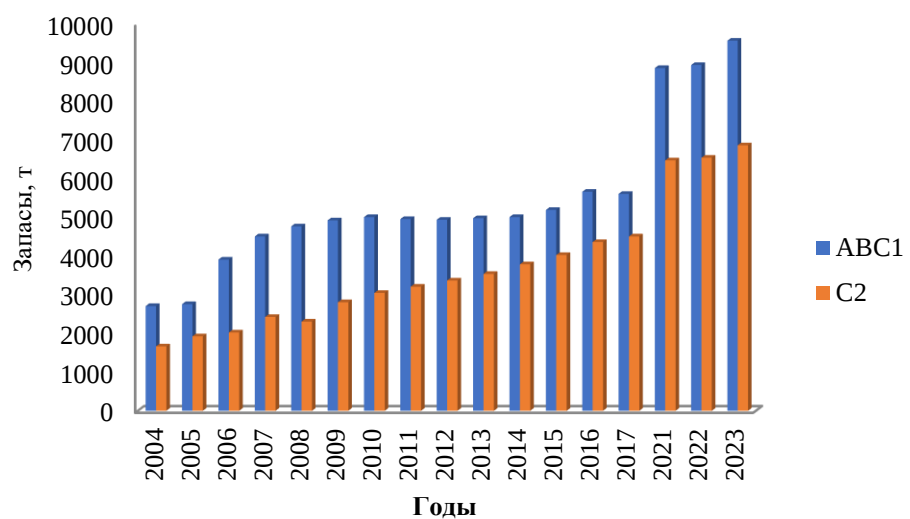


Рисунок 1.2 – Разведанные запасы золота месторождений РФ [43, 73]

Одним из наиболее перспективных направлений восполнения минерально-сырьевых ресурсов золота является освоение техногенных месторождений. Так к 2023 году объем добычи золота из техногенных месторождений составил 1,1 т. На сегодня установлено 30 техногенных месторождений с балансовыми запасами золота в объеме 48,3 т. Кроме того, два техногенных месторождения характеризуются наличием забалансовых запасов. Разведанные на начало 2023 г. забалансовые запасы золота техногенных месторождений в целом по стране составляют 14,6 т [73].

Также в настоящее время развитие золотодобывающей промышленности России сдерживают следующие факторы:

- неудовлетворительная степень извлечения золота и рост его содержания в отходах горного производства [56, 20];
- снижение качества руд [22, 99];
- плохо развитая инфраструктура [22];
- потребность в развитии технологий [3, 22].

Указанные факторы побуждают горнодобывающие предприятия к разработке и внедрению в производство более эффективных, менее энерго- и ресурсозатратных, экономически рентабельных технологий извлечения и переработки золота, позволяющих положительно решить вопросы безопасности труда. Одной из таких технологий, отвечающих предъявляемым требованиям, является технология кучного выщелачивания (далее – КВ) с использованием цианирования, когда растворение золота происходит за счет просачивания растворов через рудные штабели. Данная технология позволяет извлекать золото с содержанием в руде от 0,5 г/т [99,110]. Штабели КВ преимущественно формируются насыпным способом из подготовленной руды, что делает эти сооружения отчасти похожими на отвалы, но со своей спецификой строения и эксплуатации, что будет рассмотрено далее. При этом существуют предложения формирования массивов КВ гидромеханизированным способом намыва [97, 98].

Технология КВ получила широкое распространение в начале 80-х годов за рубежом, а в 90-х годах и в нашей стране [46,47]. Способ извлечения золота

цианированием был разработан в 1887–1889 гг. Робертом и Уильямом Форрестами совместно с химиком Джоном Макартуром, что дало новое развитие технологиям извлечения золота из руд. В 1967 г Горным Бюро США было предложено кучное выщелачивание золота цианированием, в 1974–1980 Горное бюро инициировало исследования процесса агломерации и впервые реализовало его на практике. Главная цель агломерации — создание пористого и достаточно прочного материала, который способен переносить нагрузки в ходе укладки в штабель и в процессе эксплуатации. [59]. При этом сформированный массив должен обладать однородными фильтрационными характеристиками. Практика показала, что для большинства руд, дроблённых тоньше 25 мм, оптимальными условиями агломерации являются: добавление портландцемента — 4,5–5 кг/т руды, влажность — 12% [59].

Первые масштабные полевые эксперименты по применению технологии КВ золота были проведены компанией Carlin Gold Mining в 1969 г на экспериментальном участке месторождения Carlin Trand, штат Невада, США. В результате проведенного цианирования в течение 21 дня руды штабеля КВ высотой 3,6 м и крупностью 25 мм с содержанием золота 2 г/т, извлечение полезного компонента составило 90% [99]. Это позволило сделать вывод об эффективности и рентабельности технологии КВ для низкосортных руд по сравнению с фабричной технологией. Однако, промышленных масштабов в США технология КВ достигла только к середине 80-х годов, когда был накоплен необходимый производственный опыт и усовершенствован ряд технологических процессов [34, 99]. До этого времени применение КВ сдерживалось по причине опасности использования высокотоксичных цианистых растворов на открытых площадках. [99]. Также развитию внедрения КВ способствовало внедрение окомкования первичных руд, что позволило увеличить их проницаемость и вовлекать в процесс выщелачивания бедные песчано-глинистые руды.

Основоположниками проектирования и внедрения технологии КВ в нашей стране являются научно-исследовательские институты «Иргиредмет», «ВНИПИгорцвет», «ВНИИпрозолото». Первой промышленной установкой КВ

золота на территории СССР принято считать установку на месторождении «Васильковское» (Акмолинская область, Казахской ССР) в 1991 году производительностью 300 тыс. тонн руды в год с содержанием золота 2 г/т [99].

В 90-х годах институт «Иргиредмет» в результате завершения комплексов полупромышленных экспериментальных исследований разработал технологические регламенты по проектированию разработки месторождений золота на территории СНГ: Майское, Покровское, Суздальское, Макмальское, Дельмачик, Светлинское, Олимпиада, Амазаркан, Марджанбулак и других [33]. Технология КВ из окомкованных золотосодержащих руд, реализована при участии института «Иргиредмет» на предприятиях по добыче золота и месторождениях: Физкультурное-Холодное, Куранахское, Забайкальский ГОК, Самолазовское, Светлинское, Погромное, Сари-Гунай и др. [33, 88].

Опыт извлечения золота из бедного золотосодержащего сырья забалансовых и бедных руд техногенных массивов месторождений полезных ископаемых показывает, что технология КВ по сравнению с фабричными технологиями имеет значительные преимущества. В первую очередь, это связано с низкими капитальными и эксплуатационными затратами, ввиду отсутствия необходимости в трудоемких процессах по измельчению и обогащению руды [55, 58, 65]. Поэтому дальнейшее совершенствование и внедрение в инженерную практику технологии КВ золота включает обоснование увеличения объемов извлечения золота в том числе, содержащихся в хвостах и отвалах месторождений. [51]. Для этого совершенствуются технологии дробления и подготовки руды, ее укладки в многоярусные штабели, а также рассматриваются циклические технологии КВ, предусматривающие отсыпку и удаление рудного штабеля с последующим повторным использованием дренажной системы [50,99].

В настоящее время компания «Полюс», занимающая четвертое место по производству золота в мире, активно внедряет технологию КВ [11, 80]. Так, например, в пределах Куранахского рудного поля, компанией параллельно с фабричной переработкой, активно развивается технология КВ золота методом прямого цианирования с извлечением порядка 90% из окомкованных песчано-

глинистых руд со средним содержанием золота 0,7 г/т, производительностью по руде более 1500 тыс. т в год и общими подтвержденными запасами на территории более 500 т [54,74,79]. Предпосылкой для расширения КВ также является то, что, начиная с 1956 г на территории Куранахского рудного поля в отвалы складировалась порода с содержанием золота, превышающим пригодное для фабричной переработки на современном этапе. Дальнейшее применение КВ в пределах Куранахского рудного поля имеет большой потенциал на многие годы вперед, что делает актуальным выбор в качестве объекта исследования техногенные массивы штабелей окомкованных песчано-глинистых золотосодержащих руд куранахского типа.

1.2 Основные технологические аспекты кучного выщелачивания золота

Многие отечественные ученые в разные годы внесли значительный вклад в развитие и совершенствование технологии КВ. Исследованиями процессов КВ занимались П.Б. Авдеев, В.Ж. Аренс, В.А. Артушкевич, Ю.И. Рубцов, С.Б. Татауров, В.А. Чантурия, М. И. Фазлуллин. Разработке технологических процессов и схем КВ посвящены труды В.А. Бочарова, А.Е. Воробьева, С.С. Гудкова, В.П. Дробаденко, Д.П. Лобанова, В.В. Лодейщикова. Над повышением эффективности технологии КВ работали Л.И. Водолазов, Н.П. Лаверов, Н.Г. Малухин, Г.Г. Минеев, А.В. Рашкин, Ю.Н. Резник, Г.В. Сидельникова, Г.А. Строганов, А.П. Татаринов, М.И. Фазлуллин, А.В. Фатьянов, Г.Х. Хчеян, Л.В. Шумилова, И.А. Яшкин. Геомеханическим обоснованием параметров штабелей КВ занимались В.К. Багазеев, Н.Г. Валиев, С.В. Гринченко, Я.В. Лушников.

В общем виде технологический процесс КВ включает следующие основные этапы [5, 34, 72, 97]: подачу рудного материала из рудника либо карьера; подготовку руды посредством дробления либо комбинации дробления и агломерации — в случаях, когда рудный материал содержит значительное количество глинистых и пылеватых частиц, а также при необходимости улучшения фильтрационных параметров. В ряде случаев для повышения эффективности процесса (например, при выщелачивании золота из хвостов обогащения)

применяется самостоятельное окомкование. Далее осуществляется инженерная подготовка основания штабеля и сооружение штабеля, подача выщелачивающих растворов с заданной интенсивностью орошения, сбор и отведение продуктивных растворов, извлечение полезных компонентов.

Сооружение рудного штабеля включает устройство дренажного слоя с противофильтрационным экраном в основании, организацию системы орошения с подачей выщелачивающих растворов в рудную массу, а также установку системы дренажа для отвода продуктивных растворов. Конструктивные особенности дренажных систем зависят от морфологии местности и геологических характеристик грунта [5, 34, 99].

Площадки для размещения объектов КВ могут располагаться в различных природных условиях: на равнинных участках, склонах, берегах рек и водохранилищ, в холмистой местности с развитой овражно-балочной сетью, а также в предгорьях и на склонах гор. Выбор конкретного участка обуславливает тип площадки, которая может быть горизонтальной, наклонной (для размещения одиночных либо сгруппированных штабелей), в природной ложбине или на склоне горы с выемкой (рисунок 1.3) [5].

В связи с ухудшением сырьевой базы на действующих предприятиях с открытой разработкой месторождений золота перспективным является размещение штабелей КВ в отработанном пространстве карьера, что не требует дополнительного отчуждения земель, снятия плодородного слоя, а также позволяет снизить затраты на перевозку руды.

Формирование рудного штабеля является ключевым этапом в технологии КВ, от которого во многом зависят эффективность фильтрации выщелачивающих растворов и, как следствие, общие технологические показатели. Одним из критически важных требований к штабелю является минимизация уплотнения материала, поскольку избыточное уплотнение приводит к снижению проницаемости порового пространства и ухудшению условий фильтрации.

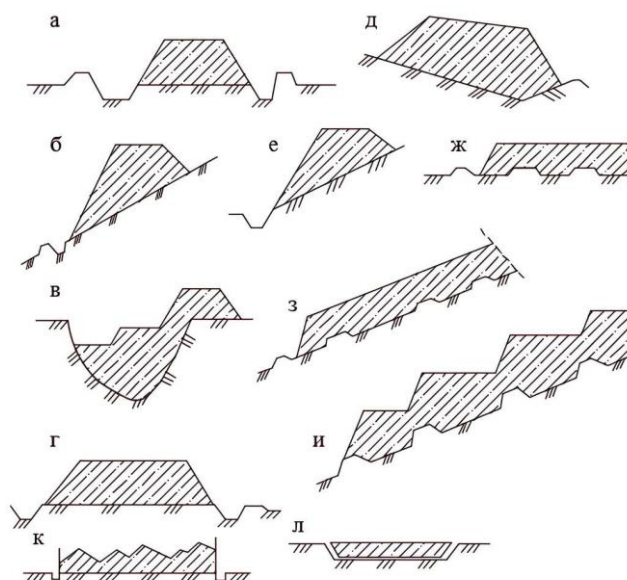


Рисунок 1.3 – Схемы размещения штабелей КВ в различных топографических условиях [5]: а–в – отвалы, находящиеся на горизонтальной (а) и наклонной (б) поверхностях и в отработанном карьере (в); г–е – штабели, находящиеся на горизонтальной поверхности с дренированием растворов в боковые (г) и подштабельные (д) выемки и расположенные на склоне (е); ж–и – штабели, сооружённые на горизонтальной (ж) и наклонной поверхностях без рекультивационного слоя почвы (з) и с ним (и); к – кучи, отсыпанные в заливаемую реагентом или водой емкость; л – тонкий слой концентрата после замеса с концентрированным раствором реагента

Выбор способа формирования штабеля определяется физико-механическими свойствами минерального сырья, его крупностью, прочностью, а также геоморфологическими условиями площадки.

Наиболее простым и экономичным является комбинированный способ с применением автосамосвалов (для укладки нижнего слоя) и фронтальных погрузчиков (для послойного наращивания штабеля). Однако высота отвалов при том ограничена, как правило, 4,3 м [5]: Повышение высоты штабеля способствует снижению удельных капитальных затрат, однако требует применения специализированной техники. Так, для формирования штабелей высотой свыше 4 м применяются отвалообразователи и экскаваторы-драглайны, позволяющие свести уплотнение к минимуму за счёт равномерного распределения массы.

Бульдозерный способ формирования штабеля применяется преимущественно для прочных руд (например, месторождения «Майское», «Чазы-Гол», «Бамское»), поскольку такой материал в меньшей степени подвержен уплотнению при перемещении. Этот метод эффективно сочетается с предварительной подготовкой руды (дробление до -20 мм, грохочение, цементация), как реализовано на месторождениях «Приморское» и «Бамское» [5, 34]:

Для окомкованных руд и хвостов, отличающихся низкой механической прочностью, предпочтителен конвейерно-стакерный способ укладки, обеспечивающий равномерное распределение без уплотнения. Данный метод используется, например, на месторождении «Покровское», где сформирован штабель высотой 6 м [34]. Выбор технологии формирования штабеля должен учитывать, как свойства перерабатываемого сырья, так и производственные условия, с целью обеспечения оптимального режима фильтрации и минимизации затрат.

Таким образом, можно сделать вывод, что штабели КВ относятся к техногенным насыпным массивам, что позволяет рассматривать их в некоторой степени как отвальные сооружения, имеющие специфические особенности:

- инфильтрационный режим в процессе орошения растворами с заданной интенсивностью;
- дренажный слой в основании с гидроизоляционным покрытием;
- уклон основания 2° – 7° для отвода продуктивных растворов после выщелачивания.

1.3 Факторы, определяющие устойчивость штабелей кучного выщелачивания

На фоне интенсификация применения технологии КВ золота основной задачей является обеспечение устойчивости техногенного массива штабеля, что гарантирует способность сооружения функционировать в нормальном режиме с заданными параметрами в течение всего срока службы [62]. Параметры откосных сооружений и условия их эксплуатации, в том числе и техногенных массивов

штабелей КВ, обусловлены совокупным влиянием комплекса природных и техногенных факторов [36, 37, 70]. Потеря устойчивости штабеля вследствие их недоучета может привести к жертвам, выходу из строя оборудования подачи растворов для орошения, повредить дренажную систему труб, а также оказать существенное негативное воздействие на окружающую среду за счет проникновения растворов цианида в породный массив в основании штабеля, а затем и в водоносный горизонт [99].

Несмотря на большой опыт формирования и эксплуатации техногенных массивов на горных предприятиях и наличие методик прогноза их состояния [20] при эксплуатации объектов КВ за последнее время в мировой практике известно несколько крупных аварий, связанных с потерей устойчивости объектов КВ золота, рассмотренных ниже.

В практике известен случай обрушения на штабеле КВ площадки золотодобывающего рудника Bellavista, Коста-Рика в октябре 2007 года (рисунок 1.4) [145]. Объем оползня оценивается около 35 млн м³ рудной массы. Как показало расследование к потере устойчивости привело существенное обводнение рудного штабеля вследствие сезонных проливных дождей. Также было выявлено несоответствие параметров сооружения проекту и недостаточное внимание мониторингу состояния техногенного массива.



Рисунок 1.4 – Общий вид штабеля прощадки КВ золота рудника Bellavista, Коста-Рика [145]

Позднее в 2024 году еще один крупный оползень произошел на площадке КВ на золотом руднике Eagle в Юконе, Канада, на котором ранее уже возникали проблемы с устойчивостью [143]. Объем обрушившегося материала около 4 млн м³, что благодаря рельефу местности привело к обрушению материала по длине на около 1,4 км при максимальной ширине около 370 метров. Анализ аварии позволил выделить несколько причин, которые могли привести к потере устойчивости: наличие слабых отложений в основании штабеля; накопление воды внутри штабеля и/или под ним; перегрузка насыпи при недостаточном технологическом контроле. В итоге приостановка работы рудника привела к потере рабочих мест и финансовым издержкам компании Victoria Gold, а также крупному экологическому урону для региона [143].

В том же 2024 году, 13 февраля, на золотодобывающем руднике Чёплер в провинции Эрзинджан, Турция, также произошел крупный оползень на площадке КВ, приведший к гибели 9 человек. Объем руды при смещении составил, по различным оценкам, более 10 млн м³. По результатам независимого технического анализа, выполненного специализированной инженерно-консультационной фирмой Call & Nicholas Inc. (CNI), определена основная причина инцидента: некорректная оценка прочностных характеристик на контакте с гидроизоляционными материалами. В результате произошел недоучет пластичных деформаций в основании насыпи, что вызвало прогрессирующую потерю устойчивости. Детальное расследование не выявило признаков влияния других факторов, таких как избыточное водонасыщение техногенного массива, сейсмические воздействия или эксплуатационные перегрузки [144].

Данные случаи подчеркивают важность анализа и полного учета факторов, способных повлиять на устойчивость штабелей КВ в процессе их сооружения и эксплуатации, а также необходимость постоянного мониторинга и оценки рисков в том числе для предотвращения подобных аварий, а также для обеспечения максимального извлечения золота. В соответствии с предложенной Г.Л. Фисенко и вошедшей в пособие по изучению инженерно-геологических условий [70, 113] для обоснования устойчивых параметров боров карьеров и отвалов общей

характеристикой факторов, предлагается для участков КВ золота выделить инженерно-геологические, гидрогеологические, климатические и технологические факторы (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Факторы, определяющие устойчивость штабелей КВ на основе [113] с дополнениями

Среди инженерно-геологических факторов, помимо общеизвестных задач оценки и прогноза изменения инженерно-геологических условий основания откосного сооружения, устойчивость штабеля КВ определяют вещественный и гранулометрический состав рудного массива, его строение, прочностные и деформационные свойства руд и их изменчивость во времени и пространстве, а также условия эксплуатации. Перечисленные для штабелей КВ факторы оказывают решающее влияние на характер деформирования рудного массива и возможность потери устойчивости в процессе его эксплуатации, и как следствие, в целом определяют экономические показатели и безопасность работ [87].

Ввиду специфики эксплуатации штабелей КВ большое значение имеет оценка изменчивости механических свойств рудного массива, подверженного орошению растворами. Особенно это важно для штабелей окомкованных руд,

поскольку при дополнительном их увлажнении и размокании может происходить разрушение окатышей. Недоучет этого может привести к потере эффекта окомкования руды для увеличения ее проницаемости с формированием мелкодисперсных линз и прослоев, а при наихудшем сценарии к потере целостности конструкции массива [113]. В этой связи изучение физико-механических свойств рудного массива, а также оценка и прогноз их изменения во времени является важным аспектом для обеспечения устойчивости и эффективности процессов КВ [32].

Еще одной особенностью эксплуатации штабелей КВ является уклон их основания, как правило $2^{\circ} - 7^{\circ}$ для оттока растворов, что также оказывает влияние на устойчивость массива [5]. При этом для предупреждения потерь растворов и загрязнения окружающей среды в основании на участках КВ в настоящее время для гидроизоляции всегда укладывают экран, что также может сказываться на устойчивости массива, в зависимости от значений сопротивления сдвигу на контакте слоев массива [37, 56, 52].

Учёт сейсмичности района при расчёте устойчивости штабеля КВ осуществляется через введение дополнительных нагрузок и параметров, отражающих поведение грунтов и конструкции штабеля в условиях землетрясений. Первичным этапом является определение сейсмического района по действующим нормативным документам. В Российской Федерации используются карты оценки сейсмического районирования (ОСР-2015), а также норматив СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах». В соответствии с СП 14.13330.2018 сейсмичность при расчете устойчивости сооружения учитывается при превышении показателя в 6 баллов, в противном случае антисейсмические мероприятия при принятии конструктивных решений не предусматриваются и сейсмические нагрузки при расчёте строительных конструкций не учитываются.

Гидрогеологические факторы на участках КВ учитываются путем оценки и прогнозирования техногенного гидродинамического режима массива штабеля в процессе орошения растворами. При оценке устойчивости сооружения необходимо контролировать уровень воды в массиве в процессе его эксплуатации.

Поэтому определяющим гидрогеологическим параметром для обеспечения функционирования сооружения является коэффициент фильтрации, который определяется гранулометрическим составом руд, в том числе с точки зрения его однородности и наличия мелких частиц, способствующих закупориванию порового пространства, а также степенью уплотнения руды в теле штабеля [18, 37, 54,130].

Климатические факторы и возможное наличие криолитозоны имеют большое значение, поскольку порядка 65% территории РФ относится к районам распространения многолетнемерзлых пород (далее – ММП). Эти области характеризуются континентальным или резко-континентальным климатом. Именно здесь расположены крупные золоторудные месторождения, включая Наталкинское в Магаданской области, Нежданинское в Республике (Саха) Якутия, Майское в Чукотской АО и др. Месторождения золота на участках распространения ММП уже успешно эксплуатируются и в дальнейшем будут активно вводиться в производство в будущем [47,51,58].

Климатические факторы влияют на очень многие процессы в техногенных массивах. Например, низкая скорость просачивания растворов не позволяет провести выщелачивание в период положительных температур в условиях Крайнего Севера, что требует продолжения работ при отрицательных температурах за счет дополнительных затрат на подогрев растворов и утепление штабеля. В случае консервации рудного штабеля на зимний период необходимо учитывать влияние циклов промерзания и оттаивания материала на вещественный состав и геотехнологические свойства сырья [47]. К наиболее значимым из них можно отнести эрозионные процессы на откосах массивов, дефляционные процессы, а также испарения растворов цианида из-за повышения температуры и насыщение штабеля участка КВ атмосферными осадками, что сказывается на управлении технологическим процессом выщелачивания и устойчивости техногенных массивов [119, 138].

Устойчивость криолитосистем, лежащих в основании техногенных массивов, определяется природно-климатическими условиями, а также наличием в толщах

ММП природных льдов и их склонностью к фазовым переходам. При деформациях толщи ММП могут происходить различные динамические процессы, охватывающие большие массы пород, что напрямую влияет на безопасность отработки техногенных массивов. Для прогнозирования изменения состояния криолитосистемы необходим поиск определенной ритмической упорядоченности климатических флуктуаций и отклика на нее пространственно-временные сдвиги в криолитозоне. При изучении климатических факторов, необходимо отметить, что в настоящее время не существует ни одного надежно обоснованного прогноза о поведении многометровой толщи мерзлоты при развивающемся глобальном потеплении [7, 10].

Так, например, с целью прогнозирования климатической обстановки на основании данных среднегодовой температуры гидрометеорологической станции Якутск было выполнено численное моделирование методами Фурье анализа, Вейвлет преобразования (рисунки 1.6 и 1.7) [10].

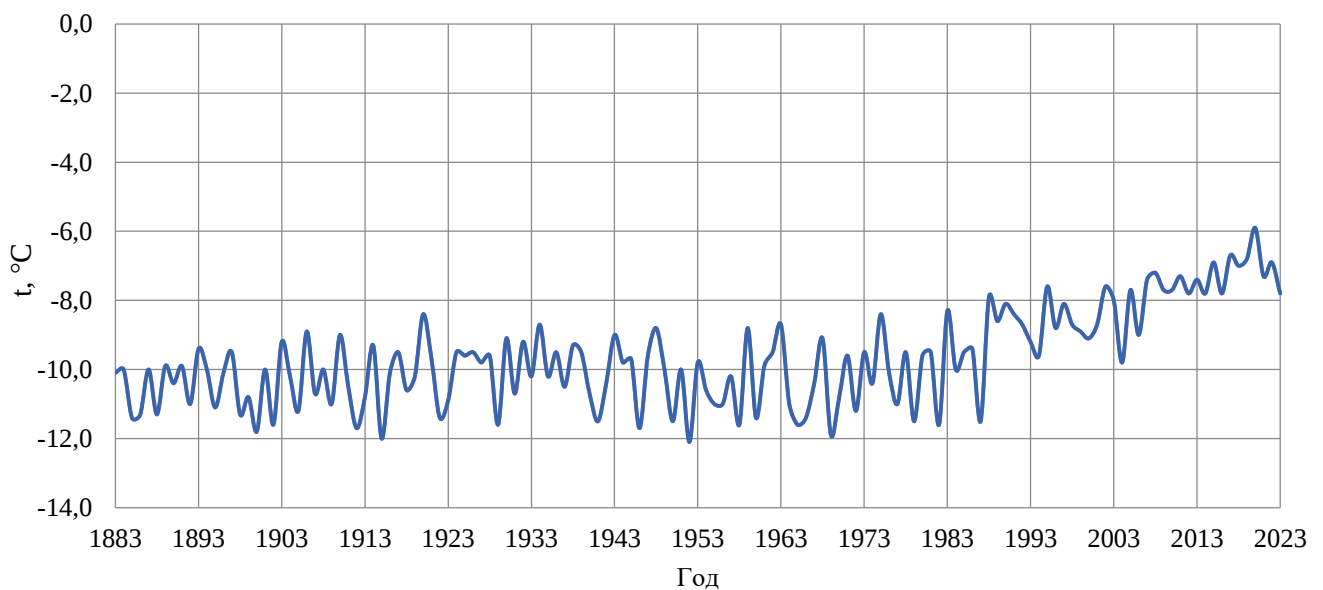


Рисунок 1.6 – График средних температур воздуха в Якутии [84]

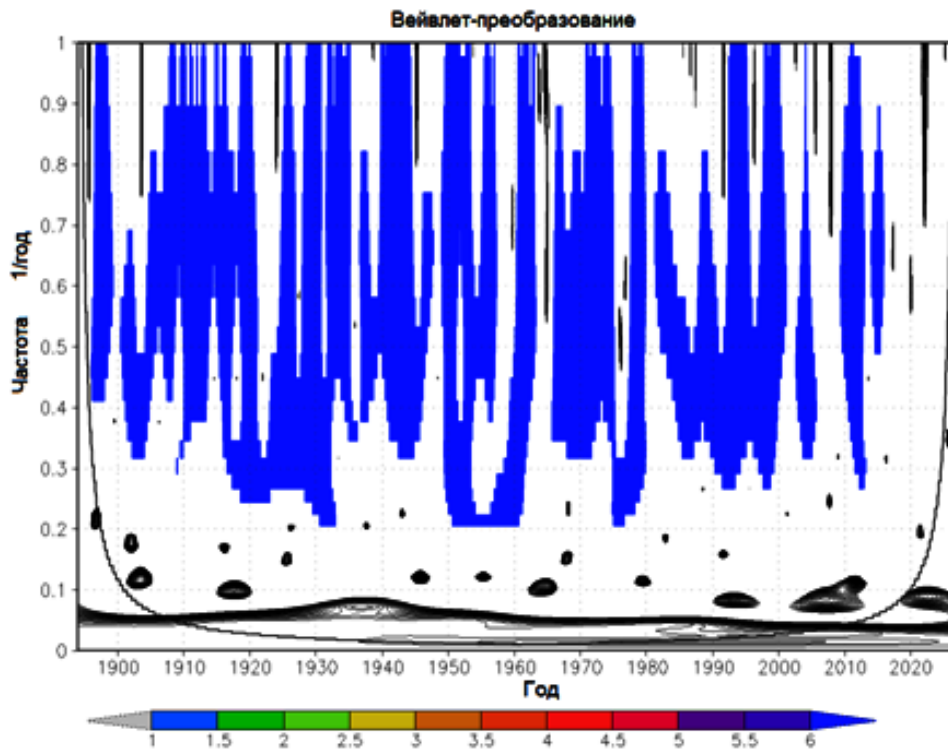


Рисунок 1.7 – Вейвлет-преобразование средней температуры воздуха в Якутии [146]

Было установлено, что ходы кривой температурного ряда хорошо согласуются с ходами кривой глобальной температуры планеты, что придает ряду надрегиональный статус [146]. Вейвлет-анализ подтвердил гармоническую структуру температурного ряда, определенную методом Фурье-анализа, и дополнил ее, показав присутствие, наряду с крупными циклическими осцилляциями, целого спектра более короткопериодических температурных колебаний.

Отметим, что с конца семидесятых годов прошлого века в Якутии наблюдалась первая волна усиления динамики экзогенных процессов. Вторая волна была зафиксирована в 2001-2003 гг. в средней части долины реки Лена, где под влиянием оттаивания ММП произошли массовые обрушения осадочного чехла на крутых бортах долины с обнажением скальных оснований. Позднее, в 2011-2014 гг. в бассейне реки Батагайки, образовался гигантский провал, обнаживший мощное ледяное ядро криолитозоны в виде ледового уступа высотой до 20 м и более и протяженностью более 4 км [85, 146].

В настоящее время накоплен большой объем данных о природных процессах в криолитозоне Якутии в условиях глобального потепления. Эти данные позволяют оценить влияние процесса потепления на устойчивость криолитосистем [84, 85]. Согласно представленному численному моделированию, потепление распространится на все XXI столетие, то усиливая, то ослабляя динамику опасных криогенных процессов, в рамках векового и внутривековых ритмов модулирующих не только аномалии потепления, но и возвраты холодов [85, 146]. Наиболее сложные и опасные инженерно-геологические и геоэкологические проблемы устойчивости ММП могут быть активированы при возникновении атмосферного увлажнения наряду с ростом температуры, способные усиливать динамику разрушительных криогенных процессов. Активация опасных инженерно-геологических процессов может напрямую сказаться на безопасности производства горных работ, на технологической целостности производственных операций.

Следует оценить устойчивость криогенного геологического основания к потеплению на участках горно-геологического и промышленного освоения и прилегающих территориях криолитозоны. В качестве решений по предупреждению развития экзогенных процессов при деградации ММП следует предусмотреть мероприятия по водоотведению, мелиорации грунтов основания, укреплению откосов массива, своевременной ликвидации пучин, криопэгов, термокарстовых просадок и эрозионных промоин и др. криогенных процессов [84].

Нарушение устойчивости основания является фактором риска для выхода из строя всей инженерно-технической системы штабеля участка КВ, ввиду нарушения конструктивной целостности техногенного массива, в том числе инженерных сетей в основании штабеля, в частности трубопровода сбора продуктивного раствора. Необходимо предусмотреть мероприятия мониторинга и контроля развития деформаций в массиве штабеля как по сечениям откосов, так и по всей поверхности сооружения техногенного массива.

Горнотехнические факторы необходимо выделить в отдельную категорию, поскольку они напрямую определяют состояние и устойчивость массива штабеля КВ. К ключевым горнотехническим факторам относятся способ подготовки

минерального сырья, метод формирования штабеля, режим выщелачивания, а также выбор способа изоляции основания и боковых поверхностей штабеля.

Способ подготовки сырья влияет на гранулометрический состав материала, что определяет водопроницаемость и механическую прочность массива [5]. Метод формирования штабеля (например, высота укладки, угол откоса и способ укладки) оказывает влияние на равномерность уплотнения и распределения растворов, что также критично для устойчивости штабеля. Правильно выбранный режим выщелачивания обеспечивает оптимальный расход и равномерное распределение растворов, предотвращая формирование зон перенасыщения или пересыхания материала, что в свою очередь снижает риск локальных ослаблений массива.

Соблюдение заданных параметров укладки и режима орошения является критическим для эксплуатации штабеля, поскольку даже незначительные отклонения могут привести к возникновению зон с повышенной влажностью или, наоборот, пересыханием и образованием трещин. Такие нарушения могут существенно ухудшить прочностные характеристики массива, приводя к потенциальной деформации или даже обрушению штабеля [60].

Выбор подходящего способа изоляции штабеля (гидроизоляция, геомембраны и другие изоляционные покрытия) позволяет исключить нежелательную миграцию растворов, которые способны снизить устойчивость основания штабеля и негативно повлиять на эффективность всего процесса КВ [5, 52, 76].

1.4 Анализ изученности проблем обеспечения устойчивости штабелей кучного выщелачивания

Как было указано ранее, обеспечение устойчивости техногенного массива штабеля КВ должно гарантировать способность сооружения функционировать в нормальном режиме с заданными параметрами в течение всего срока службы [63]. Такое представление об устойчивости включает в себя не только геомеханические вопросы, но и технологические аспекты, связанные с целевым назначением сооружения. Для штабелей КВ золота – это прежде всего процесс максимально

полного извлечения золота из рудного массива. При этом, в рамках инженерной геологии месторождений полезных ископаемых Кутеповым Ю.И. сформулировано более полное определение понятия инженерно-геологического обеспечения устойчивости применительно к условиям отвалообразования. Под ним он понимает «комплекс работ и исследований по изучению, прогнозу и контролю состояния и свойств техногенных массивов, позволяющий управлять параметрами отвалообразования в течение всего срока строительства, эксплуатации, рекультивации, консервации и ликвидации отвалов и гидроотвалов, а также обеспечивающий промышленную и экологическую безопасность горного производства» [54].

Следует отметить, что, по причине активного внедрения технологии КВ только в конце прошлого столетия, специализированного изучения техногенных массивов на участках КВ в рамках инженерной геологии практически не проводилось. При этом существующие результаты исследований получены в рамках исследований рудного материала при изучении вопросов обогащения и геотехнологии. В подтверждение этому можно привести анализ существующих классификаций техногенных грунтов в инженерной геологии, содержащейся в действующем ГОСТ 25100- 2020 [25] (таблица 1.1) и приведенной в статье Е.А. Вознесенского (таблица 1.2) [13].

В обеих классификациях условно рудный материал может быть отнесен к перемещенным или техногенно перемещенным природным грунтам, но только без учета рудоподготовки. В случае окомкования руд данные материалы должны рассматриваться как антропогенные, но в классификациях присутствуют только отходы, что не позволяет относить окомкованные руды к данной категории.

Таблица 1.1 – Инженерно-геологическая классификация техногенных грунтов согласно ГОСТ 25100-2020 [25]

Подтип	Вид	Подвид	Направленность изменений
Дисперсные несвязные грунты			
измененные в естественном залегании	физически	уплотненные (механически, водопонижением, виброуплотненные, др.)	улучшенные
		закольматированные	
		оттаянные	
	физически и физико-химически	разуплотненные	ухудшенные
		техногенно увлажненные и водонасыщенные	
		оттаявшие	
		техногенно засоленные и нефтезагрязненные	
перемещенные	насыпные	грунты планомерно возведенных массивов и насыпей	образованные
	намывные	грунты в составе земляных сооружений, гидроотвалах	
антропогенные грунты	отходы производств бытовые отходы	отвалы и гидроотвалы шлаков, золошлаков и шламов	
		свалки бытовых отходов	
	культурные слои	естественно-исторические образования	
Дисперсные связные грунты			
измененные в естественном залегании	физически	механически уплотненные	улучшенные
		оттаявшие	
		осушенные	
		разуплотненные разгрузкой напряжений	ухудшенные
		техногенно увлажненные и водонасыщенные	
		оттаянные	
	физико-химически	закрепленные вяжущими	улучшенные
		электрохимически закрепленные	
		техногенно засоленные и нефтезагрязненные	ухудшенные
перемещенные	насыпные	грунты планомерно возведенных насыпей и отвалы	образованные
	намывные	грунты в составе земляных сооружений	
антропогенные грунты	отходы производств бытовые отходы	отвалы промышленных отходов	
		свалки бытовых отходов	
	культурные слои	естественно-исторические образования	

Таблица 1.2 – Инженерно-геологическая классификация техногенных грунтов по Е.А. Вознесенскому [13]

Класс, подкласс	Тип	Подтип	Вид	Подвид	
дисперсные, несвязные (преимущественно со структурами зацепления)	техногенно измененные в естественном залегании природные грунты	физически преобразованные	улучшенные	уплотненные (механически, водопонижением, виброуплотненные и др.)	
				улучшенные гранулометрическими добавками, в т.ч. закольматированные	
				оттаянные	
		физически и физико-химически преобразованные	ухудшенные	разуплотненные разгрузкой напряжений	
				техногенно увлажненные и водонасыщенные	
				оттаявшие	
	техногенно перемещенные природные грунты	насыпные	искусственно образованные	грунты планомерно возведенных массивов, насыпей и отвалы	
				грунты в составе земляных сооружений, буртах, гидроотвалах	
		антропогенные грунты		отходы производственной деятельности	отвалы и гидроотвалы шлаков и золошлаков
					шламы хвостохранилищ
дисперсные, связные (с коагуляционными и смешанными конденсационно-коагуляционными структурами)	техногенно измененные в естественном залегании природные грунты	физически преобразованные	улучшенные	механически уплотненные	
				оттаявшие	
				осушенные	
		физико-химически преобразованные	ухудшенные	разуплотненные разгрузкой напряжений	
				техногенно увлажненные	
				оттаянные	
	техногенно перемещенные природные грунты	физико-химически преобразованные	улучшенные	закрепленные вяжущими (инъекционно, перемешиванием, др.)	
				электрохимически закрепленные	
		насыпные	ухудшенные	техногенно засоленные и нефтезагрязненные	
				антропогенные грунты	отходы бытовой и производственной деятельности
	грунты в составе земляных сооружений				
	шламы, фосфогипс, лигнин, дефека				
	грунты полигонов твердых бытовых отходов				
				культурные слои	

Ранее автором уже отмечалось в работах [131, 132], что при рассмотрении существующих различных классификаций техногенных грунтов [39,77,108] ни одна из них не является общепризнанной и закрывающей все многообразие техногенных грунтов. Тем более, что слагающие штабели КВ рудные материалы в ходе процесса выщелачивания могут значительно изменяться по структуре и свойствам [6, 115], являясь динамической системой. Так, например, процесс самоуплотнения насыпных массивов начинается уже при формировании сооружения и может продолжаться несколько лет, что в том числе учитывается при выполнении изысканий [42,99]. В связи с этим физико-механические свойства техногенных грунтов должны изучаться определенным образом в зависимости от параметров сооружения и конкретного типа руд.

Таблица 1.3 – Ориентировочное время самоуплотнения насыпных грунтов в зависимости от их состава и способа укладки грунтов в насыпь [100]

Виды насыпных техногенных грунтов	Ориентировочное время самоуплотнения, в зависимости от способа отсыпки, годы		
	Планомерно возведенные насыпи	Отвалы	Свалки
Крупнообломочные	0,2-1	1-3	2-5
Песчаные	0,5-2	2-5	5-10
Глинистые	2-5	10-15	10-30
Шлаки, формовочные земли	–	2-5	–
Золы, колошниковая пыль	–	5-10	–

Согласно части III СП 11-105-97 [100] грунты, изменяющие свою структуру и свойства в результате замачивания, динамических нагрузок и других видов внешних воздействий, обладающие неоднородностью и анизотропией (физической и геометрической), склонные к длительным изменениям структуры и свойств во времени, должны рассматриваться как специфические, также к ним относят и техногенные грунты.

Д. М. Шестернёв, В. П. Мязин и С. Б. Татауров внесли значительный вклад в изучение некоторых типов руд, используемых в технологии КВ [115]. В своих исследованиях они разработали подходы к лабораторным испытаниям,

направленным на анализ изменений фильтрационных характеристик агломерированной руды с применением физических моделей штабеля КВ [115].

Физическим моделированием окомкованных руд месторождения «Погромное» рудника «Апрелково», расположенного в Забайкальском крае, они доказали, что уменьшение количества крупнообломочных частиц приводит к уменьшению скорости фильтрации по экспоненциальной кривой (рисунок 1.8):

а) в песчаных грунтах приводит к уменьшению коэффициента фильтрации от 35 до 0,5 м/сут;

б) в супесчаных грунтах соответственно от 0,15 до 0,005 м/сут;

в) в суглинистых грунтах от 0,04 до 0,0014 м/сут.

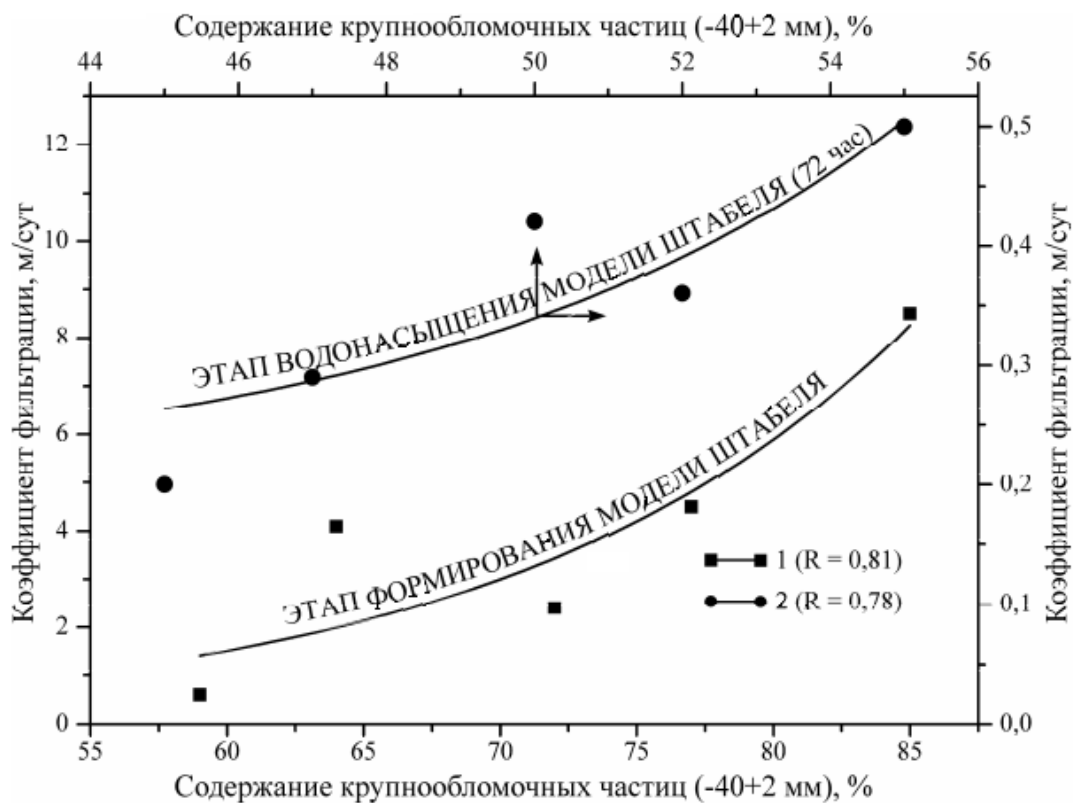


Рисунок 1.8 – Изменения коэффициента фильтрации окомкованной руды (окатыши 40 ± 2 мм), изготовленной из руды слоя криогенеза месторождения «Погромное» в зависимости от содержания окатышей по глубине штабеля (Н, м):

1 – до водонасыщения; 2 – после водонасыщения [115]

В ходе исследований, выполненных Д.М. Шестерневым, В.П. Мязиным и С.Б. Татауровым [115], было установлено, что агломерированные окатыши, сформированные с добавлением 4–5 кг/т связующего материала и подвергнутые

нагрузке 68,3 кПа (6965 кгс/м²), утрачивают прочностные характеристики в сухом состоянии после водонасыщения в течение 72 суток. Дополнительно выявлено, что разрушающие усилия, действующие на окатыши при насыпной плотности окомкованной руды порядка 1500 кг/м³, формируются в пределах штабеля при превышении его высоты более 5 метров (рисунок 1.9).

На основании полученных данных авторы пришли к выводу о целесообразности повышения эффективности кучного выщелачивания (КВ) окомкованных суглинистых руд за счёт сокращения продолжительности процесса, осуществляемого преимущественно в тёплый период года, при этом рекомендовано ограничивать высоту штабелей до 5 метров [115].

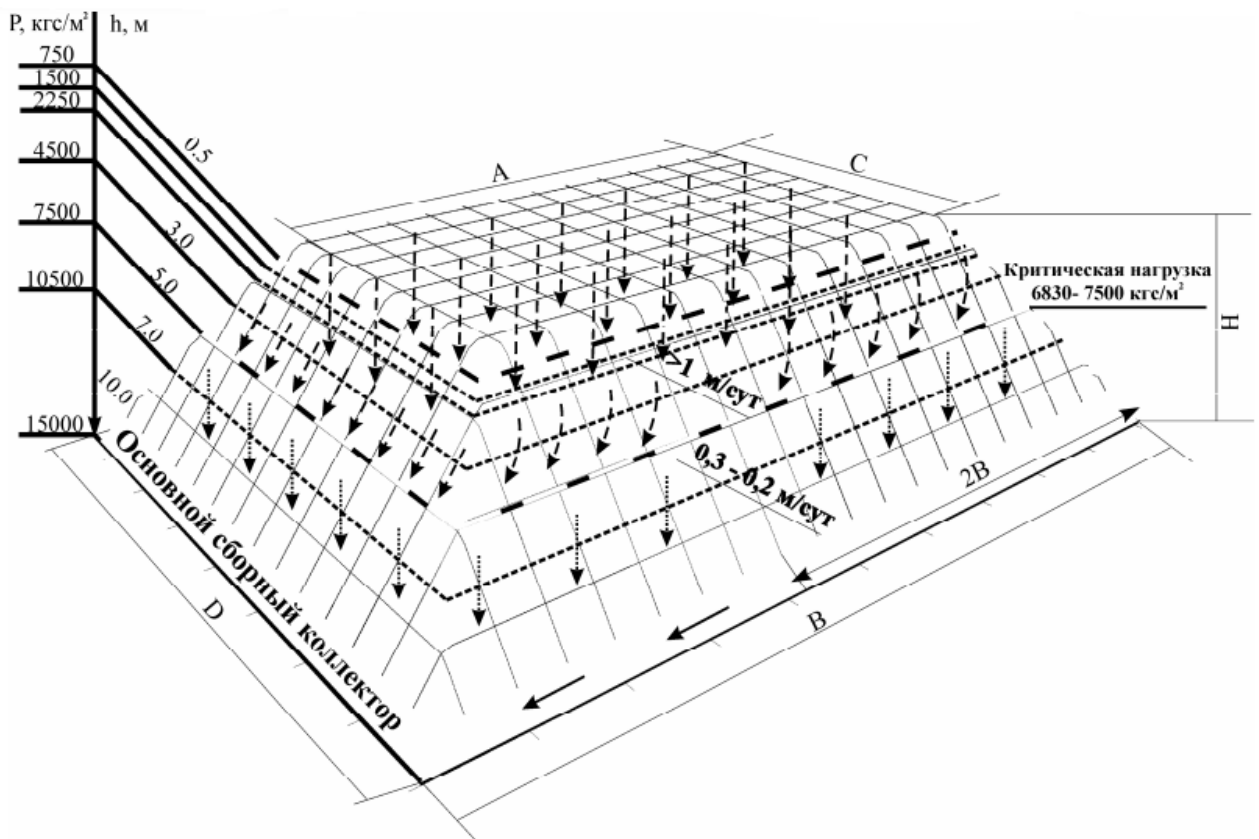


Рисунок 1.9 – Схема распределения фильтрационных потоков раствора в штабеле КВ с указанием испытываемых и критической нагрузки по глубине штабеля, при $H=10$ [115]

Исследованию прочностных и деформационных свойств минерального сырья, используемого в штабелях КВ, посвящены работы Багазеева В.К., Валиева Н.Г., Гринченко С.В. [6]. Авторы сравнивают результаты испытаний заполнителя со значениями, полученными по методике ДальНИИС [69] и делают

вывод о том, что «для оценки устойчивости откосов штабеля КВ в качестве исходных значений удельного сцепления и угла внутреннего трения можно принять значения, рассчитанные по гранулометрическому составу и физическим характеристикам отсыпаемого в штабель материала» [6].

На основе анализа проб дроблёной руды Воронцовского месторождения и эфельной фракции месторождения «Южуралзолото» Лушников Я.В. [59, 60] пришёл к выводу, что при оценке устойчивости штабелей КВ следует использовать физико-механические параметры рудного материала до стадии окомкования, полученные по схеме консолидированно-дренированных испытаний, а также полученные аналитически по гранулометрическому составу минерального сырья после дробления – до окомкования. В рамках исследования установлено, что при формировании штабеля, с использованием в подстилающем слое полиэтиленовой пленки, ее необходимо учитывать в качестве слабого контакта, который снижает устойчивость сооружения.

Смолич К.С. при исследовании месторождений Забайкалья рассматривал КВ как вероятно координированный процесс, описываемый случайными функциями [104]. В своих исследованиях он обосновал, что моделирование процесса КВ следует проводить по зонам фильтрации с учетом изменения интенсивности просачивания растворов в пределах рудного штабеля [104,105]. Он показал, что часть рудного массива остаётся вне орошения, поэтому можно повысить уровень извлечения золота за счет дополнительного орошения откосной части рудного штабеля (рисунок 1.10).

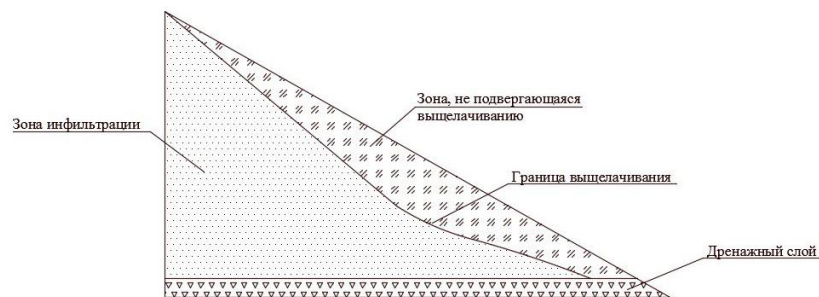


Рисунок 1.10 – Схема границы выщелачивания в откосной части штабеля [104]

Также Смолич К.С. подчеркивал значительное влияние на степень извлечения значения коэффициента фильтрации, что определяет высокую важность рудоподготовки в процессе формирования рудного штабеля [104, 105]. В том числе он рассмотрел возможность просыпания мелких частиц в пространстве между крупными для оценки возможности их перемещения вниз, что может привести к ухудшению фильтрационных параметров рудного штабеля. Для этого при условии наиболее плотной и наиболее вероятной упаковки частиц были рассчитаны соотношения диаметров, при которых процесс просыпания частиц становится возможным (Рисунок 1.11). Он определил, что в случае наиболее вероятной упаковки просыпаться будут частицы в 5 раз мельче наиболее крупной частицы [103, 105].

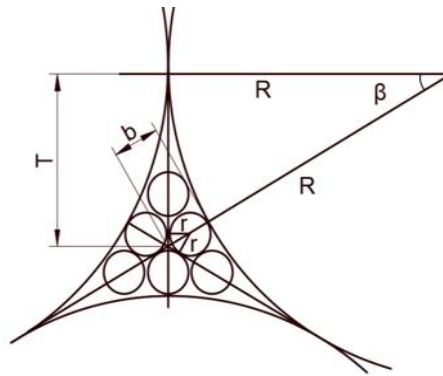


Рисунок 1.11 – Фильтрация мелких частиц через зазор между крупными частицами (наиболее плотная упаковка), где R – радиус крупных частиц, r – радиус мелких частиц, b – расстояние от центра зазора до грани крупной частицы, T – характерная высота узкого прохода между крупными частицами, через который фильтруются мелкие частицы. β – угол между прямой, соединяющей центры крупных частиц и касательной между крупными частицами [103]

В работах Яшкина И.А., Рашкина А.В. [92, 117] предлагается повышать интенсивность выщелачивания с помощью предварительной обработки отсыпаемых слоев цианидными растворами повышенной концентрации с последующей выдержкой в течение определенного времени. Яшкин И.А. свои исследования проводил на рудах Савкинского золоторудного месторождения, расположенного на территории Читинской области [116]. Он обосновал необходимость физического моделирования процессов выщелачивания для более

точного определения фильтрационных параметров и степени извлечения золота [92, 116]. Для этого им был разработан стенд КВ для исследований коэффициента фильтрации при различных технологических схемах формирования рудного штабеля. Стенд представлял собой перколяционную колонну из пластиковой трубы диаметром 100 мм и высотой 900 мм с сеткой, на которую укладывается испытываемая руда, с коническим отводом и нижним патрубком для слива рабочих растворов. Данные размеры стенда позволили провести испытания при максимальном размере куска руды 20 мм. На стенде КВ при выщелачивании однородной руды им установлена закономерность изменения коэффициентов фильтрации на разных высотных участках перколяционной колонны в зависимости от времени выщелачивания (рисунок 1.12), при этом испытания проводились при условии полного водонасыщения [92, 116].

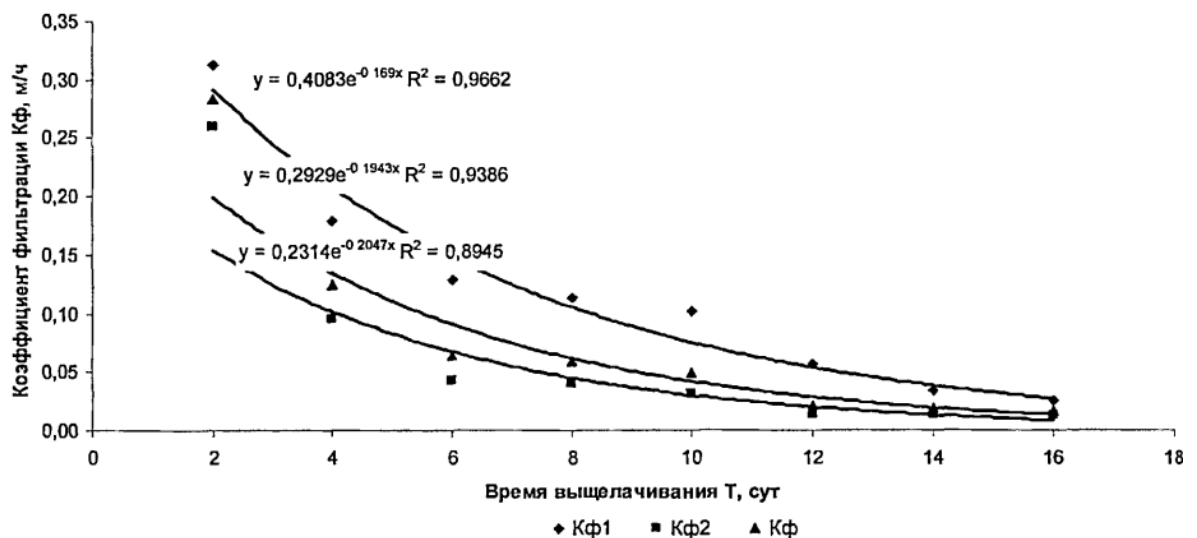


Рисунок 1.12 – Динамика изменения коэффициента фильтрации K_f на разных участках колонны по высоте в зависимости от времени выщелачивания [116]

Помимо российских исследователей, вопросами повышения эффективности КВ а также изучением ненасыщенной фильтрации при КВ занимались зарубежные авторы. Группа исследователей G.A. Sheikhzadeh, M.A. Mehrabian, S.H. Mansouri, A. Sarrafi занималась разработкой численной модели ненасыщенной фильтрации растворов выщелачивания через пористую среду окомкованных окисленных руд месторождения Sarcheshmeh Copper Complex в Иране. Исследование фильтрационных характеристик руды было выполнено с применением колонных

тестов с периодическим орошением (высота колонны — 40 см). В рамках эксперимента были определены: степень водонасыщения по высоте, коэффициент фильтрации, время выхода на установившийся режим. Разработанная модель позволяет прогнозировать условия, при которых можно добиться постоянной концентрации извлекаемых компонентов, что важно для повышения эффективности извлечения металлов [147].

Коллектив авторов V. Galla, D. van Zyl и S. Morrow из США также исследовали процессы ненасыщенной фильтрации в рудах, подлежащих КВ на основании данных крупномасштабных колонных испытаний [126]. Цель работы заключалась в экспериментальной оценке поведения фильтрационного потока в штабеле при различных режимах орошения и физико-механических характеристиках рудных масс. В качестве объектов исследования выбраны дробленая руда месторождения Rawhide и крупнообломочная руда золоторудного месторождения Cortez, помещённые в стальные колонны диаметром 1,3 м и высотой 2 м. В результате проведённых экспериментов установлено, что в крупнообломочных рудах инфильтрация выщелачивающих растворов осуществляется преимущественно по отдельным каналам, тогда как в мелкодроблёных рудах отмечается более равномерное распределение влаги в поровом пространстве. Анализ кривых водонасыщения показал экспоненциальное снижение водонасыщения после прекращения подачи раствора, что характерно для процессов естественного осушения штабеля. В результате исследований авторы подтверждают высокую эффективность использования крупномасштабных колонных испытаний для оценки гидродинамических характеристик штабелей КВ и уточнения проектных решений фильтрационного режима [126].

Анализ существующих исследований и публикаций, посвящённых вопросам применения технологии КВ для различных типов руд и месторождений, условий рудоподготовки и параметров штабелей КВ, несмотря на представленность результатов исследований и имеющийся объём накопленных данных в области обогащения и геотехнологии, показал, что проанализированные исследования

характеризуют конкретные месторождения, с определёнными операциями рудоподготовки, параметрами штабелей КВ и условиями их эксплуатации. При этом с инженерно-геологической точки зрения процессы формирования и изменения физико-механических свойств техногенных массивов штабелей КВ при их сооружения и эксплуатации исследованы слабо. Также следует отметить отсутствие обобщающих данных по результатам полевых и лабораторных исследований техногенных массивов, сложенных бедными песчано-глинистыми рудами куранахского типа.

1.5 Выводы по главе 1

1. В условиях роста запасов низкосортных и забалансовых руд наряду с сокращением объемов разведанных высококачественных золотосодержащих руд технология КВ получает широкое распространение в золотодобывающей отрасли, обеспечивая высокую эффективность извлечения металла при относительно низких капитальных затратах. Таким образом, отвалы Куранахского рудного поля с большими подтвержденными запасами золота – более 500 т и низким содержанием золота – 0,7 г/т имеют большой потенциал для применения технологии КВ на многие годы вперед. В связи с этим выбор в качестве объекта исследования техногенных массивов штабелей окомкованных песчано-глинистых золотосодержащих руд куранахского типа является обоснованным и актуальным.

2. При применении технологии КВ золота из окомкованных песчано-глинистых руд куранахского типа первостепенное значение приобретают вопросы инженерно-геологического обеспечения устойчивости техногенных массивов КВ, определяющие способность сооружения функционировать в нормальном режиме с заданными параметрами в течение всего срока службы.

3. В настоящее время проблемы формирования и изменения свойств техногенных массивов штабелей КВ при их отсыпке и эксплуатации, а также влияние факторов, определяющих устойчивость техногенных массивов, подлежащих выщелачиванию золота из окомкованных бедных песчано-глинистых руд куранахского типа недостаточно изучены и освещены в научной литературе.

4. Опыт строительства других откосных сооружений в горнодобывающей промышленности не может быть полностью использован для сооружения штабелей КВ ввиду индивидуальных особенностей подобных объектов и специфических условий их эксплуатации. На основании вышеизложенного подтверждается актуальность темы диссертационного исследования.

5. Проведенный анализ существующих исследований по теме диссертации позволил сформировать актуальную цель и задачи, требующие решения. Целью исследования является повышение устойчивости техногенных массивов из окомкованных песчано-глинистых руд на участках КВ золота при их формировании и промышленной эксплуатации. Поставленная цель диссертационной работы достигается путем решения следующих задач:

- анализ и обобщение опубликованных материалов по инженерно-геологическому изучению техногенных массивов на участках КВ золота.
- изучение состава, фильтрационных и физико-механических свойств песчано-глинистых окомкованных золотосодержащих руд куранахского типа.
- прогноз техногенного гидродинамического режима в штабеле КВ при его эксплуатации.
- оценка и прогноз развития напряженно-деформированного состояния массива штабеля на участках КВ золота.
- разработка рекомендаций по инженерно-геологическому обеспечению устойчивости техногенного массива штабеля на участках КВ.

ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ШТАБЕЛЕЙ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА В ПРЕДЕЛАХ КУРАНАХСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

2.1 Характеристика месторождений золота Куранахского рудного поля

Куранахское рудное поле относится к Алданскому горнопромышленному району Южно-Якутского региона, расположено в 35–50 км к северо-востоку от г. Алдан, простирается на 25 км с севера на юг и на 12 км с востока на запад. Схема расположения Куранахского рудного поля представлена на рисунке 2.1.



Рисунок 2.1 – Схема района расположения Куранахского рудного поля

Куранахское рудное поле включает в себя 11 месторождений золота [48,55]: «Центральное», «Порфировое», «Северное», «Новое», «Дэлбэ», «Дорожное», «Канавное», «Якокутское», «Южное», «Первухинское», «Боковое». Месторождения Куранахского рудного поля обозначены на схематической геологической карте Куранахского рудного поля рисунок 2.2.

Основной тип рудоносных пород включает золотоносные карбонатные и терригенные комплексы, находящиеся на глубине от 40 до 600 метров. Влияние геоморфологических процессов, включая активное выветривание и тектонические движения, определило сложность структурной организации месторождений. Благодаря этим особенностям на территории Куранахского рудного поля были выявлены крупные залежи золота, доступные для открытой добычи. Геологические исследования, начатые в середине XX века, позволили не только выявить запасы, но и разработать схемы рационального их освоения [2,48].

Геологическое изучение территории началось в середине XX века. Золотороссыпь на реке Большой Куранах была открыта в 1947 году, а промышленное освоение рудного поля стартовало с открытия Куранахского месторождения в 1955 году. Первая очередь горно-обогатительного комбината была запущена в 1965 году. Запасы золота в пределах рудного поля оцениваются более 500 т, что подтверждается данными за 2019 год [2, 55]. Внутренние и внешние отвалы сформированы с начала эксплуатации месторождений, причем на забалансовые и бедные руды приходится 37 959 тыс. тонн складированного материала [74].

Геологическая структура рудного поля характеризуется карстовым типом оруденения, формировавшимся на границе нижнего кембрия и нижнеюрских песчаников [74]. Золотоносные руды относятся к гидротермальному золото-кварцевому типу. Их образование связано с метасоматическими процессами, преобразующими первичные породы доюрского периода в процессе выветривания. Рудные тела характеризуются значительным ожелезнением, а также неоднородной минеральной структурой, что представлено в виде промышленных залежей и слабозолотоносного материала (рисунок 2.2) [74].

Рудные образования Куранахского рудного поля имеют форму, которая соответствует рельефу дна предюрской депрессии, располагаясь как в центре, так и по её флангам. В карбонатных породах максимальная толщина руд достигает 40 м. Длина залежей составляет несколько километров, а общая мощность продуктивного горизонта 150 м [48].

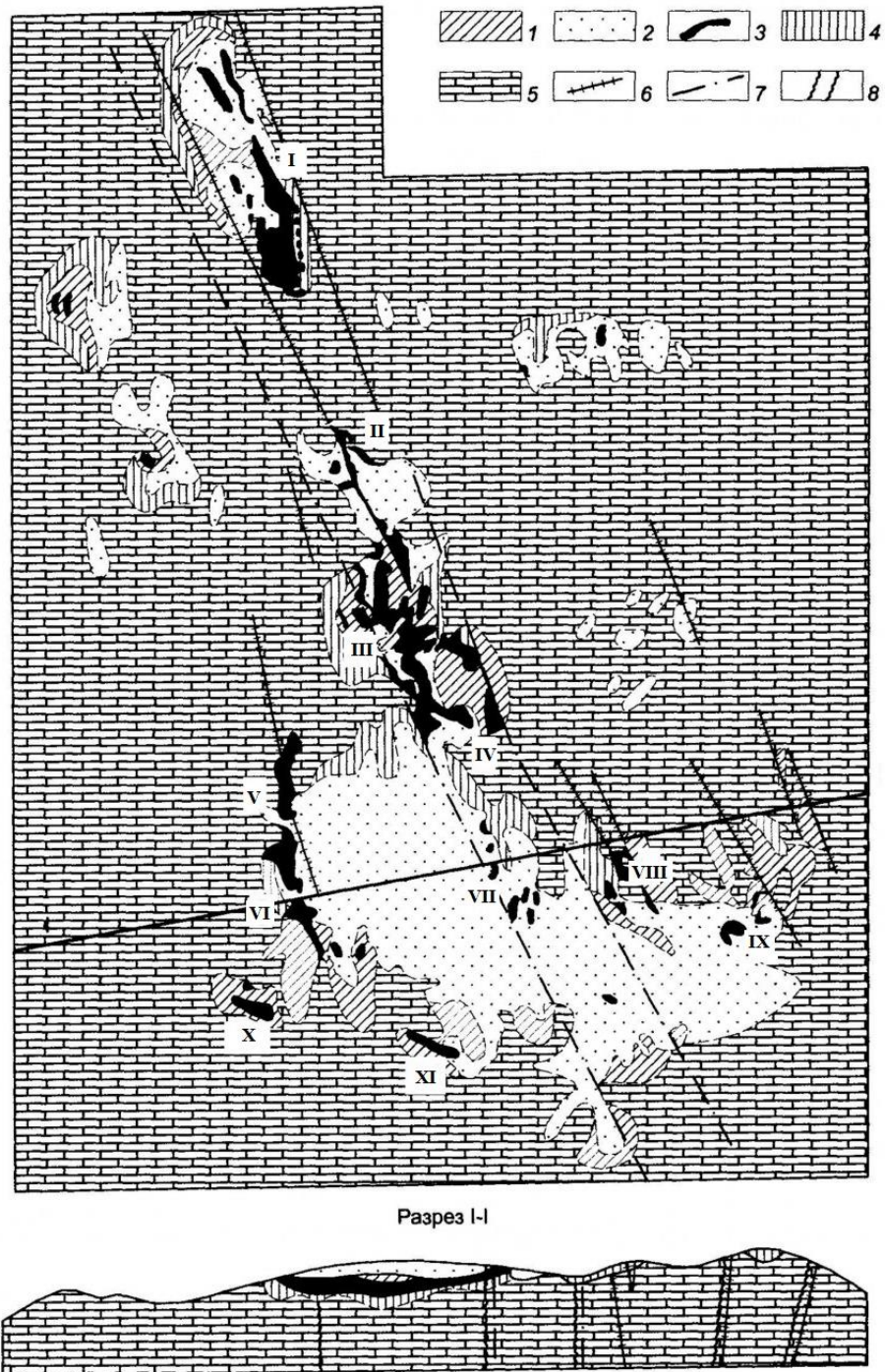


Рисунок 2.2 – Схематическая геологическая карта Куранахского рудного поля 1 - материал коры выветривания; 2 - нижнеюрские песчаники и конгломераты со слабой золотоносностью; 3-4 - отложения карстовых полостей; 3- промышленные залежи; 4 - слабозолотоносный материал доюрской и современной коры выветривания; 5 - слабокарбонатные породы нижнего кембрия; 6 - послеюрские керсантитовые дайки и лакколитообразные тела, дайки сиенит-порфиров, авгит-биотитовых порфиров; 7 - тектонические нарушения; 8 - гидротермальные жилы. Месторождения: I - Северное; II - Порфировое; III - Центральное; IV - Якокутское; V - Боковое; VI - Первухинское; VII- Кановое; VIII-Дэлбэ; IX-Дорожное; X-Южное (Залез Южная), XI- Новое [74]

На месторождениях выделено [41] два типа руд: первичные, представляющие собой метасоматиты с минерализацией, и вторичные, которые являются результатом гипергенного преобразования первичных руд постюрского периода. Окисление сульфидов, процесс каолинизации калишпатовых минералов, разрушение вмещающих пород и гравитационное перемещение материала способствовали образованию вторичных руд, элювиально-карстовых образований. В этих рудах преобладают две литологические группы: лимонитизированная глина и обломочные фракции, такие как щебень, песок, и глыбы минерализованных песчаников или известняков. Основные минералы вторичных руд включают кварц, гидрослюда, каолинит и галлуазит, тогда как второстепенные представлены монтмориллонитом, баритом, гипсом и кальцитом. Золотосодержащие минералы встречаются в виде гидрогетита, гетита, гематита, гидрогематита, псиломелана и пиролюзита, а также в небольших количествах лепидокрокита [9,74]. Характеристика гранулометрического состава месторождений Куранахского рудного поля представлена в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Гранулометрический состав руд отдельных месторождений Куранахского рудного поля [94]

Класс крупности, мм	Дэлбэ р.т.1	Дэлбэ р.т.6	Дорожное	Боковое	Канавное
	Выход класса крупности, %				
+300	0,71	7,83	1,04	2,56	5,76
-300+120	2,54	7,94	2,38	5,11	8,88
-120+80	5,33	2,06	4,28	6,50	6,59
-80+50	7,09	3,06	9,67	12,35	13,5
-50+40	2,36	12,69	3,04	3,46	3,16
-40+20	7,58	7,98	8,95	12,02	8,43
-20+10	6,66	8,66	8,23	8,93	6,92
-10+5	5,92	3,34	3,86	3,72	7,42
-5+2	8,28	76	6,37	5,06	10,11
-2+1	1,87	2,47	3,03	1,78	1,91
-1+0,5	2,40	8,51	3,69	1,56	2,38
-0,5+0,16	9,89	3,26	9,64	4,69	4,79
-0,16+0,071	5,91	2,97	4,87	3,32	2,18
-0,071+0	33,46	25,47	30,95	28,94	17,97
Итого	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Минеральный состав руд включает кварц, гидрослюда, каолинит и галлуазит, второстепенные минералы — монтмориллонит, барит, гипс и кальцит. Золото встречается преимущественно в виде мелкодисперсных агрегатов с размером частиц до 0,05 мм. Пробность золота варьируется в пределах 800–900‰, свключениями Te, Pb, Hg, Fe, Mn, Se, Cr, Sn и Cl [55].

Благодаря своему генезису на территории Куранахского узла в контурах рудоносных залежей золото распределено неравномерно, участки с высоким содержанием чередуются с убогими рудами [15]. Генезис руд Куранахского рудного поля позволяет использовать метод кучного выщелачивания для переработки низкосортного сырья.

На протяжении десятилетий территория рудного поля подвергалась интенсивным геологическим исследованиям, включая геофизическое и геохимическое картирование. Комплексный подход позволил выделить основные рудоносные зоны и уточнить параметры залежей. Одновременно было проведено детальное исследование гидротермальных процессов, которые сыграли ключевую роль в формировании рудных тел. Анализ изотопного состава пород и руд показал, что минерализация происходила в несколько этапов, что привело к высокой неоднородности рудных тел [74]. Благодаря своему генезису на территории Куранахского узла в контурах рудоносных залежей золото распределено неравномерно, участки с высоким содержанием чередуются с убогими рудами.

На основании вышеизложенного следует, что руды отвалов и месторождений Куранахского рудного поля с низким содержанием золота, имеющие неоднородную структуру с включениями обломочных фракций щебня, песчаника, глины и известняков наиболее эффективно подлежат переработке методом КВ ввиду его высокой рентабельности и пригодности для данного вида сырья. Исходный гранулометрический состав бедных песчано-глинистых руд делает процесс выщелачивания очень медленным и невыгодным, а низкая скорость просачивания растворов не позволяет провести выщелачивание в период положительных температур в условиях Крайнего Севера, что требует продолжения работ при отрицательных температурах за счет дополнительных затрат на подогрев

растворов и утепление штабеля. Поэтому для песчано-глинистых бедных руд месторождений Куранахского рудного поля с низким коэффициентом фильтрации производят их окомкование с помощью добавления цемента.

2.2 Анализ инженерно-геологических условий эксплуатации штабелей кучного выщелачивания на территории Куранахского рудного поля

В разделе приведена характеристика и анализ инженерно-геологических условий эксплуатации штабеля КВ на территории Куранахского рудного поля для действующей промышленной площадки КВ золотосодержащих руд, расположенной в пределах Куранахского рудного поля, в 38 км к северо-востоку от г. Алдана и в 9,5 км северо-восточнее п. Нижний Куранах. Руды штабеля КВ представляют собой техногенный материал, образованный методами дробления пород отвалов Куранахского рудного поля крупностью –600 мм до класса –125 мм и их окомкования с добавлением цемента. Производительность площадки штабеля КВ по руде более 1500 тыс. т в год. Подтвержденные запасы на территории, подлежащие добыче, составляют более 500 т золота [2, 55, 94]. Характеристика исходных руд отвалов Куранахского рудного поля представлена в разделе 2.1, описание технологических процессов КВ, определяющих формирование и эксплуатацию штабелей КВ, изложено ниже в разделе 2.3.

Рельеф местности расположения промышленной площадки в пределах Куранахского рудного поля представлен мягкими, сглаженными формами. Высота абсолютных отметок варьируется от 500 до 700 м, в то время как водоразделы поднимаются на 150-200 м над уровнями пойм рек. Абсолютные отметки поверхности на территории промышленной площадки изменяются от 423 до 502 метров. Поверхность участка неровная; на большей части территории она нарушена – спланирована и отсыпана насыпными грунтами [107].

Климат на рассматриваемой территории резко континентальный, с продолжительной холодной зимой и коротким, относительно тёплым летом. Абсолютная минимальная температура воздуха –51 °С (январь), тогда, как абсолютная максимальная – +35 °С (июль). Средняя температура воздуха по году,

по данным ближайшей метеостанции, составляет $-6,2^{\circ}\text{C}$ (рисунок 2.3, таблица 2.2)
Длительность зимнего периода 7–8 месяцев, когда сохраняется устойчивый снежный покров [102, 107].

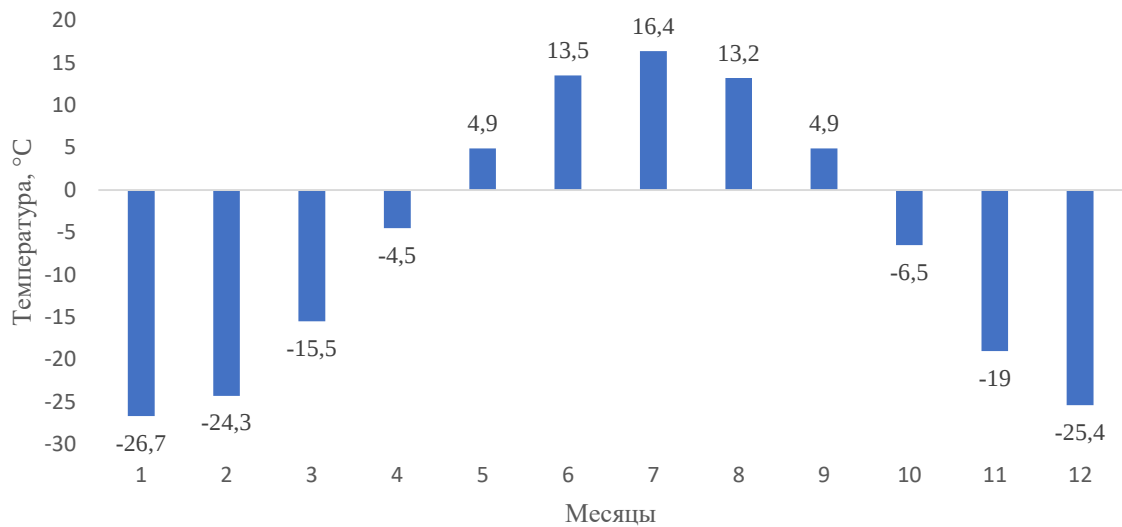


Рисунок 2.3 – Средняя температура воздуха в районе производства работ

Таблица 2.2 – Средняя температура воздуха по месяцам [107]

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$	-26,7	-24,3	-15,5	-4,5	4,9	13,5	16,4	13,2	4,9	-6,5	-19,0	-25,4

Среднее количество осадков варьируется в диапазоне 24–106 мм в месяц.
Наиболее благоприятным периодом для проведения горных работ и КВ является май–сентябрь (рисунок 2.4, таблица 2.3).

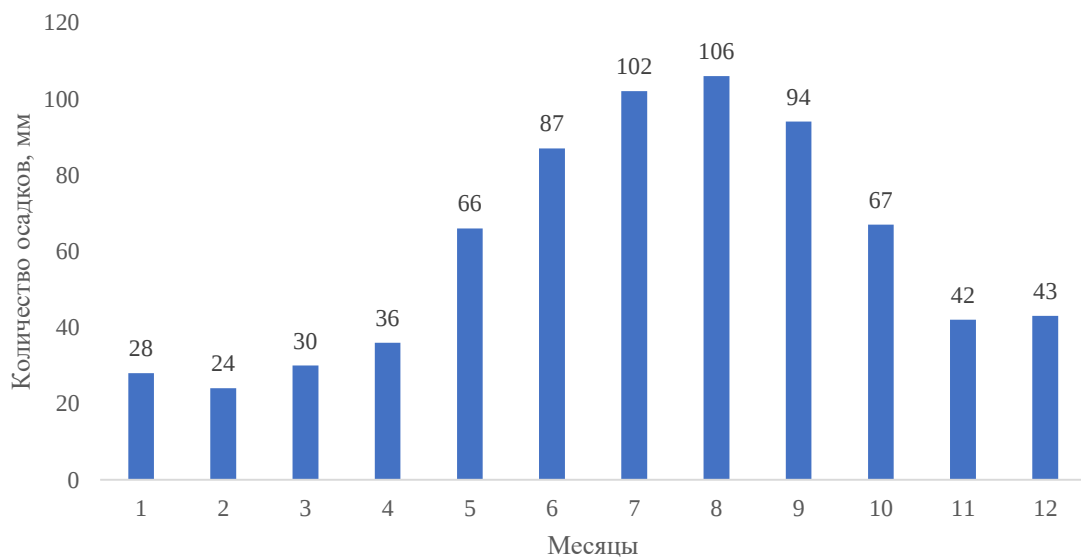


Рисунок 2.4 – Среднее количество осадков в районе производства работ

Таблица 2.3– Среднее количество осадков [107]

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Количество осадков, мм	28	24	30	36	66	87	102	106	94	67	42	43

Рассматриваемая территория ведения работ находится в зоне острawanного распространения многолетнемерзлых пород и сложена талыми грунтами [7]. Глубина слоя сезонного промерзания по данным бурения до 4,6 м. Нормативная глубина сезонного промерзания составляет 5,2 м [107].

Куранахское рудное поле находится на северной окраине Центрально-Алданского рудного района Алданского щита, в геологической структуре данного региона участвуют два яруса с ярко выраженными различиями: нижний – кристаллический фундамент, состоящий из смятых в складки гнейсов раннеархейского возраста, сланцев и гранитов, и верхний платформенный чехол, состоящий из горизонтально залегающих венд-нижнекембрийских карбонатных и терригенных пород юрского возраста. Фундамент и платформенный чехол имеют сеть разломов и пронизаны дайками долеритов раннемезозойского возраста, а также штоками, силлами и вулкано-плутонами средне-позднемезозойского возраста, состоящими из щелочных пород алданского интрузивно-вулканического комплекса. На рисунке 2.5 представлено геологическое строение и рудоносность Центрально-Алданского рудного района [48, 74].

В районе Куранахского рудного поля кристаллический фундамент Сибирской платформы с резким структурно-стратиграфическим несогласием перекрыт карбонатными отложениями кембрийского возраста, в основании которых расположен маломощный горизонт средне-крупнозернистых кварцевых песчаников. Затем карбонатные и терригенно-карбонатные породы кембрийского возраста несогласно перекрыты терригенными отложениями юрского возраста [74].

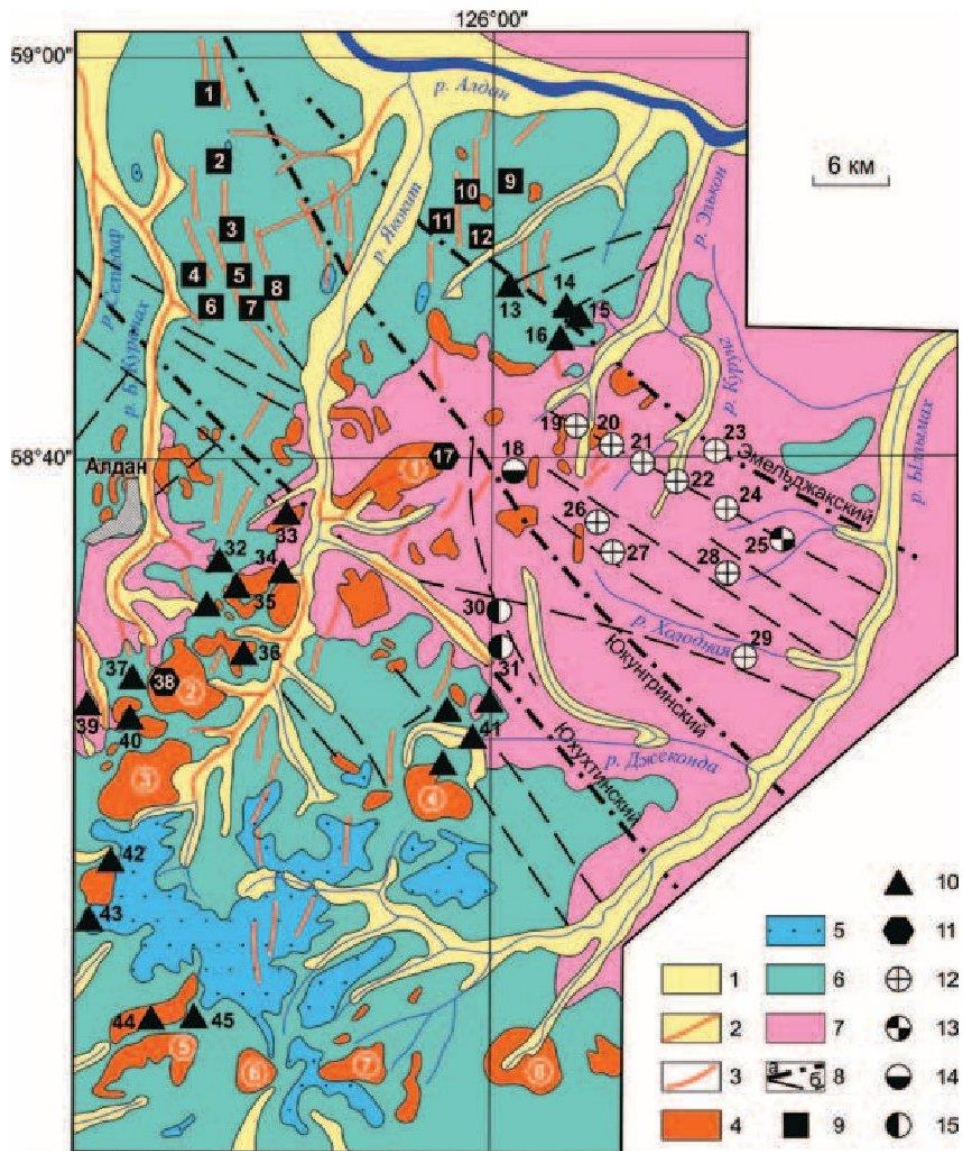


Рисунок 2.5 – Геологическое строение и рудоносность Центрально-Алданского рудного района [74] 1– четвертичные аллювиальные отложения; 2 – россыпи золота в четвертичных аллювиальных отложениях; 3 – мезозойские дайки субщелочных и щелочных гипабиссальных пород; 4 – мезозойские массивы субщелочных и щелочных plutonic пород; 5 – нижнеюрские терригенные отложения; 6 – венд-нижнекембрийские карбонатные породы платформенного чехла; 7 – архей-протерозойские кристаллические породы фундамента; 8 – тектонические нарушения (а – главные, б – второстепенные); 9–15 – геолого-промышленные типы месторождений золота и урана: 9–11 – собственно золоторудных месторождений (9 – куранахский эпитеpмальный золото-карстовый, 10 – лебединский золото-карбонатно-сульфидный, 11 – рябиновй золото-медно-порфировый), 12–15 – золото-урановых и золото-уран-молибденовых месторождений (12 – эльконский браннеритовый золотосодержащий, 13 – минеевский молибденовый урани золотосодержащий, 14 – интересный уранинитовый золотосодержащий, 15 – федоровский браннерит-золото-серебряный)[74]

Золотое оруденение куранахского типа обнаруживается в карбонатных отложениях нижнего кембрия (унгелинская и куторгиновая свиты) и располагается рядом с основанием перекрывающих алевропесчаников, песчаников и конгломератов юхтинской свиты юрского периода, находится на значительном вертикальном расстоянии 500-600 м от поверхности докембрийского фундамента [2].

Рудные тела приурочены к линейно вытянутым микрограбеновым структурам, пространственно сопряжённым с зонами региональных разломов и протяжёнными системами даек субмеридионального и северо-северо-западного простирания. В условиях мезозойской тектоно-магматической активности, охватившей территорию Куранахского рудного поля, наблюдалось интенсивное развитие низкотемпературных гидротермально-метасоматических преобразований, выразившихся в формировании гумбеитов и апокарбонатных джаспероидов. Минеральные ассоциации, характерные для данных метасоматитов, приуроченных к зонам локализации рудных тел, в значительной степени вытесняют исходные терригенные и карбонатные образования, формирующие толщу комплекса Сибирской платформы [2, 74].

В пределах рудного поля образования кристаллического фундамента не выходят на поверхность. По результатам бурения в центре Куранахского грабена было обнаружено, что фундамент залегает на глубине свыше 600 м относительно абсолютных отметок, которые соответствуют 75-80 м. На фундаменте горизонтально расположена толща карбонатных и карбонатно-глинистых пород венда и нижнего кембрия, которая имеет толщину около 600-650 м [9].

Площадка КВ расположена на склоне, угол склона изменяется в диапазоне от 2° до 30°. С точки зрения геолого-структурного строения исследуемая территория приурочена к Куранахской унаследованной блоковой впадине, сформированной нижнекембрийскими осадочными толщами унгелинской свиты. Последняя представлена преимущественно слабо нарушенными в залегании пестроцветными мергелями и доломитами, залегающими почти горизонтально [2, 74].

По результатам инженерно-геологических изысканий на рассматриваемой территории промышленной площадки объектов КВ на глубину до 11 м в геологическом строении принимают участие нижнекембрийские отложения унгелинской свиты (Є1un), перекрытые с поверхности современными и верхнечетвертичными отложениями техногенного (t QIV), озерно-болотного (lb Q III-IV) и элювиально-делювиального (ed QIII-IV) генезисов. По данным изысканий (были произведены в зимний период) на площадке КВ выделено 7 инженерно-геологических элементов (ИГЭ), среди которых ИГЭ-3 располагается в основании рассматриваемого штабеля КВ [107].

ИГЭ-1 — насыпной галечниковый грунт средней степени водонасыщения, образован в результате отсыпки технологической автодороги и хозяйственной деятельности на участке работ. Состоит из галечникового и гравийного грунтов, количество супесчаного и суглинистого заполнителя составляет около 16-31%, реже представлен щебенистым грунтом с супесчаным заполнителем до 22%. Обломочный материал представлен гравием и галькой метаморфическими и магматическими породами средней прочности и прочными. Влажность грунта 0,10 д.е. Нормативные характеристики: плотность грунта 2,04 г/см³, удельное сцепление — 0,002 МПа, угол внутреннего трения — 43°, модуль деформации — 50МПа. Расчётное сопротивление основания 0,18 МПа [107].

ИГЭ-2 — суглинок дресвяный, слабозаторфованный, слабольдистый, мягкопластичный. Обломочный материал представлен доломитом от малой до средней прочности. Влажность грунта 0,25 д.е. Плотность грунта 1,71 г/см³. Нормативные значения: удельное сцепление — 0,020 МПа угол внутреннего трения — 18° модуль деформации — 6 МПа. Расчётное сопротивление основания 0,10 МПа [107].

ИГЭ-3 — суглинок дресвяный с примесью торфа, слабольдистый, мягкопластичный. Влажность грунта: от 0,15 до 0,26 д.е., нормативное значение — 0,21 д.е. Плотность грунта: от 1,74 до 1,96 г/см³. Нормативные характеристики: удельное сцепление — 0,019 МПа, угол внутреннего трения — 20°. Модуль деформации — 7 МПа. Расчётное сопротивление основания 0,18 МПа [107].

ИГЭ-4 – дресвяный грунт с суглинистым мягкопластичным заполнителем до 32–47%; Влажность грунта: от 0,09 до 0,17 д.е., нормативное значение – 0,11 д.е. Плотность грунта: от 1,93 до 2,16 г/см³. Нормативные характеристики: удельное сцепление – 0,001 МПа, угол внутреннего трения – 40°. Модуль деформации – 40 МПа. Расчётное сопротивление основания: 0,35 Мпа [107].

ИГЭ-5 – доломит очень низкой прочности, средней степени водонасыщения. Влажность грунта: от 0,04 до 0,30 д.е., нормативное значение – 0,11 д.е. Плотность грунта: от 1,87 до 2,21 г/см³ [107].

ИГЭ-6 – доломит средней прочности, размягчаемый Плотность грунта: от 2,41 до 2,70 г/см³. Временное сопротивление одноосному сжатию в водонасыщенном состоянии: от 18,2 до 49,0 МПа, расчётное значение – 35,48 МПа (при $k = 0,95$). Коэффициент размягчаемости: 0,59 (грунт считается размягчаемым) [107].

ИГЭ-7 – доломит прочный, размягчаемый. Плотность грунта: от 2,54 до 2,77 г/см³, расчётное значение – 2,60 г/см³ (при $k = 0,95$). Временное сопротивление одноосному сжатию в водонасыщенном состоянии: от 55,0 до 113,8 МПа, расчётное значение – 79,25 МПа (при $k = 0,95$). Коэффициент размягчаемости: 0,65 (грунт считается размягчаемым) [107].

В соответствии с картой ОСР-2015 и СП 14.13330.2018 территория г. Алдан в привязке к средним грунтовым условиям для объектов массовой застройки (карта ОСР-2015- А) относится к району с сейсмичностью 6 баллов, для объектов повышенной ответственности (карта ОСР-2015- В, С) – с сейсмичностью 7 баллов. В связи с тем, что объекты КВ относятся к объектам нормального уровня ответственности для определения сейсмичности площадки принимается карта ОСР-2015-А.

Согласно гидрогеологическому районированию, рассматриваемая территория относится к Алданскому гидрогеологическому региону второго порядка. Указанный регион характеризуется наличием массивов трещиноватых вод, дополненных наложенными водоносными бассейнами. Формирование основных гидрогеологических условий участка связано с расчленённым рельефом,

развитой гидрографической сетью и широким распространением закарстованных карбонатных пород нижнекембрийского возраста, залегающих в верхней части разреза [107].

2.3 Технологические этапы процесса кучного выщелачивания из окомкованных песчано-глинистых золотосодержащих руд куранахского типа

Ранее уже отмечалось, что технология КВ представляет собой один из наиболее эффективных методов извлечения золота из низкосортного рудного материала, в том числе для исходных песчано-глинистых руд с низкой фильтрационной способностью. Основой процесса является миграция выщелачивающего раствора через неподвижный массив руды. В результате взаимодействия раствора с химическими реагентами происходит окисление металлов, приводящее к их переходу в легкорастворимые соединения, из которых могут быть извлечены полезные компоненты [106, 114].

Рассматривается штабель КВ, расположенный на территории Куранахского рудного поля, параметры сооружения представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Параметры штабеля КВ [94]

Характеристики	Показатель
Высота яруса, м	10
Количество ярусов	4
Проектная ширина бермы, м	15
Количество панелей в первом ярусе, шт.	8
Размеры всего штабеля в плане, м	470x340
Общая емкость штабеля, тыс. тонн	7068
Продолжительность эксплуатации штабеля, дней/сезон	150
Режим работы	сезонный
Продолжительность эксплуатации панели, дней	56
Крупность материала, мм	-125
Насыпная плотность агломерированного материала, т/м ³	1,3
Угол естественного откоса агломерированного материала, град	42,5°
Коэффициент фильтрации (для доломитов), м/сут	4,332
Плотность орошения, л/(м ² сут);	240/360

Конструкция штабеля КВ представляет собой 4-х ярусное сооружение, выполненное из окомкованной руды, отсыпка которой выполняется

механизированным способом. Штабель состоит из ярусов, которые разделены на панели, определяющие размеры зоны одновременной проливки окомкованной руды. Порядок технологического процесса КВ на промышленных площадках в пределах Куранахского рудного поля представлен на рисунке 2.6. и включает этапы, описанные ниже.

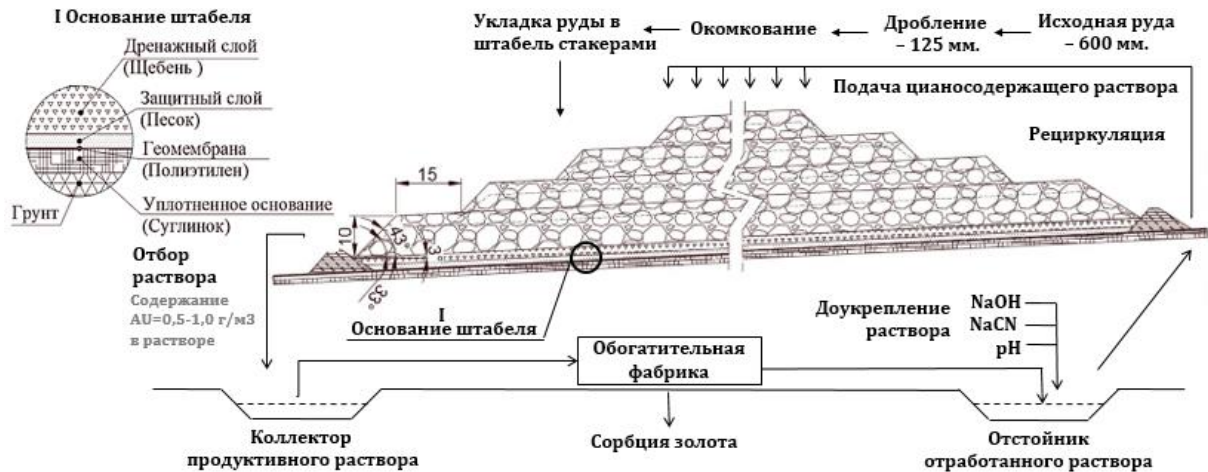


Рисунок 2.6 – Схема штабеля участка КВ в поперечном направлении

Рудный материал с карьеров и отвалов с крупностью до 600 мм подвергается дроблению до -125 мм на специализированных дробильных установках. Дробленая руда смешивается с цементом (потребность в цементе представлена в таблице 2.5), известью и водой в барабанных окомкователях для образования устойчивых агломератов, что предотвращает слёживание руды, особенно в условиях высокого содержания глинистых частиц [16, 19].

Таблица 2.5 – Потребность в цементе [94]

Реагенты	ГОСТ, ОСТ, ТУ	Удельный расход, кг/т	Расход реагентов	
			т/сутки	т/год
Портландцемент 400	ГОСТ 10178-85	7	218	32659

Увеличение расхода портландцемента больше 4,5 кг/т при окомковании рудного материала согласно результатам колонных испытаний [55] не приводит к возрастанию скорости перколяции выщелачивающего раствора (рисунок 2.7), при этом прочность материала после агломерации определяет высоту штабеля, время цикла выщелачивания и устойчивость технологического процесса [1,55].

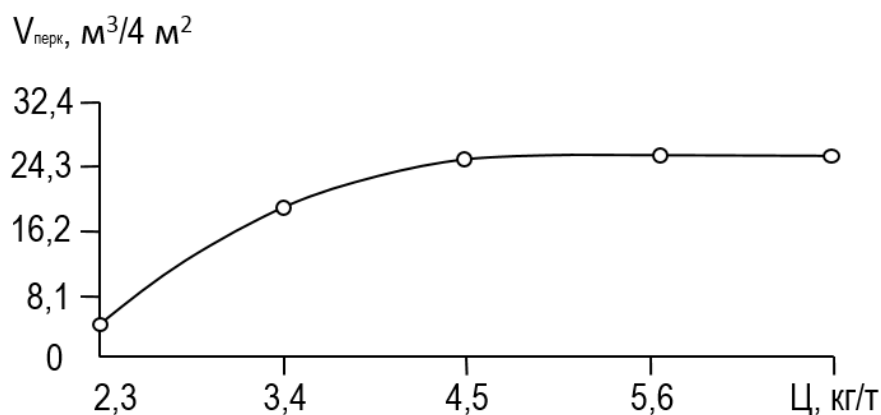


Рисунок 2.7 – Влияние количества портладцемента для окомкования материала на скорость перколяции раствора выщелачивания через колонку [55]

Процесс агломерации осуществляется в барабанных окомкователях, где поддерживается влажность материала на уровне 10–12%. Полученные агломераты должны обладать достаточной прочностью для сохранения структуры при укладке и орошении. Затем агломерированный материал укладывается слоями на гидроизолированную подушку выщелачивания при помощи стакера TS1042 (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Укладка окомкованной руды в штабель КВ при помощи стакера [80]

Основание рудного штабеля представляет собой систему, включающую гидроизоляционный слой из геомембран для предотвращения потери растворов и загрязнения геологической среды, дренажную систему из щебня и труб,

обеспечивающую сбор и отвод продуктивных растворов, а также защитный слой, предотвращающий повреждение дренажной инфраструктуры. Дренажные трубы укладываются с уклоном не менее 3° для самотечного отвода растворов в сборные коллекторы. Толщина дренажного слоя из щебня фракции 20–70 мм варьируется в среднем 1,0 м.

Руда укладывается на поверхность подушки в секции высотой до 10 м. Ширина панели штабеля составляет 75 м, длина — до 340 м. Каждая панель разделяется на ячейки для удобства управления процессами орошения и дренажа [94].

После формирования штабеля и монтажа системы орошения растворы цианида натрия равномерно подаются на поверхность штабеля для извлечения золота с заданной интенсивностью от 240 л/м²сут до 360 л/м²сут. Орошение штабеля проводится растворами цианида натрия с концентрацией от 0,2 г/л до 0,4 г/л. Растворы подаются с использованием капельных или вобблерных систем орошения, выбор которых зависит от температурных условий. Капельная система более устойчива к промерзанию и рекомендована для использования в зимний период, в то время как вобблерная система (рисунок 2.9) обеспечивает равномерное распределение раствора и используется в теплое время года [14].



Рисунок 2.9 – Работа вобблерной системы орошения на штабеле КВ [80]

В процессе выщелачивания различают три стадии:

- равномерное смачивание массива и начало реакций;
- активное выщелачивание, на которой достигается максимальная степень извлечения золота;
- довыщелачивание остаточных объемов металлов из руды.

Контроль параметров орошения осуществляется с использованием расходомеров и вентилях, установленных на каждой секции штабеля. Растворы, после прохождения через штабель и насыщенные золотом, собираются с использованием дренажной системы в основании. После этого извлеченные растворы направляются на сорбционные установки для выделения золота. Растворы циркулируют в системе до снижения содержания золота до $0,05 \text{ г/м}^3$, после чего направляются на повторное обогащение [68].

Собранные растворы направляются в сорбционные колонны, где золото извлекается с использованием активированного угля. После обработки бедные растворы возвращаются на площадку выщелачивания для доукрепления и повторного использования. Основным ограничением цикла является концентрация цианида натрия в растворах, которая не должна падать ниже $0,02\text{--}0,03\%$ [99].

Таким образом, технология КВ из окомкованных песчано-глинистых золотосодержащих руд представляет собой комплексный процесс, эффективность которого зависит от тщательной подготовки руды, правильного формирования штабеля, оптимального режима орошения и эффективной переработки продуктивных растворов. Соблюдение всех технологических этапов и учёт специфики рудного материала позволяют достичь высокой степени извлечения золота при минимальном воздействии на окружающую среду.

2.4 Обоснование расчетной схемы для определения устойчивых параметров штабеля кучного выщелачивания золота

Определение устойчивых параметров штабелей КВ основывается на вычислении коэффициента устойчивости, в зависимости от различных

геометрических характеристик сооружения, геологического строения основания штабеля, показателей физико-механических свойств, гидрогеологических условий и нагрузок от горнотранспортного оборудования [8]. При этом для штабелей КВ наиболее точными прогнозами устойчивости являются результаты, полученные с помощью численных методов моделирования, в частности, метода конечных элементов (далее – МКЭ) [118, 120, 123, 124, 149]. Это обусловлено тем, что расчет НДС с использованием МКЭ позволяет учитывать пространственные изменения в самом сооружении и его основании, вызванные, например, существенным уплотнением техногенного массива в процессе его отсыпки и последующего наращивания, в случае многоярусных штабелей КВ [23, 38, 109].

В общем виде, порядок решения задач, связанных с прогнозированием устойчивости штабелей КВ должен включать следующие основные этапы, представленные на рисунке 2.10.

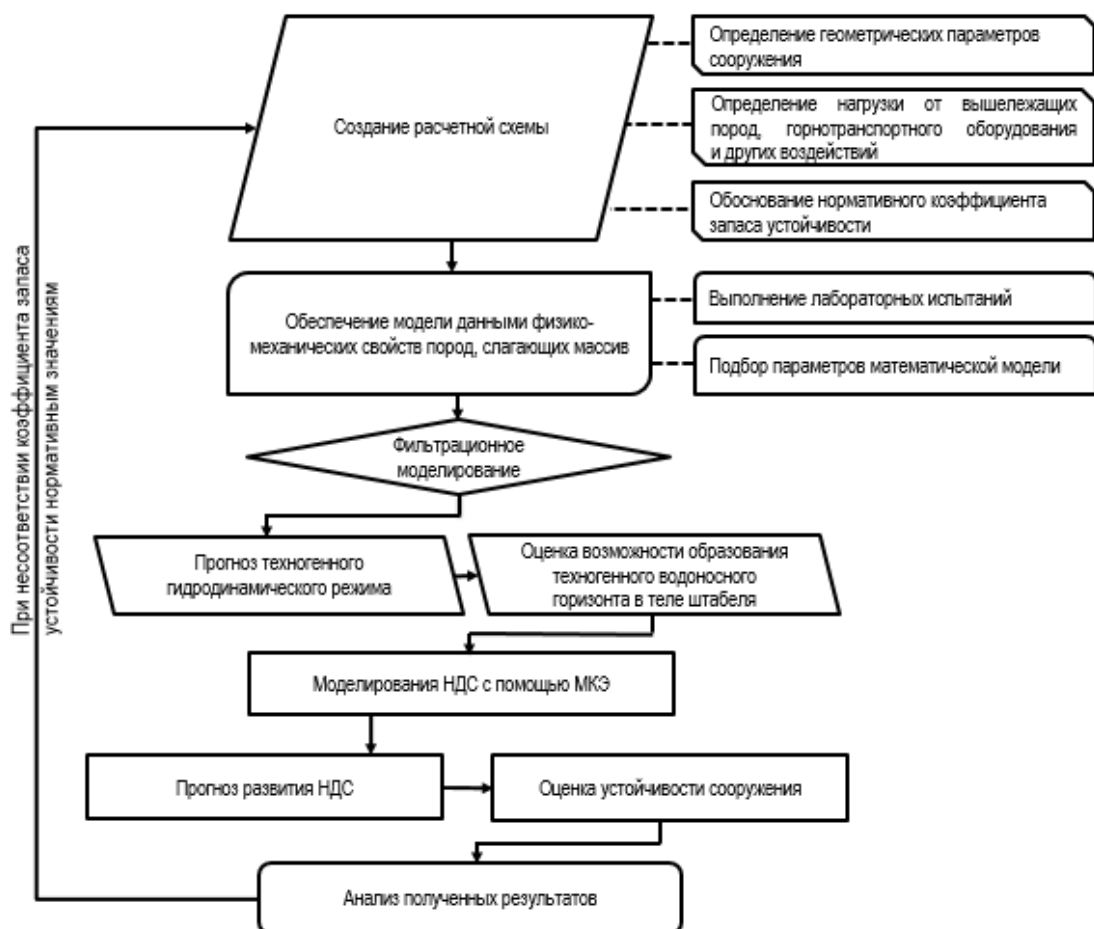


Рисунок 2.10 – Блок-схема этапов обоснования устойчивых параметров штабелей КВ

Учитывая специфику формирования и эксплуатации штабелей КВ [125], особенно в случае с орошением окомкованных песчано-глинистых руд куранхского типа, наиболее важными этапами прогноза геомеханической устойчивости являются этапы прогноза гидродинамического режима и моделирования НДС техногенного массива.

Штабель КВ должен состоять из неводонасыщенных песчано-глинистых окатышей, представляя собой трехкомпонентную систему из раствора цианида, породы и воздуха, играющих важную роль в физико-химических процессах извлечения золота [34, 44, 111]. В связи с этим при прогнозе техногенного гидродинамического режима необходимо рассматривать рудный массив по аналогии с зоной аэрации [138 - 141], а при обосновании интенсивности орошения ее значения не должны приводить к подъему уровня растворов выше кровли дренажного слоя. Отсутствие подъема уровня растворов в рудном массиве также снизит риски разрушения окатышей вследствие их полного водонасыщения и размокания, что неминуемо скажется на уплотнении массива и ухудшит его фильтрационные показатели, а также может привести к потере устойчивости.

Л.А. Ричардсом предложено модифицировать уравнение Дарси, в отношении условий ненасыщенных грунтов. Уравнение Ричардса, используемое для описания изотермического переноса грунтовой влаги под действием капиллярно-сорбционных сил и гравитации вдоль оси, направленной вертикально вниз, с началом отсчета на поверхности грунта, относится к классу дифференциальных уравнений в частных производных параболического типа. В уравнение Ричардса несколько переменных: влажность и капиллярно-сорбционное давление влаги, а также коэффициент фильтрации, зависящий от давления влаги и времени [44, 146].

Как известно, одним из важнейших гидрофизических свойств грунта является его водоудерживающая способность, которую принято описывать в форме зависимости объемной влажности почвы θ от капиллярного давления влаги ψ . Данная зависимость поддается описанию уравнением Ван Генухтена, позволяющим учитывать изменения фильтрационных свойств пористой среды от показателей водонасыщения [146, 148].

Уравнение Ван Генухтена описывает водоудерживание в широком диапазоне давлений влаги, а уравнение зависимости влагопроводности (коэффициента фильтрации) от давления влаги – уравнение Муалема (2.3) [135]. В уравнении Муалема показатель фильтрации рассчитывается в зависимости от показателя отрицательного порового давления, характеризующего способность грунта сохранять жидкость в пористом пространстве при различных значениях порового давления и от значения фильтрации при полном водонасыщении [122, 127, 136]. Уравнение Муалема использует параметры характеристики пор уравнения Ван Генухтена: n -эмпирический параметр модели, отражающий характеристику пор [65], m -параметр модели, выражается через n , α -параметр модели, функция размера пор, данные параметры могут быть приняты путем подбора при калибровке модели относительно полученных экспериментальных данных, а также могут быть приняты в соответствии со справочными значениями в зависимости от гранулометрического состава рассматриваемого породного материала [146, 153].

Таким образом, математическое моделирование распределения влаги часто использует уравнение Ричардса, которое описывает течение жидкости в ненасыщенной пористой среде (2.1) [44]:

$$\frac{\partial \theta(\psi)}{\partial t} + S(\psi) s_{stor} \frac{\partial \psi}{\partial t} - \nabla K(\psi) \nabla (\psi + z) = Q \quad (2.1)$$

При выполнении фильтрационных расчетов принята получившая наибольшее распространение на практике модель Van Genuchten – Mualem, которая позволяет описать процесс фильтрации жидкости через пористые тела в полностью или неполностью водонасыщенном состоянии.

Для зависимости $\theta(\psi)$ использована модель Ван Генухтена (2.2) [44]:

$$\theta(\psi) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha \psi|^n)^m}, & \text{при } \psi < 0; \\ \theta_s, & \text{при } \psi \geq 0, \end{cases} \quad (2.2)$$

а для коэффициента фильтрации – модель Муалема (2.3) [44]:

$$K(\psi) = K_s K_r(\psi) = K_s S_e^{0.5} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2. \quad (2.3)$$

В уравнениях (2.1-2.3) приняты следующие обозначения: θ – объемное влагосодержание; ψ – высота всасывания, связанная с приведенным напором h соотношением (2.4):

$$h = \psi + z; \quad (2.4)$$

S_{stor} – коэффициент упругости; K – коэффициент влагопереноса; θ_s, θ_r – остаточное (то есть неизвлекаемое гравитационным путем) влагосодержание и влагосодержание при полном насыщении; S, S_e – насыщенность и эффективная насыщенность, соответственно, определяемые по формулам (2.5):

$$S = \frac{\theta}{\theta_s}, \quad S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}; \quad (2.5)$$

n – эмпирический параметр модели, отражающий характеристики пор; m выражается через n по формуле $m = 1 - 1/n$; α – параметр модели, функция размера пор; K_s – коэффициент фильтрации в условиях насыщения; $K_r(\psi)$ – относительная проницаемость; Q – удельные объемные источники и стоки. Здесь и далее предполагается, что влагосодержание при полном насыщении θ_s равно пористости и плотность жидкости постоянна [44].

Принятая модель позволяет учесть изменение фильтрационных характеристик пористой среды в зависимости от степени ее водонасыщения. С целью уточнения параметров модели Ван Генухтена в дальнейшем требуется произвести верификацию численной модели по данным натурных испытаний и экспериментальных исследований, что позволит обеспечить сходимость результатов моделирования с показателями фильтрации окомкованной руды штабеля КВ.

При выполнении моделирования в соответствии с полученными показателями фильтрации руды штабеля необходимо задаться условием отсутствия полного водонасыщения руды в массиве штабеля, поскольку, как было сказано выше, при выщелачивании необходимым является наличие контакта золотосодержащей руды с кислородом, участвующим в реакции. Снижение концентрации кислорода неизбежно влечет за собой ухудшение скорости

растворения золота, в результате приводит к низким показателям извлечения полезного компонента. Такой подход позволит определить интенсивность орошения руды штабеля, при которой степень водонасыщения массива будет сохраняться в допустимых пределах. При известной интенсивности орошения массива штабеля необходимо выполнить оценку возможности дренажного слоя отводить растворы из-под штабеля без образования техногенного водоносного горизонта, превышающего мощность самого дренажного слоя.

Для описания механического поведения основания штабеля КВ для инженерно-геологических условий Куранахского рудного поля и при наличии около 1,0 м дренажного щебенистого слоя может быть принята модель Кулона-Мора, подразумевающая, что жесткость грунта основания остается неизменной, независимо от уровня бокового давления, что является достаточным для настоящей постановки задачи [81].

При выполнении расчётных обоснований геотехнических проектов с использованием МКЭ нередко предпочтение отдаётся наиболее простой из применяемых моделей – модели Кулона– Мора. Такой выбор зачастую обусловлен ограниченностью исходных данных, полученных в ходе инженерно-геологических изысканий. Популярность модели обуславливается простотой её использования как с точки зрения получаемых параметров, так и с точки зрения понимания принципов её работы. Модель отличается простотой, поскольку требует определения всего четырёх расчётных характеристик грунта: модуля общей деформации E , коэффициента Пуассона ν , сцепления c и угла трения φ . В допредельной области наблюдается упругое поведение, с предельной поверхностью, определяемой критерием Кулона– Мора. Поэтому преимущество модели заключается в меньшем количестве входных параметров, а также в простоте и ясности определяющих уравнений [17].

Соотношения между напряжениями и деформациями принимают вид (2.6):

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{pmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} \end{pmatrix}, \quad (2.6)$$

где E – модуль упругости, МПа; ν – коэффициент Пуассона.

Условие пластичности (закон трения Кулона) принимается в виде (2.7):

$$f = \tau - c - \sigma_n \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.7)$$

где τ – предел прочности по сдвигу на рассматриваемой площадке, МПа; c – удельное сцепление, МПа; σ_n – нормальное напряжение, действующее перпендикулярно рассматриваемой площадке, МПа; φ – угол внутреннего трения, град.

Обобщенное условие текучести Кулона-Мора может быть также задано с помощью шести функций текучести (рисунок 2.11), представленных в виде функций главных нормальных напряжений, например, f_{1a} в виде (2.8) [121]:

$$f_{1a} = \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_2 + \sigma_3) \sin \varphi - c \cos \varphi, \quad (2.8)$$

где σ_2 и σ_3 – главные нормальные напряжения, МПа; c – коэффициент сцепления, МПа; φ – угол внутреннего трения, град.

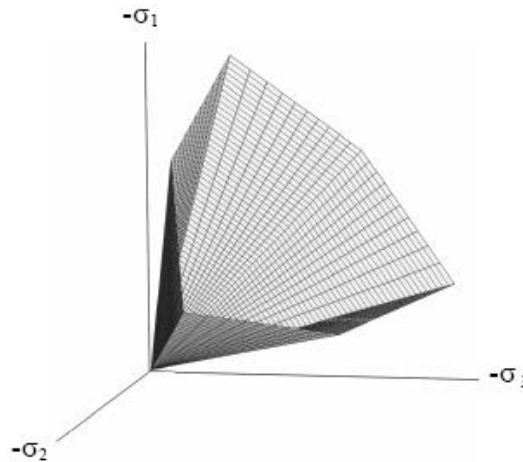


Рисунок 2.11 – Поверхность пластического течения в осях главных напряжений [121]

Применение модели поведения грунта Кулона-Мора допустимо при однократном нагружении либо разгрузке массива, в случае, когда жесткость грунта вне зависимости от параметров бокового давления является постоянной. В связи с этим использование моделей (2.7) и (2.8) невозможно для описания НДС массива, подвергающегося в ходе технологических операций циклам разгрузки, нагружения и уплотнения [120, 121, 149].

Модель упрочняющегося грунта Hardening soil model представляет собой более совершенный вариант упругопластического описания поведения грунтов, в котором наряду с прочностными параметрами требуется задание дополнительных деформационных характеристик. К числу таких параметров относятся модули деформации при первоначальном нагружении и разгрузке, одометрический модуль, а также показатель, описывающий степень зависимости жёсткости грунта от величины действующих напряжений. Эти расчётные характеристики определяются по результатам испытаний в стабилометре и одометре, проводимых при эталонных значениях напряжений. Реальные же характеристики жесткости рассчитываются в процессе моделирования по достигнутым значениям напряжений, с учетом развития напряженно-деформированного состояния грунта по гиперболической зависимости [121].

Модель упрочняющегося грунта Hardening soil model принята для описания поведения руды штабеля, поскольку отражает качественные характеристики поведения породы под различными нагрузками как в пределах нормального, до предельного, так и в критическом, предельном состоянии. Она эффективно применяется для анализа нелинейного поведения пород при нагрузках, которые не превышают предельное сдвиговое сопротивление [6, 121].

Модель упрочняющегося грунта представляет собой инструмент для оценки упрочнения различных типов дисперсных грунтов. За основу модели упрочняющегося грунта принята нелинейно-упругая модель Дункана-Ченга, описывающая гиперболическую зависимость вертикальных относительных деформаций ε_1 и компоненты девиатора тензора напряжений Q_a [121].

Модель Дункана-Ченга, основанная на двух параметрах жесткости, демонстрировала податливость грунта. Однако, в отличие от упругопластических моделей, эта гипотетическая модель не могла различать процессы нагружения и разгрузки. Это ограничение делало ее непригодной для расчетов разрушительных нагрузок в диапазоне напряжений, способствующих пластическим деформациям, что привело к тому, что ученые отказались от ее применения [147].

Модель упрочняющегося грунта вытеснила модель Дункана – Чанга благодаря применению теории пластичности вместо теории упругости, учету дилатансии и введению поверхности текучести, которая определяет границы допустимых напряжений для сохранения упругого поведения [147, 112].

В отличие от модели идеально упругопластического поведения, в модели упрочняющегося грунта поверхность текучести не остается неизменной в пространстве главных напряжений, а может изменяться и расширяться в процессе пластического деформирования. В этой модели выделяются два основных типа упрочнения: одно связано со сдвигом, другое – со сжатием. Упрочнение при сдвиге применяется для описания необратимых деформаций, возникающих под воздействием первичного девиаторного нагружения, тогда как при сжатии используется для моделирования необратимых пластических изменений, обусловленных первичным сжатием при нагружении в одометре и изотропном нагружении [147, 150, 151].

Поведение грунта описывается следующим уравнением (при условии $q_a < q_f$) (2.9):

$$\varepsilon_1 = \frac{q_a}{2E_{50}} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{q_a - (\sigma_1 - \sigma_3)}, \quad (2.9)$$

где σ_1 и σ_3 – главные нормальные максимальное и минимальное напряжения, соответственно, МПа; q_f – предельное значение компоненты девиатора тензора напряжений q_a , МПа; E_{50} – модуль деформации грунта, МПа.

При этом параметр q_a из соотношения (2.9) определяется эмпирически, а предельное значение компоненты девиатора тензора напряжений q_f , с учетом критерия прочности Кулона-Мора, можно найти по формуле (2.10):

$$q_f = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{q_a - (\sigma_1 - \sigma_3)}. \quad (2.10)$$

При нагружении поведение грунта описывается нелинейной зависимостью, а также зависит от текущего напряженного состояния. Для моделей упрочняющегося грунта часто пользуются следующей зависимостью (2.11):

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left(\frac{\sigma_3 + c \cdot \text{ctg} \varphi}{\sigma^{\text{ref}} + c \cdot \text{ctg} \varphi} \right)^m, \quad (2.11)$$

где модуль деформации грунта E_{50}^{ref} определяется при достижении девиатором q_a напряжений 50% от предельного значения по сдвигу q_f , определяемого по формуле (2.10), а величина σ^{ref} принимается равной 100 кПа (рисунок 2.12) [121].

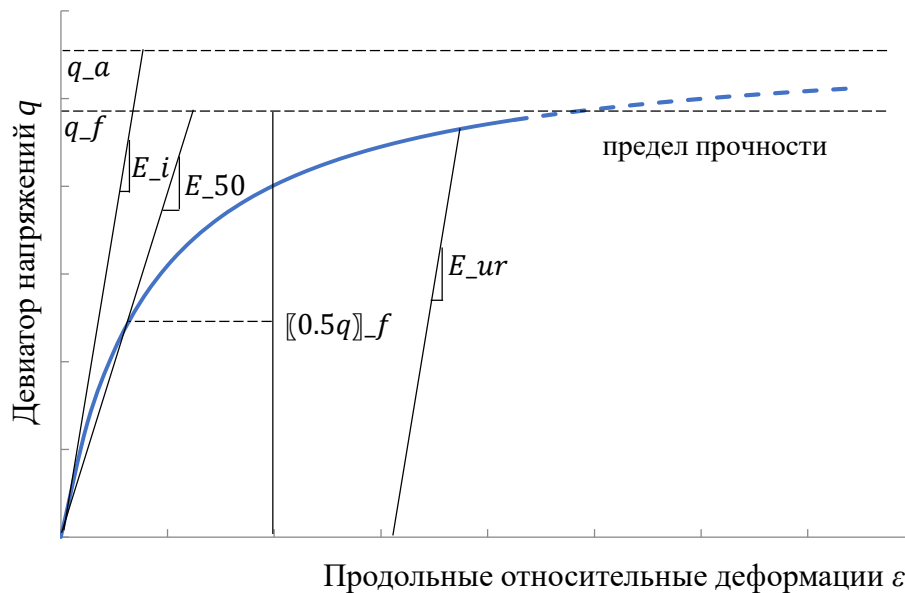


Рисунок 2.12 – Зависимость девиатора напряжений от продольных деформаций (зависимость (2.6))

Поверхность пластического течения для модели упрочняющегося грунта записывается в виде (2.12):

$$\begin{aligned}
 f_{12} &= \frac{q_a}{E_{50}} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{q_a - (\sigma_1 - \sigma_2)} - \frac{2(\sigma_1 - \sigma_2)}{E_{ur}} - \gamma^p; \\
 f_{13} &= \frac{q_a}{E_{50}} \cdot \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{q_a - (\sigma_1 - \sigma_3)} - \frac{2(\sigma_1 - \sigma_3)}{E_{ur}} - \gamma^p,
 \end{aligned}
 \tag{2.12}$$

где γ^p – объемная пластическая деформация; E_{ur} – независимый модуль упругости грунта, определяемый эмпирически, МПа.

Как упоминалось выше, модели упрочняющегося грунта (2.12), часто рассматриваются модели с двойным упрочнением при сдвиге и при объемном сжатии (рисунок 2.13). Класс таких моделей позволяет независимо друг от друга задавать упрочнение как при сдвиге, так и при сжатии [45, 118].

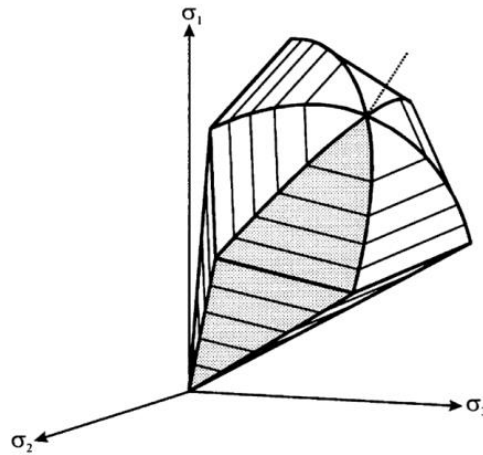


Рисунок 2.13 – Поверхность пластического течения модели упрочняющегося грунта в виде суммарной поверхности текучести в пространстве главных напряжений [121]

В соответствии с нормативным документом «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов» для отвалов песчано-глинистых пород на слабом наклонном основании нормативный коэффициент запаса устойчивости составляет 1,2 [89].

При проектировании сооружений и мероприятий инженерной защиты от опасных геологических процессов, в том числе и оползней, оползней, согласно СП 116.13330.2012 при расчете устойчивости откоса должно удовлетворяться условие (2.13) [95]:

$$\psi F \leq \frac{\gamma_d}{\gamma_n} R,
 \tag{2.13}$$

где F – расчетное значение обобщенного силового воздействия на сооружение или его конструктивные элементы (сила, момент, напряжение), определяемое в соответствии с СП 20.13330, деформации (смещения) или другие параметры, по которым производится оценка предельного состояния [101]; ψ – коэффициент условий работы, принимающий различные значения [91]; R – расчетное значение обобщённой несущей способности; γ_n – коэффициент надежности по ответственности сооружения; γ_d – коэффициент условий работы, учитывающий характер воздействий, возможность изменения свойств материалов со временем, степень точности исходных данных, приближенность расчетных схем, тип сооружения, конструкции или основания, вид материала и другие факторы устанавливается в диапазоне нормами проектирования отдельных видов сооружений.

Преобразовав формулу (2.13), получается формула для определения коэффициента запаса по устойчивости откоса (2.14):

$$k_{sf} = \psi \frac{\gamma_d}{\gamma_n}. \quad (2.14)$$

Для рассматриваемого случая величины в формуле (2.12) принимаются равными $\gamma_n = 1,1$, $\psi = 1$, $\gamma_d = 0,9$. Таким образом минимальное значение коэффициента запаса по устойчивости k_{sf} при статическом нагружении равно 1,22, что незначительно выше нормативного значения согласно нормативного документа «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов», таблица 2 [89].

При использовании МКЭ коэффициент запаса рассчитывается следующим образом. Сначала устанавливается начальное напряженное состояние, учитывающее собственный вес пород, нагрузку от сооружения, оборудования и, при необходимости, влияние сейсмических факторов. Затем с помощью итерационного метода определяются прочностные характеристики, при которых устойчивость сооружения оказывается не обеспечена. Для определения коэффициента запаса устойчивости откоса используется формула (2.15) [112,121]:

$$k_3 = \frac{c_{rm}}{c_{rm.red}} = \frac{\text{tg}_{rm}}{\text{tg}_{rm.red}}, \quad (2.15)$$

где $c_{rm.red}$, $\text{tg}_{rm.red}$ – редуцированные значения удельного сцепления, угла внутреннего трения, соответственно; c_{rm} , tg_{rm} – фактические значения удельного сцепления и угла внутреннего трения.

2.5 Выводы по главе 2

1. Золотосодержащие руды Куранахского рудного поля сформировались в корах выветривания по первичным эпитермальным рудам золотосульфидно-карстового типа и представляют собой песчано-глинистую массу кварц-лимонитгидрослюдисто-монтмориллонитового состава с включением крупнообломочного материала. Это обуславливает значительную неоднородность по составу и низкую фильтрационную способность исходного сырья, что требует предварительного окомкования материала.

2. В геокриологическом отношении территория Куранахского рудного поля расположена в зоне островного распространения многолетнемерзлых пород, что обуславливает необходимость учета деформационных свойств и сезонных изменений для обеспечения устойчивости сооружения. Основание рассматриваемой площадки КВ располагается вне зоны распространения многолетнемерзлых пород и сложена слабоуплотненными суглинками, дресвяными элювиально-делювиального генезиса с обломочным материалом, представленным доломитами от малой прочности до средней прочности.

3. Рассматриваемый объект КВ представляет собой многоярусный штабель окомкованных песчано-глинистых золотосодержащих руд куранского типа высотой 40 м с гидроизоляцией и дренажом в основании. Выщелачивание происходит в теплый сезон года, что обуславливает подбор интенсивности орошения и режима эксплуатации при условии недопущения полного водонасыщения в основании массива руд, способного вызвать разрушение окатышей, потерю фильтрационной однородности и снижение прочностных свойств.

4. Определено, что наиболее подходящей моделью для решения задач фильтрации через не полностью водонасыщенные окомкованные руды штабеля КВ является модель Ван Генухтен – Муалема (Van Genuchten – Mualem). Модель позволяет производить расчет фильтрации через пористые материалы, как в условиях полного водонасыщения, так и при фильтрации через не полностью водонасыщенные породы, а также обеспечивает учет изменений фильтрационных свойств пористой среды в зависимости от показателей водонасыщения.

5. Наиболее подходящим методом, позволяющим решать задачи по оценке устойчивости техногенного массива, в том числе с учетом нелинейного поведения пород, слагающих массив – является МКЭ. Целью выполнения расчета является комплексная оценка устойчивости штабеля КВ методом моделирования НДС массива и фильтрационных процессов в теле штабеля. Для описания поведения грунтов основания штабеля КВ принята упругопластическая модель Кулона-Мора, а для описания механического поведения окомкованной руды модель упрочняющегося грунта (Hardening soil model).

ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА И СВОЙСТВ ОКОМКОВАННЫХ РУД КУРАНАХСКОГО ТИПА

На основе материала, изложенного в предыдущих главах, и прежде всего для получения необходимых параметров для обеспечения расчетов устойчивости при подборе оптимальных параметров штабелей КВ была составлена программа экспериментальных исследований, включающая лабораторные, стендовые и полевые работы по изучению состава и свойств окомкованных руд Куранахского рудного поля. Поскольку окомкованные руды штабеля КВ можно охарактеризовать как динамическую систему, которая подвержена изменениям в течение продолжительного периода эксплуатации штабелей КВ [95], в результате которых может происходить ухудшение физико-механических свойств руды, то при проведении исследований был предложен подход, заключающийся в изучении свойств свежеекомкованных руд массива штабеля КВ рассматриваемого объекта и руд, уже выведенных из орошения растворами цианида.

Для проведения исследований с промышленной площадки на территории Куранахского рудного поля были получены пробы свежеекомкованных руд до укладки в штабель, а также пробы с участка, уже выведенного из орошения, общей массой около 3000 кг. Рудный материал был представлен золотосодержащими песчано-глинистыми рудами с включениями крупнообломочного материала карбонатных пород.

Согласно ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация» [25], окомкованная руда относится к дисперсным техногенным грунтам. В этой связи при проведении исследований применялись методики лабораторных испытаний по определению состава и свойств изучаемых руд подробно описанные в специальной технической литературе и нормативных документах, ссылки на которые представлены по тексту, в связи с чем, в дальнейшем отражены отдельные ключевые элементы методического характера, наиболее важные при определении параметров свойств техногенного материала.

3.1 Анализ гранулометрического состава

Для определения гранулометрического состава продуктов КВ из предоставленного объема материалов были отобраны по две пробы из каждой разновидности массой по 115 кг каждая. Поскольку специфику формирования штабеля КВ обуславливает наличие в исходном материале включений щебня карбонатных пород и уже окомкованной песчано-глинистой составляющей, то определение гранулометрического состава представленных проб выполнено методом грохочения и ситового анализа при сухом способе рассева. Результаты представлены в виде интегральных кривых (рисунок 3.1), а фотографии материала для всех выделенных классов больше 1,0 мм представлены в приложении В (рисунки В1-В18).

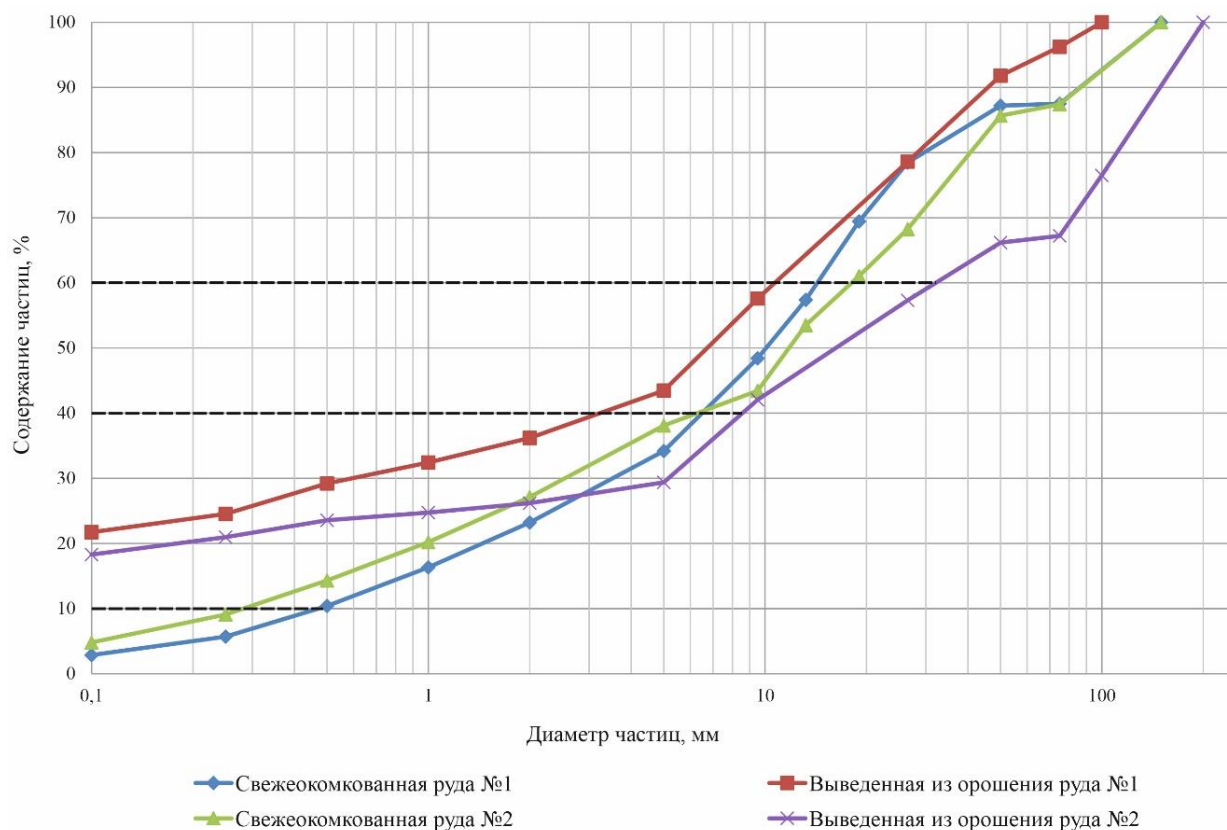


Рисунок 3.1 – Интегральные кривые гранулометрического состава окомкованных руд куранахского типа

Обе пробы имеют близкий наклон и характерное его изменение на кривой в районе 5 мм. Отличия в размерах частиц для руд до и после орошения могут быть объяснены тем, что после укладки и просачивания растворов происходит разрушение части окатышей и измельчение обломков породы под действием

растворов и давления вышележащих руд. Установленное изменение размеров частиц после орошения должно оказывать влияние на фильтрационные свойства массива.

По гранулометрическому составу представленные материалы по аналогии с природными грунтами могут быть отнесены: свежоокомкованная руда к крупнообломочным дресвяным грунтам; выведенная из орошения руда к крупнообломочным щебенистым грунтам с песчаным заполнителем. При этом необходимо отметить, что характеристика заполнителя дается по размеру частиц, а не по минеральному составу.

По степени неоднородности ($C_u = d_{60}/d_{10}$) крупнообломочных грунтов согласно ГОСТ 25100-2020 по гранулометрическому составу [25] исследуемые материалы относятся к неоднородным: свежоокомкованная – $C_u \approx 28$; выведенная из орошения руда – $C_u \approx 60$. Высокие значения степени неоднородности свежей окомкованной руды определяют возможность сегрегации рудного материала в процессе формирования штабеля КВ.

Также по степени неоднородности можно оценить опасную и безопасную зоны (рисунок 3.2) по возникновению суффозии в зависимости от градиента напора по графику В.С. Истоминой [66].

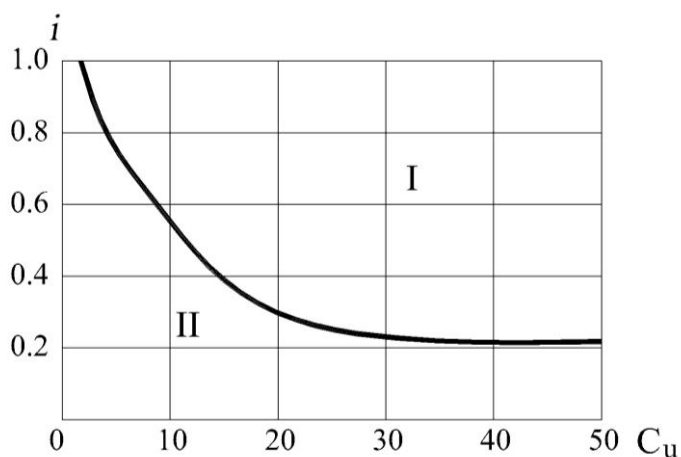


Рисунок 3.2 – График зависимости $i = f(C_u)$, i – величина гидравлического градиента, C_u – степень неоднородности грунта $C_u = d_{60}/d_{10}$; d_{60} , d_{10} – диаметры частиц 60%-й и 10%-й обеспеченности по В.С. Истоминой: I– область разрушающих и; II – область безопасных градиентов фильтрационного потока

Следовательно, в процессе нисходящей фильтрации к дренажному слою или при выходе растворов на откосную поверхность штабеля для обеих проб рудного материала могут возникнуть условия, способствующие выносу мелких частиц.

Также по результатам анализа гранулометрического состава была определена возможность просыпания мелких частиц через поровое пространство более крупных (рисунок 3.3) по методике, предложенной Смоличем К.С. [105].

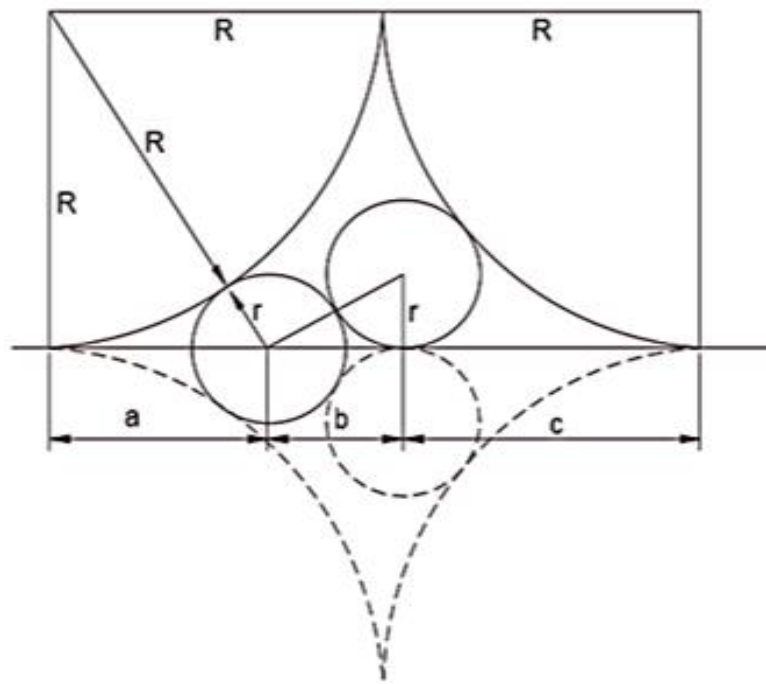


Рисунок 3.3 – Просыпание мелких частиц через зазор между крупными частицами (наиболее вероятная упаковка), где a – расстояние от центра мелкой частицы до точки касания крупных частиц, R – радиус крупной частицы, r – радиус мелкой частицы, b – расстояние между центрами мелких частиц, c – расстояние от центра мелкой частицы до точки касания крупных частиц [103,105]

Решая систему геометрических уравнений (3.1):

$$\begin{cases} a^2 = (R+r)^2 - R^2 \\ b^2 = 4r^2 - r^2 \\ c^2 = (R+r)^2 - (R-r)^2 \\ a+b+c = 2R \end{cases} \quad (3.1)$$

после ее преобразования получим уравнение вида (3.2):

$$\sqrt{2 \cdot R \cdot r + r^2} + r \cdot \sqrt{3} + 2 \cdot \sqrt{R \cdot r} = 2 \cdot R, \quad (3.2)$$

Полагая, что R – радиус крупных частиц, в соответствии с наибольшим классом выхода по гранулометрическому составу после окомкования, $R = 2,5$ мм, получаем:

$$r = 0,542$$

Соответственно, отношение радиуса крупной частицы R к радиусу мелкой r равняется 4,6. Таким образом, при укладке окомкованной руды в штабель будут просыпаться частицы в 4,6 раза меньше породы классом 5 мм. В свою очередь пространство между этими частицами будет заполнено более мелкими частицами, другими словами, функция просыпания имеет степенной характер [103].

По гранулометрическому составу для представленных образцов руды значение коэффициента фильтрации может изменяться в широких пределах. Например, в «Справочном руководстве гидрогеолога» средние значения коэффициента фильтрации для природных проницаемых галечников и гравия с мелким песком и глиной приведены в диапазоне 1-10 м/сутки [66]. Ориентировочно коэффициент фильтрации подобных материалов также можно оценить согласно графику экспериментальных значений коэффициентов фильтрации песчано-гравийно-галечниковых и щебеночных грунтов на рисунке 3.4, разработанному ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева [93].

Значение диаметра частиц, содержащихся в образце 17% по массе, равным 1,0 и 0,17 мм для проб №1 и №2, соответственно. Тогда коэффициент фильтрации составит:

Для пробы №1 свежеекомкованной руды:

- а) при рыхлом сложении 0,3-2,0 см/сек или 260-1728 м/сутки;
- б) при плотном сложении 0,05-0,3 см/сек или 43-260 м/сутки.

Для пробы №2 выведенной из орошения руды:

- а) при рыхлом сложении 0,002-0,01 см/сек или 1,7-8,64 м/сутки;
- б) при плотном сложении 0,0003-0,002 см/сек или 0,3-1,7 м/сутки.

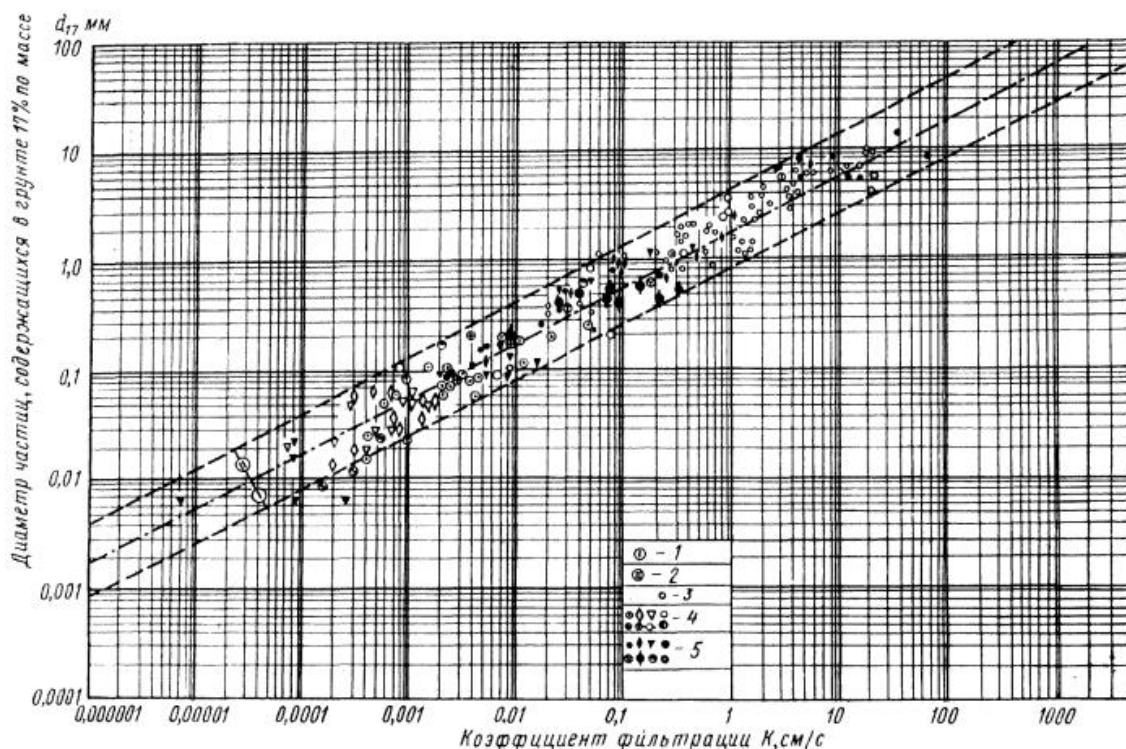


Рисунок 3.4 – График экспериментальных значений коэффициентов фильтрации песчано-гравийно-галечниковых и щебеночных грунтов по П 56-90/ВНИИГ: 1 - область рыхлого сложения; 2 - область плотного сложения [93]

Таким образом, по гранулометрическому составу представленные для изучения образцы руды косвенно можно охарактеризовать коэффициентом фильтрации в очень широком диапазоне, что требует дальнейшего уточнения лабораторными и полевыми исследованиями фильтрационных свойств окомкованной руды штабеля КВ.

Следует отметить, что по причине сложности проведения исследований с учетом реального размера крупных включений и сохранения структуры материала крупнообломочные грунты в инженерной геологии остаются менее изученными, чем песчано-глинистые разности. На это в свое время обращал внимание в 1980 г. М.П. Лысенко [64] и с тех пор ситуация существенно не изменилась.

Как правило, определяющим свойства и поведение крупнообломочных грунтов является заполнитель, представленный дисперсным грунтом < 2 мм. Заполнитель, и прежде всего его количество, определяют водопроницаемость, сжимаемость и сопротивление сдвигу крупнообломочных грунтов. Например,

согласно материалам ЛИИЖТ [64] при глинистом заполнителе зависимость угла внутреннего трения ϕ и сцепления C от процентного содержания крупнообломочной фракции N может быть представлена в виде графика на рисунке 3.5.

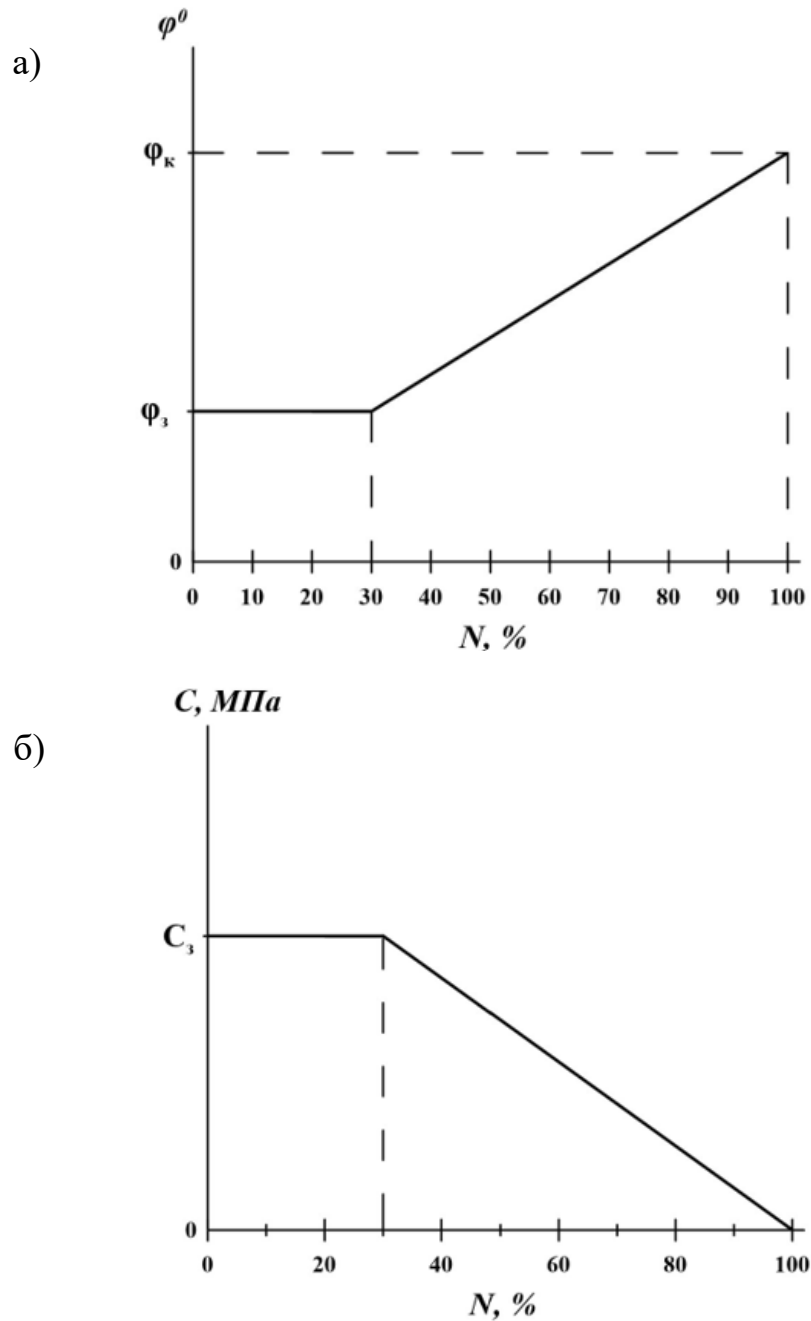


Рисунок 3.5– а) Зависимость между показателями угла внутреннего трения ϕ и C ; б) Зависимость между C и содержанием крупнообломочной фракции N , ϕ_k – угол внутреннего трения крупнообломочной фракции; ϕ_z – угол внутреннего трения заполнителя; C_z – удельное сцепление заполнителя [64]

Согласно исследованиям ВНИМИ отвальных смесей для условий открытой разработки угольных месторождений, в случае если материал представлен смесью прочных пород с каким-либо глинистым заполнителем, сопротивление сдвигу определяется материалом с более низкими физико-механическими свойствами: при содержании от 15 до 40 % глинистого заполнителя сопротивления сдвигу снижается от сопротивления сдвигу прочных пород до сопротивления сдвигу глинистого заполнителя как это представлено на рисунке 3.6 [90].

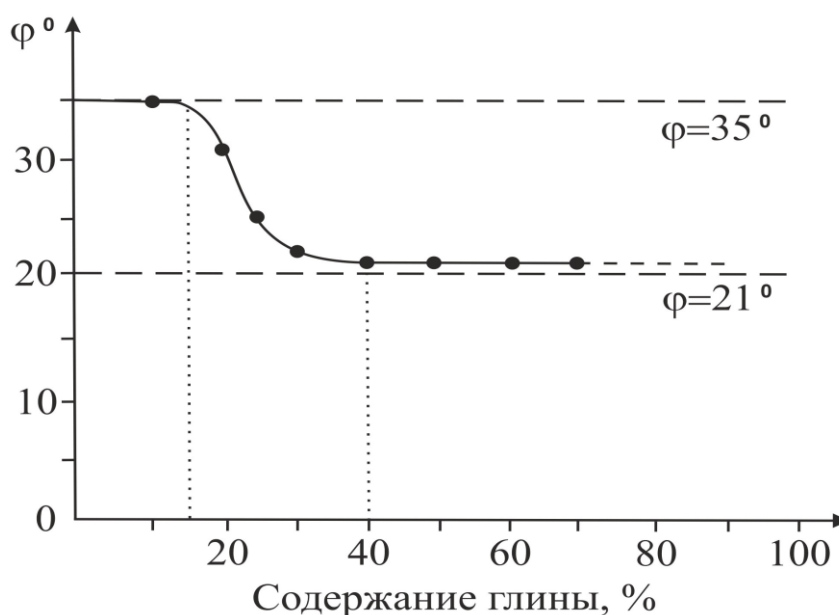


Рисунок 3.6 – Зависимость изменения угла внутреннего трения отвальной смеси от содержания глины [90]

Учитывая небольшое различие и факт изменения наклона кривой гранулометрического состава, для проведения последующих лабораторных исследований фильтрационных, деформационных и прочностных свойств с возможностью применения стандартных методик проведения лабораторных испытаний как для дисперсных грунтов для каждой пробы был выделен класс - 5 мм. Также, прежде всего изучение прочностных и деформационных свойств класса - 5 мм позволит охарактеризовать свойства штабеля КВ при сегрегации рудного материала в процессе его отсыпки.

3.2 Определение влажности, водоустойчивости и плотности при плотном и рыхлом сложении класса -5 мм

Влажность заполнителя оказывает существенное влияние на механические свойства крупнообломочных пород, а плотность будет также определять фильтрационные параметры штабеля КВ.

Для определения влажности из материала свежееокомкованной и выведенной из орошения руды были отобраны две пробы и выполнены по 10 определений влажности для каждой из них. В таблице 3.1 представлены результаты лабораторных испытаний, проведенных в соответствии с ГОСТ 5180-2015 [27], по определению влажности класса – 5 мм. Поскольку пробы были представлены в достаточно большом объеме, можно считать, что полученные значения характеризуют естественную влажность материала. При этом следует учитывать, что при протираании грунта через сито в процессе определения происходит потеря 1–2% влажности [64].

Таблица 3.1 – Результаты определения влажности класса – 5 мм исходных проб

Проба	Влажность w, %	
	Средняя отдельной пробы по 10 определениям	средняя
№1 Свежееокомкованная руда	7,5	8,1
	8,6	
№2 Выведенная из орошения руда	8,4	8,3
	8,3	

Для окомкованных руд большое значение имеет способность сохранять свое физическое состояние и прочность при увлажнении или изменении влажностного режима, характеризующая водоустойчивость материала [62]. Для оценки способности рудного материала при замачивании в воде терять свою структуру и превращаться в рыхлую массу была произведена оценка скорости размокания окатышей в составе класса -5 мм. Результаты определения представлены на рисунках 3.7 – 3.8. В обоих случаях при полном погружении под воду материал практически полностью размокал в течение двух часов.

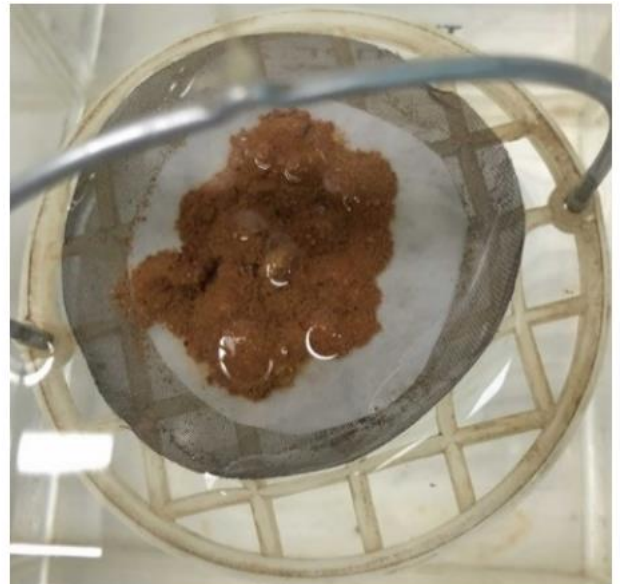


Рисунок 3.7 – Результаты испытания на размокание класса -5 мм свежеекомкованной руды спустя 2 часа 10 минут

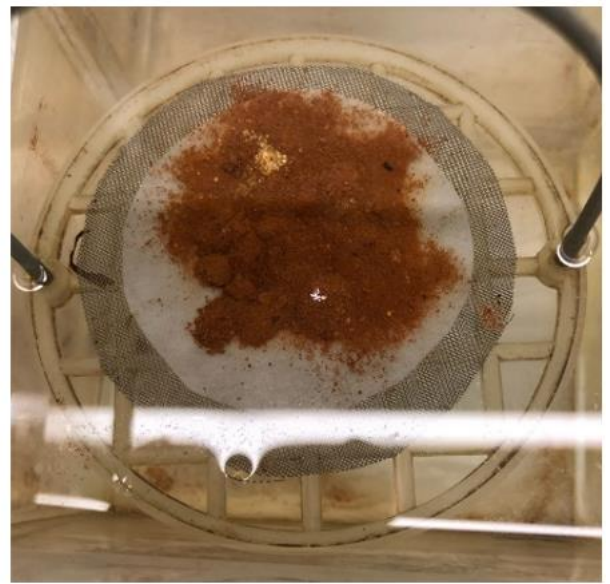


Рисунок 3.8 – Результаты испытания на размокание класса -5 мм выведенной из орошения руды спустя 2 часа 10 минут

Для возможности оценки степени плотности сложения заполнителя были выполнены определения его плотности при рыхлом и плотном сложении согласно методике, изложенной В.Д. Ломтадзе для песков [62]. Результаты определения плотности рудных материалов сведены в таблицу 3.2. Значения плотности при рыхлом сложении у выведенной из орошения руды выше примерно на одну десятую, что можно объяснить разницей в гранулометрическом составе вследствие

разрушения части материала, прежде всего окатышей, после просачивания растворов.

Таблица 3.2 – Результаты определения максимально плотностного и рыхлого сложения класса – 5 мм [29]

Проба	Плотное сложение		Рыхлое сложение	
	ρ_{max} , г/см ³	ρ_{cp} , г/см ³	ρ_{min} , г/см ³	ρ_{cp} , г/см ³
№1 Свежеокомкованная руда	1,53	1,53	1,31	1,30
	1,53		1,29	
	1,54		1,29	
	1,53	1,53	1,27	1,30
	1,51		1,30	
	1,56		1,34	
	1,61	1,59	1,23	1,20
	1,59		1,18	
	1,57		1,21	
№ 2 Выведенная из орошения руда	1,48	1,50	1,39	1,37
	1,48		1,37	
	1,54		1,35	
	1,47	1,52	1,37	1,37
	1,5		1,36	
	1,6		1,38	
	1,61	1,60	1,37	1,40
	1,52		1,42	
	1,66		1,40	

3.3 Определение коэффициента фильтрации класса -5 мм

Фильтрационные процессы, помимо влияния на сам процесс выщелачивания, также определяют устойчивость конструкции как откосного сооружения [18, 55]. При орошении штабелей КВ растворы, как и в случае с подземными водами для других откосных сооружений, участвуют в формировании напряженного состояния, определяют физико-химическое взаимодействие и характер развития деформаций во времени [142]. В этом смысле для крупнообломочных грунтов большое значение имеет фильтрационная способность заполнителя. В рамках лабораторных испытаний для определения коэффициента фильтрации класса -5 мм были использованы фильтрационный прибор (рисунок 3.9) и трубка Г.Н. Каменского (рисунке 3.10) [28, 61]. В процессе испытаний образцы

формировались при насыпной плотности, которая составила для свежееокомкованной руды $1,31-1,34 \text{ г/см}^3$, а для выведенной из орошения $1,40-1,43 \text{ г/см}^3$.

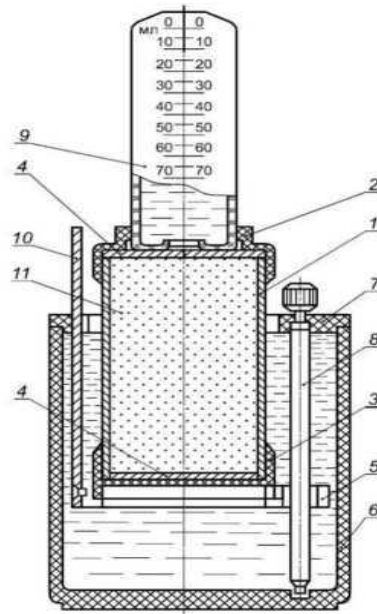


Рисунок 3.9 – Прибор определения коэффициента фильтрации песчаных грунтов при постоянном градиенте напора [25], 1 - цилиндр; 2 - муфта; 3 - перфорированное дно; 4 - латунная сетка; 5 - подставка; 6 - корпус; 7 - крышка; 8 - подъемный винт; 9 - стеклянный баллон со шкалой объема фильтрующейся жидкости; 10 - планка со шкалой градиента напора; 11 - образец породы

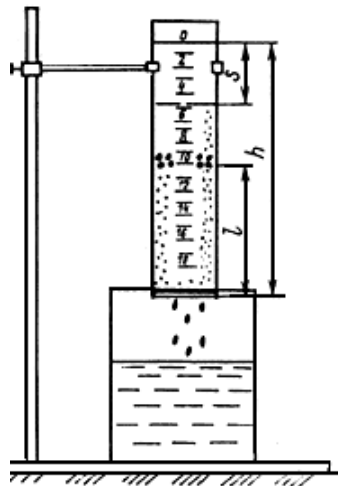


Рисунок 3.10 – Вид трубки Каменского [62]

Установленные зависимости коэффициента фильтрации класса -5 мм от времени представлены на рисунках (3.11-3.12).

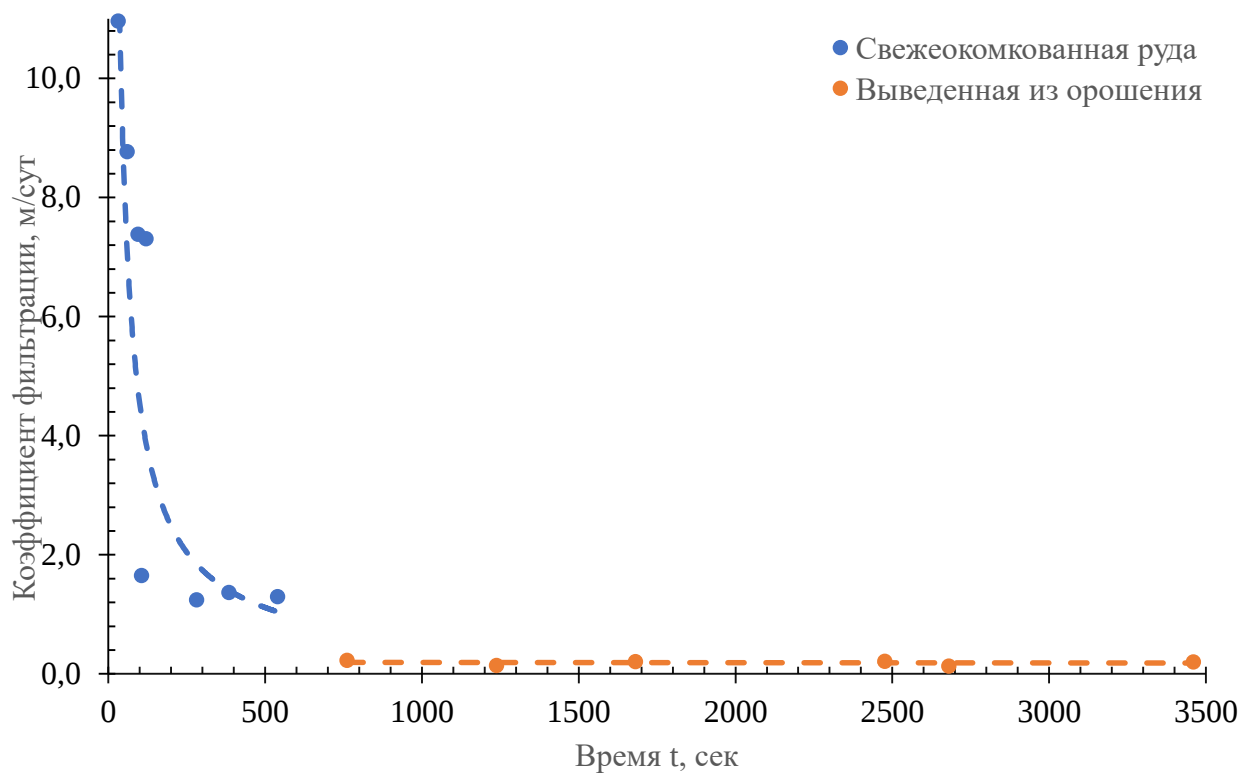


Рисунок 3.11 – Результаты лабораторных испытаний по определению коэффициента фильтрации в фильтрационном приборе

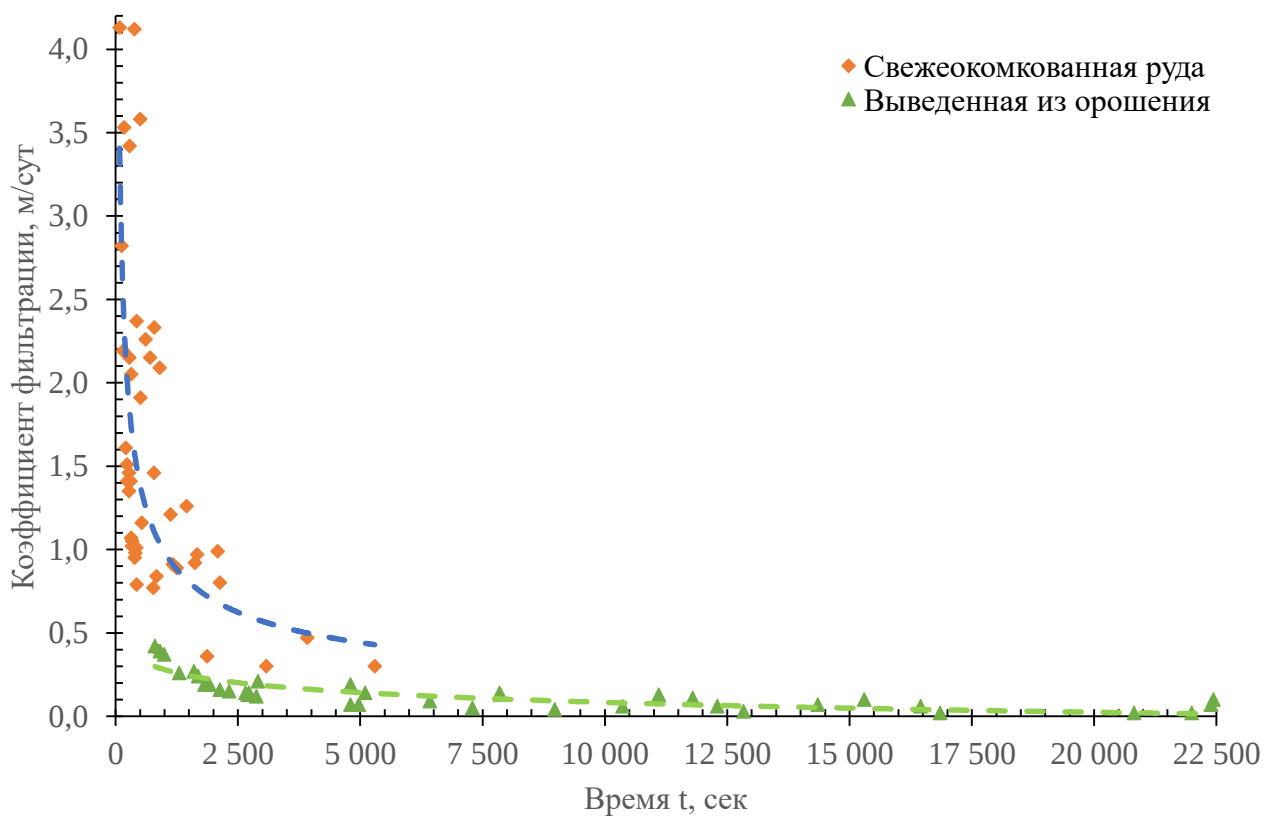


Рисунок 3.12 – Результаты лабораторных испытаний по определению коэффициента фильтрации в трубке Г.Н. Каменского

В целом испытания показали, что в обоих случаях при быстрых испытаниях без нагрузки для класса – 5 мм свежееокомкованная руда имеет коэффициент фильтрации в диапазоне от 11 до 0,25 м/сут, который в районе 500-1000 секунд приближается к значениям коэффициента фильтрации выведенной из орошения руды, составляющий менее 0,5 м/сут. При том, образцы окомкованной руды при проведения лабораторных испытаний по определению коэффициента фильтрации, при состоянии полного водонасыщения полностью размокают спустя непродолжительное время (рисунок 3.13).



Рисунок 3.13– Материал класса -5 мм после испытания в фильтрационном приборе

Различие в значениях коэффициента фильтрации можно объяснить разницей в насыпной плотности образцов, разным количеством включений, а, следовательно, и различием в размокании материала после уже проведенного орошения.

3.4 Оценка прочностных и деформационных свойств класса -5 мм

Для оценки прочностных характеристик для расчета механической устойчивости штабеля КВ были проведены испытания на одноплоскостной срез класса -5 мм по консолидированно-дренированной схеме согласно ГОСТ 12248.1-2020 [30] на оборудовании ELE International (рисунок 3.14).



Рисунок 3.14 – Оборудование для испытаний на одноплоскостной срез
ELE International

Испытания проводились при естественной влажности и при замачивании образцов класса -5 мм при диапазоне вертикальных нагрузок от 100 до 600 кПа. Всего было проведено по десять определений угла внутреннего трения и сцепления для образцов свежееокомкованной руды и руды выведенной из орошения. Результаты определения угла внутреннего трения и сцепления приведены в таблице 3.3 и на рисунке 3.15.

Анализ результатов показал, что при испытаниях с замачиванием образцов угол внутреннего трения практически не меняется $\varphi=31-33^{\circ}$, а удельное сцепление уменьшается до 29-30 кПа. Данные результаты можно объяснить большим количеством в данном классе включений обломков карбонатных пород,

как сохранившимся из исходных руд, так и появившихся после дробления в процессе рудоподготовки.

Таблица 3.3 – Результаты испытаний на одноплоскостной срез

Проба	При влажности 8%		При полном водонасыщении	
	Угол внутреннего трения, град	Удельное сцепление, кПа	Угол внутреннего трения, град	Удельное сцепление, кПа
№ 1 Свежеокомкованная руда	31	47	30	30
№ 2 Выведенная из орошения руда	33	40	31	29

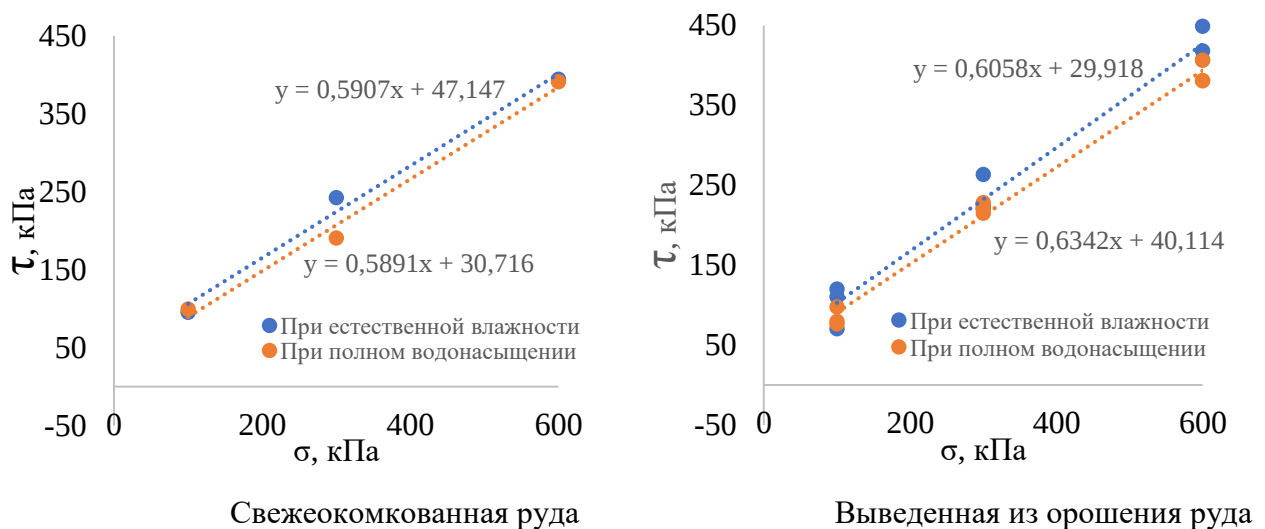


Рисунок 3.15 – Результаты испытаний на одноплоскостной срез свежоокомкованной руды и руды выведенной из орошения

Дополнительно было выполнено определение угла естественного откоса по методике РСН 51-84 [99] в воздушно-сухом состоянии и под водой при насыпной плотности рудного материала на приборах УВТ-3М и УВТ-3М малый. Результаты определения угла естественного откоса представлены на рисунке 3.16-3.17 и в таблице 3.4. В целом углы естественного откоса близки к полученным ранее углам внутреннего трения при испытаниях на одноплоскостной срез.

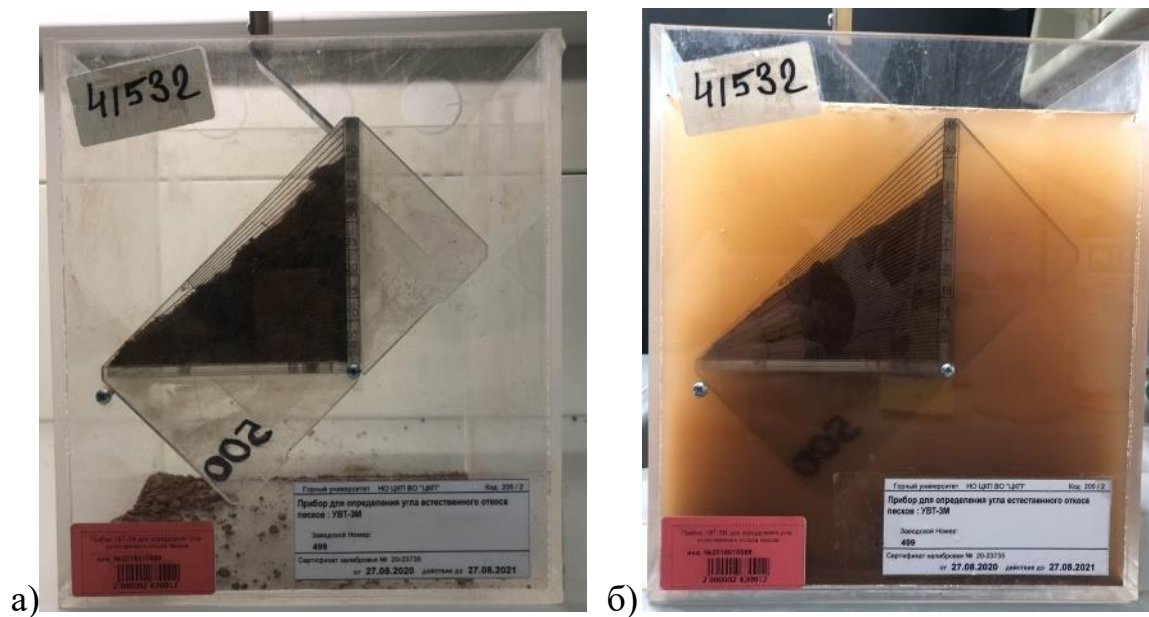


Рисунок 3.16 – Определение угла естественного откоса при помощи прибора УВТ-3М. а) в сухом состоянии; б) при насыщении водой

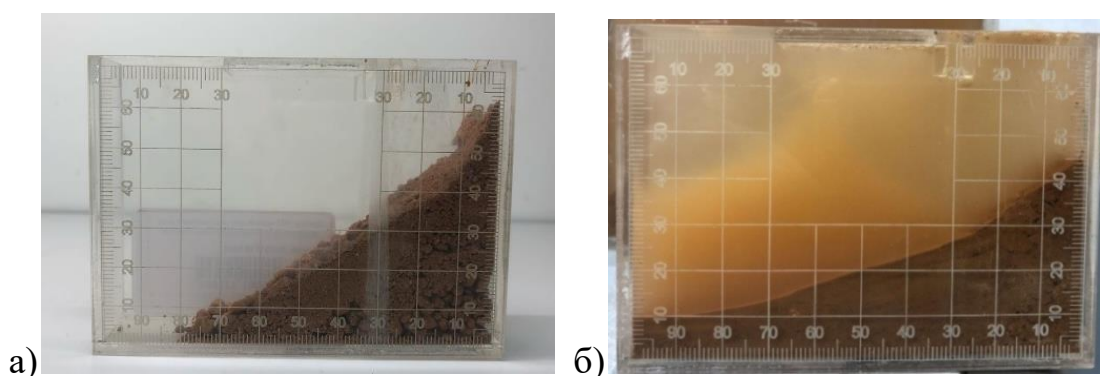


Рисунок 3.17 – Определение угла естественного откоса при помощи прибора УВТ-3М а) в сухом состоянии; б) при насыщении водой

Таблица 3.4 – Результаты определения угла естественного откоса

Проба	Угол естественного откоса ϕ при естественной влажности,		Угол естественного откоса ϕ при полном водонасыщении, градус	
	УВТ – 3М	Малая УВТ	УВТ – 3М	Малая УВТ
№1 Свежеокомкованная руда	37	37	38	30
	39	35	39	35
	38	32	38	35
	41	34	39	36
	40	36	40	28
	38	34	42	35
№2 Выведенная из орошения руда	38	33	39	34
	37	32	38	30
	36	34	39	31
	40	33	39	28
	38	36	39	30
	39	29	35	31

Определение характеристик деформируемости класса -5 мм выполнялось методом компрессионного сжатия на оборудовании ELE International (рисунок 3.18). Испытание проводилось на образцах рудного материала, до нагрузок 0,2 МПа, что приблизительно соответствует нагрузке от одного яруса. Для каждой разновидности материала выполнено по шесть испытаний.



Рисунок 3.18– Оборудование для компрессионных испытаний ELE International

Результаты компрессионных испытаний показали практически одинаковые результаты, указывающие, что материал является сильносжимаемым: одометрический модуль деформации для свежееокомкованной и выведенной из орошения руды составил 5,4-11,4 МПа.

После испытаний на компрессионное сжатие был выполнен анализ гранулометрического состава материала, результаты которого представлены на рисунке 3.19.

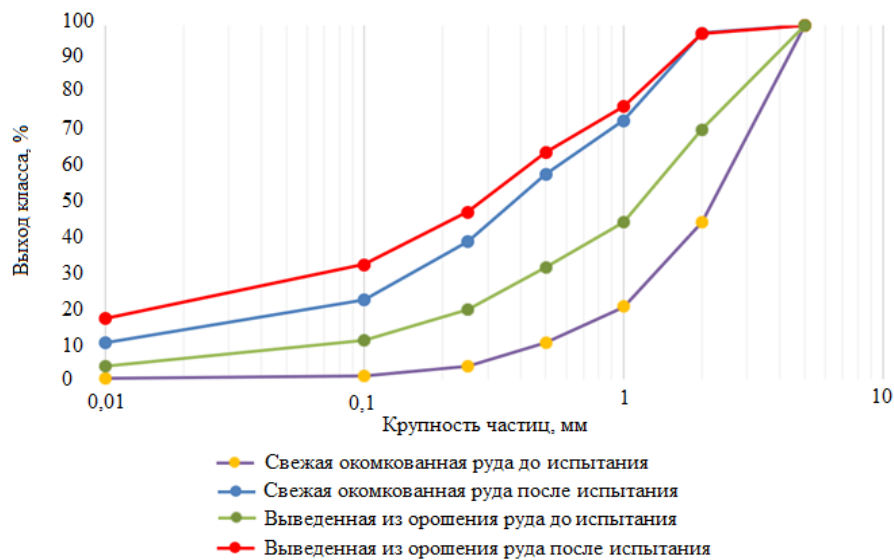


Рисунок 3.19 – Интегральные кривые гранулометрического состава класса -5 мм до и после компрессионных испытаний

По кривым гранулометрического состава отмечается увеличение доли более мелких фракций после проведения испытаний, особенно в образцах руды, выведенной из орошения, что указывает на снижение прочности материала под воздействием растворов и давления от собственного веса руд. Данные результаты необходимо учитывать, как фактор ухудшения фильтрационных свойства штабеля и режима его эксплуатации, в том числе за счет возможного выноса мелких частиц в дренажный слой в основании штабеля.

3.5 Определение прочности на растяжение отдельных включений в руде

В связи с установленным фактом разрушения частиц руды класса -5 мм для оценки возможности разрушения окатышей и включений карбонатных пород в массиве рудного штабеля были выполнены определения прочности на раздавливание по методу определения статической прочности гранул [24] для классов -10 мм, составляющих основной диапазон окомкованного рудного материала, и прочности на растяжение для классов -125 +1 мм с помощью испытания методом в соответствии с ГОСТ 21153.3-85, подразумевающим разрушение образцов произвольной формы посредством сферических инденторов [31]. Сущность метода состоит в определении предельной нагрузки, при которой происходит разрушение гранул исследуемой фракции в условиях одноосного сжатия между двумя плоскими параллельными поверхностями.

Прочность гранул вычисляют по формуле (3.3):

$$X = \frac{P}{S}, \quad (3.3)$$

где P – сила, необходимая для разрушения одной гранулы, Н; S – площадь поперечного сечения гранулы, см^2 (3.4);

$$S = \frac{\pi d^2}{4} \quad (3.4)$$

По результатам испытаний на раздавливание для классов -10+1 мм прочность окатышей составила для свежееокомкованной руды от 60 до 199 КПа а для выведенной от 32 до 92 КПа.

Суть испытаний по ГОСТ 21153.3-85 состоит в передаче разрушающей силы на образцы породы с помощью шариков, выполненных из стали размером 15 мм, которые расположены вдоль одной оси. При применении данного метода передача разрушающего усилия образцу происходит по минимальной площади контакта, почти точно.

Испытуемые образцы могут быть как правильной, так и произвольной формы с площадью поверхности разрушения от 3 до 100 см^2 в соответствии с ГОСТ 24941-81. Это обусловлено тем, что требования к испытуемым образцам значительно снижаются. Схема испытаний представлена на рисунке 3.20.

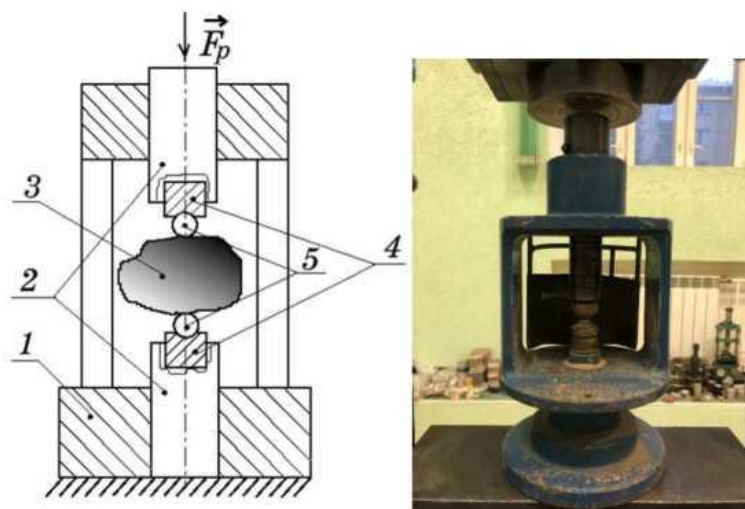


Рисунок 3.20–Установка определения предела прочности на растяжение образцов горных пород встречными сферическими инденторами [29]

1 - корпус; 2 - штоки; 3 - образец; 4 - вкладыши; 5 - сферические инденторы

Определение предела прочности на одноосное сжатие и растяжение в соответствии с формулами (3.5-3.9):

$$\sigma_{сж} = p + \sqrt{\sigma_t p}, \quad (3.5)$$

$$\text{где } \sigma_t = \frac{P}{F}, \quad (3.6)$$

$$p = \frac{P}{S}, \quad (3.7)$$

$$\sigma_p = 2\sigma_t \frac{K}{K+1}, \quad (3.8)$$

$$K = \frac{P}{\sigma_t}, \quad (3.9)$$

где P – нагрузка, кН; F – площадь поверхности разрушения образца, см²; K – безразмерный коэффициент, p – растягивающее напряжение разрыва, σ_t – минимальное главное нормальное напряжение.

В случае невозможности (либо практической нецелесообразности) определения площади поверхностей зон разрушенной породы F предел прочности $\sigma_{сж}$ предлагается вычислять по исправленным корреляционным зависимостям, или по установленным испытаниями на конкретных породах корреляционным зависимостям. В этом случае для вычисления предела прочности при одноосном сжатии предварительно вычисляют предел прочности при одноосном растяжении по формуле (3.10-3.11):

$$\sigma_p = 1,8\sigma_t \quad (3.10)$$

Для алевролитов и известняков:

$$\sigma_{сж} = 8\sigma_p \quad (3.11)$$

Для крупности классов -50 +25, -60 +50, -70 +60, +70 для измерения силы разрушения образцов произвольной формы был использован индикатор нагрузок непосредственно на прессе.

Для крупности классов -2 +1, -5 +2, -10 +5, +10 для измерения силы разрушения образцов произвольной формы был использован динамометр на 50 кг.

Для каждого испытываемого класса в случайном порядке отбиралось не менее 20 образцов, в общей сложности было выполнено порядка 180 испытаний для каждой из видов руд: свежей окомкованной и выведенной из орошения.

Результаты определения при естественной влажности пород, представлены в таблице 3.5 и на рисунках 3.21-3.22.

Таблица 3.5 – Результаты определения прочности на растяжение при естественной влажности

Проба	Класс крупности, мм	Прочность на растяжение, МПа		Прочность на сжатие, МПа	
		минимальное значение	максимальное значение	минимальное значение	максимальное значение
№1 Свежеокомкованная руда	-2+1	0,4	1,8	3,2	14,4
	-5+2	0,5	14,9	4	119,2
	-10 +5	0,6	1	4,8	8
	-25+10	0,2	6,5	1,6	52
	-50+25	0,2	6,8	1,6	54,4
	-60+50	0,4	2,6	3,2	20,8
	-70+60	0,7	3,1	5,6	24,8
	+70	0,4	1,4	3,2	11,2
№2 Выведенная из орошения руда	-2+1	0,4	1,9	3,2	15,2
	-5+2	0,2	13,8	1,6	110,4
	-10 +5	0,1	0,9	0,8	7,2
	-25+10	0,1	5,8	4	46,4
	-50+25	0,1	3,8	0,8	30,4
	-60+50	0,1	2,4	0,8	19,2
	-70+60	0,3	2,5	2,4	20
	+70	0,2	0,9	1,6	7,2

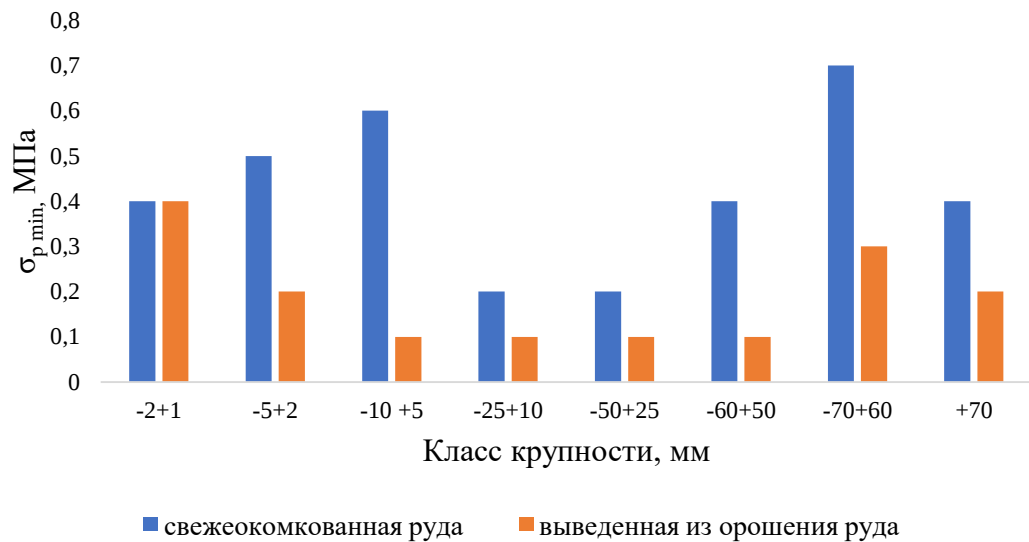


Рисунок 3.21 – Минимальные значения прочности на растяжение при естественной влажности для обломков карбонатных пород

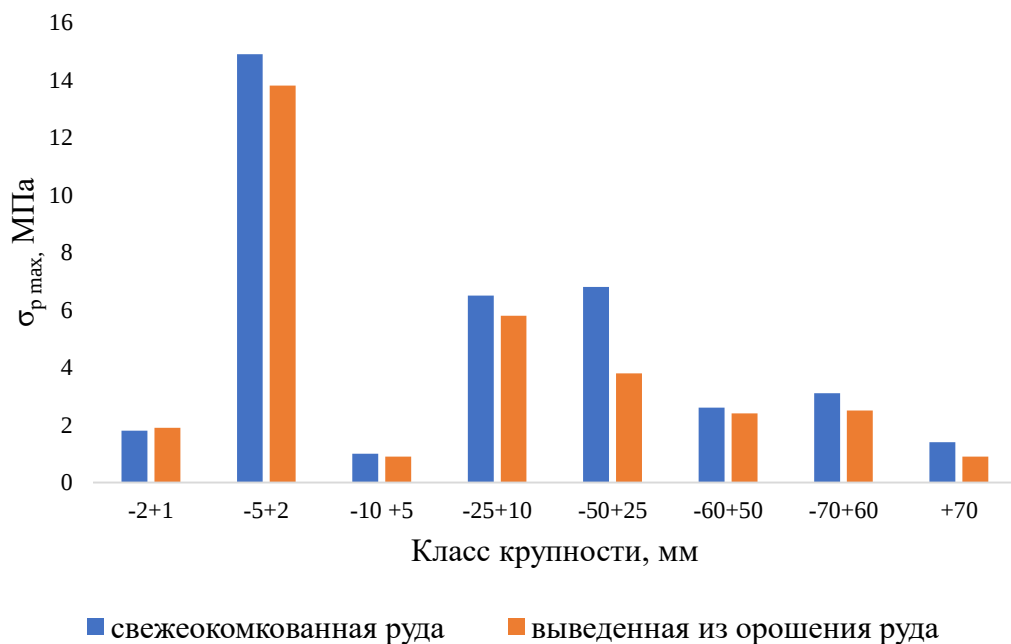


Рисунок 3.22 – Максимальные значения прочности на растяжение при естественной влажности для обломков карбонатных пород

По минимальным значениям видно, что материал классом -25 мм имеет очень низкие значения прочности на растяжение от 0,6 до 0,1 МПа.

3.6 Укрупнено-лабораторные стендовые испытания рудного материала

Поскольку эксплуатация штабелей КВ, сформированных из окомкованных руд, преимущественно осуществляется в условиях инфильтрационного режима,

а также с учетом существенного изменения физико-механических характеристик материала при увлажнении, определение коэффициента фильтрации целесообразно выполнять в лабораторных стендах с моделированием ненасыщенного потока, что позволяет подобрать оптимальную интенсивность процесса. В рамках исследования с целью моделирования натурных условий для определения фактических фильтрационных параметров окомкованной руды был изготовлен стенд (рисунки 3.23 и 3.24), с габаритными размерами 450x450x1000 мм, прямоугольного сечения из металлического каркаса и прозрачных стенок из оргстекла [82]. Испытания проводились в лаборатории моделирования Научного центра геомеханики и проблем горного производства.

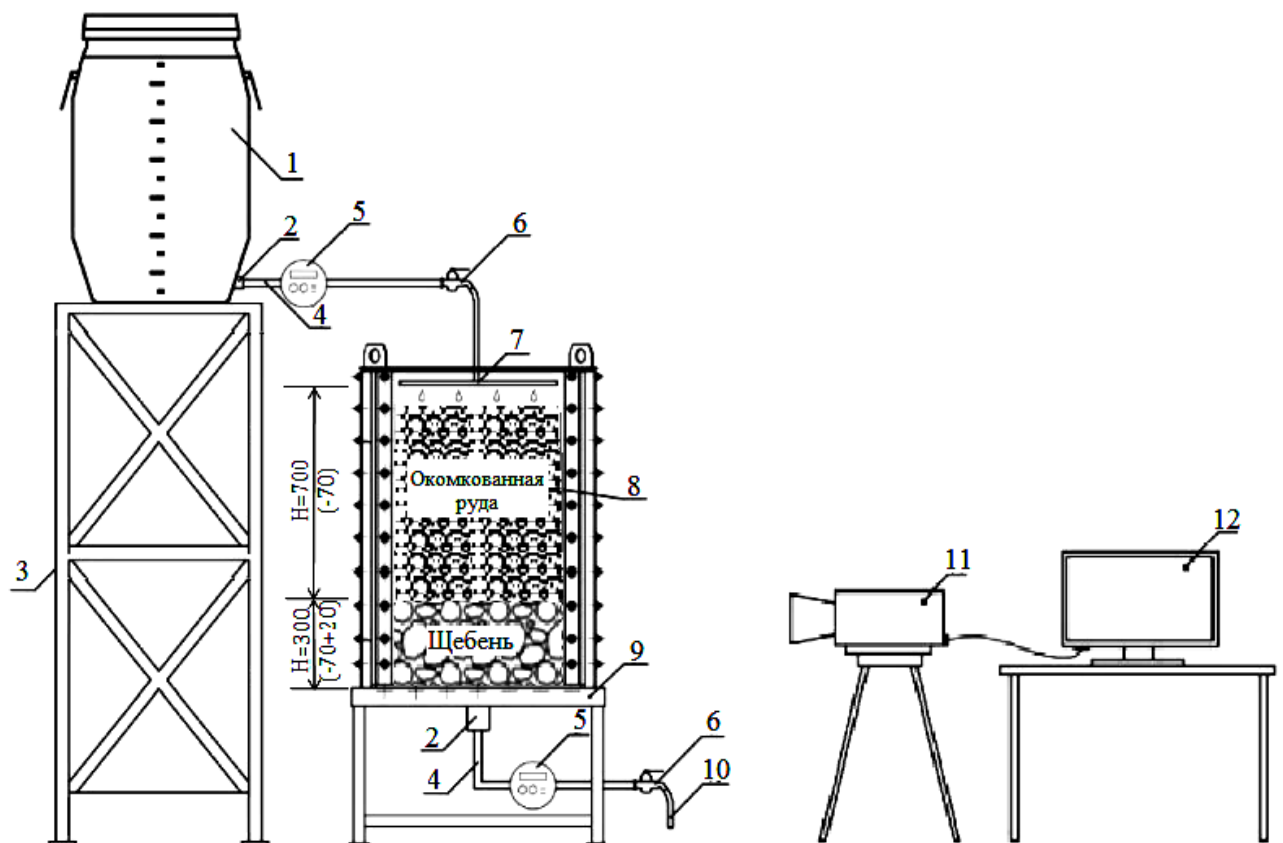


Рисунок 3.23 –Схема проведения испытаний рудного материала на стенде: 1 – емкость с водой; 2 – переходник; 3 – подставка под емкость; 4 – сливная труба; 5 – счетчик воды; 6 – кран; 7 – система капельного орошения; 8 – рабочая камера; 9 – подставка; 10 – отводная труба; 11 – фото/видео камера; 12 – персональный компьютер [82]

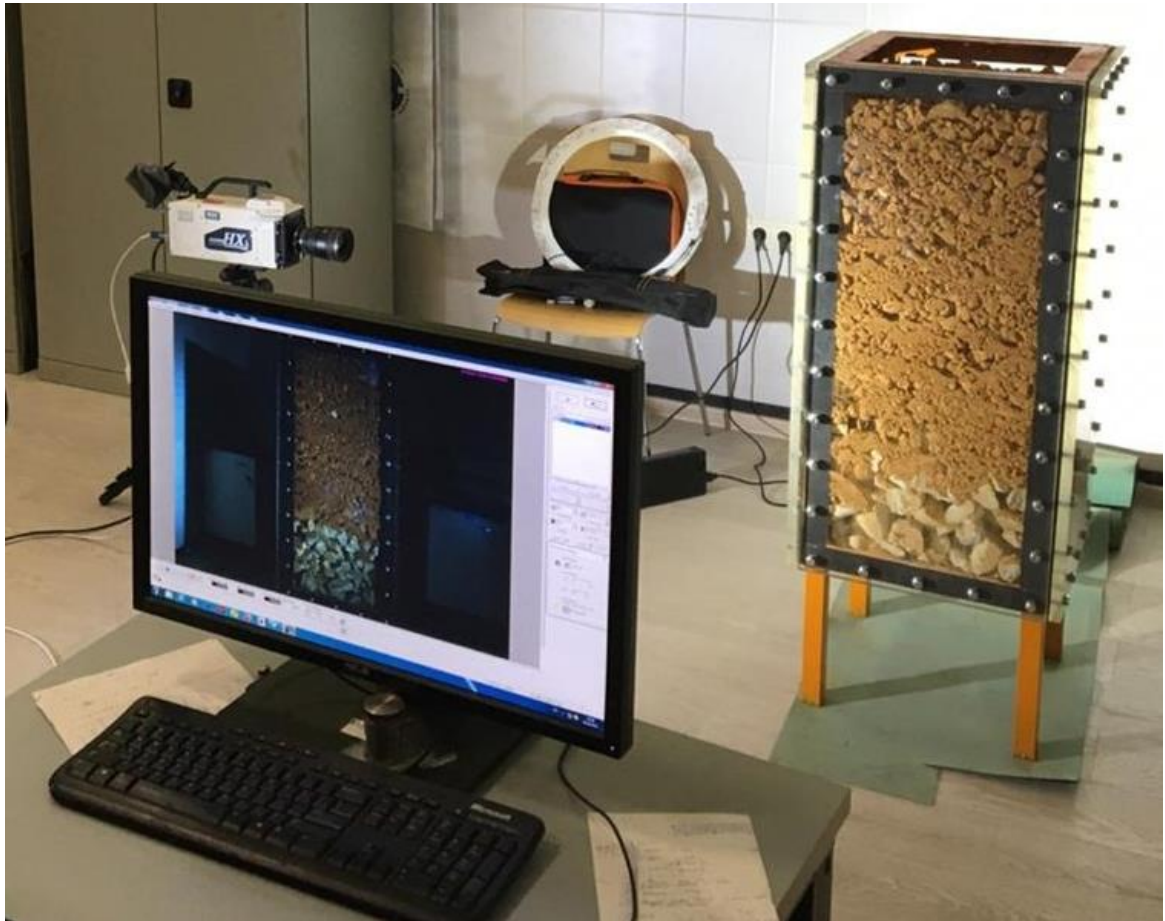


Рисунок 3.24 –Проведение испытаний рудного материала на стенде

Порядок испытаний включал проведение опытов со свежееокомкованной рудой по двум сценариям при троекратном повторении каждого из них. В рамках 1-го опыта (без нагрузки) стенд был загружен материалом: до отметки 300 мм отсыпан дренаж из крупнообломочных пород классом крупности $-70+20$, затем до отметки 1000 мм окомкованная руда классом крупности -70 с насыпной плотностью $1,3 \text{ т/м}^3$. Плотность материала определелась при известных массе руды и объёме стенда. Далее осуществлялась проливка материала равномерно по поверхности методом капельного орошения, задействованная площадь составила $0,2 \text{ м}^2$. При этом на стадии насыщения рудного материала была смоделирована предполагаемая интенсивность орошения $240 \text{ л/м}^2\text{сут}$.

В процессе насыщения было зафиксировано, что рудный материал уплотнился в среднем на 5 см, что составляет 6,5% от первоначальной высоты (рисунок 3.25). Средний коэффициент фильтрации материала при установившемся режиме инфильтрации составил 24 м/сут . В процессе опытов также было отмечено,

что окатыши не выдерживают нагрузку при заданной интенсивности проливки и разрушаются, поэтому в ходе опыта был отмечен вынос глинистой составляющей на нижележащий дренажный слой, что также может привести к заиливанию дренажной системы штабеля КВ.

На второй стадии эксперимента в рамках 1-ого опыта выполнялось дополнительное орошение руды, находящейся уже в полностью насыщенном состоянии. При подаче воды с интенсивностью $290 \text{ л/м}^2\text{сут}$ примерно через 43 мин с начала орошения интенсивность отдачи составила $290 \text{ л/м}^2\text{сут}$. Таким образом, коэффициент фильтрации материала составлял в среднем уже 2 м/сут . Такое снижение объясняется размоканием окатышей. При этом в процессе опыта было видно, что вода промывает каналы в теле рудного материала и уходит по ним. Можно сделать вывод, что ухудшение фильтрационных свойств вследствие формирования каналов, с точки зрения приема растворов в дренажном слое, может не наблюдаться при этом будет происходить нарушение инфильтрации через всю рудную массу, а значит и ухудшение извлечения золота.

На третьей стадии 1-ого опыта рудный материал был полностью затоплен водой на 1 ч. Данный опыт моделировал поднятие растворов выше дренажного слоя. В ходе опыта было отмечено значительное разрушение рудных окатышей при их затоплении и дальнейшее снижение коэффициента фильтрации в среднем до $0,5 \text{ м/сут}$ (рисунок 3.25).

После каждого испытания стенд был разобран для визуальной и лабораторной оценки изменения характеристик материала (рисунок 3.26 и 3.27). Влажность материала после испытаний составила в среднем 28%, а плотность сформировавшихся песчано-глинистых уплотнений с включениями обломков карбонатных пород составила $1,61\text{--}2,12 \text{ г/см}^3$.

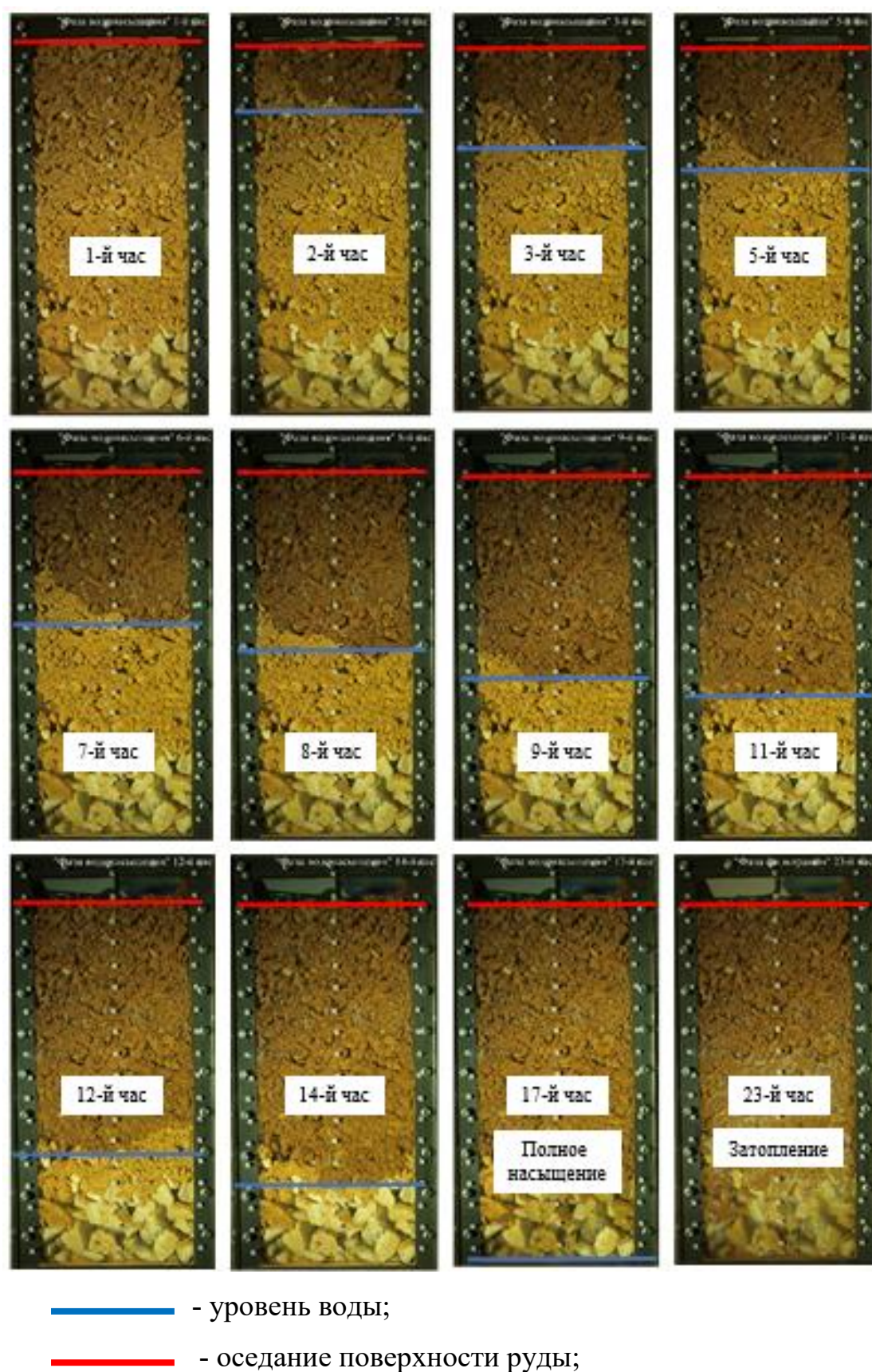


Рисунок 3.25 – Процесс водонасыщения рудного материала при проведении испытаний методом физического моделирования



Рисунок 3.26 – Материал после испытания на полное водонасыщение



Рисунок 3.27 – Сформированные песчано-глинистые уплотнения

В рамках 2-го опыта (с уплотнением) стенд был загружен материалом: до отметки 200 мм отсыпан дренаж из крупнообломочного пород классом крупности $-70+20$, далее до отметки 1000 мм окомкованная руда классом крупности -70 массой 286 кг. Средняя плотность при трамбовке материала составила $1,77 \text{ т/м}^3$. Затем была смоделирована фаза насыщения рудного материала при данной плотности. Время насыщения материала составило в среднем 14 часов.

При этом в процессе насыщения рудный материал не уплотнялся в отличие от предыдущего эксперимента. Средний коэффициент фильтрации материала составил 4,8 м/сут. Затем стенд разбирался, а материал исследовался на предмет определения влажности и плотности, значения которых после испытаний составили в среднем соответственно 29% и 1,72-2,14 г/см³.

Таким образом по результатам укрупнено-лабораторных стендовых испытаний установлено, что коэффициент фильтрации окомкованных песчано-глинистых руд куранахского типа снижается в процессе орошения рудного материала вследствие размокания окатышей, а также при увеличении интенсивности орошения и переходе от инфильтрационного к фильтрационному гидродинамическому режиму выщелачивания.

3.7 Полевые опытно-фильтрационные испытания

Наиболее достоверные сведения о параметрах фильтрации можно получить по результатам полевых испытаний на промышленном участке штабеля КВ, позволяющие прямыми методами установить изменение коэффициента фильтрации по глубине и в плане. Полученные данные изменения коэффициента фильтрации от глубины позволяют затем провести калибровку численной фильтрационной модели и определить оптимальную интенсивность орошения, обеспечивающую необходимую степень водонасыщения окомкованной руды.

На момент полевых исследований штабель КВ был сформирован в два яруса в среднем по 10 метров каждый. В соответствии с разработанной программой работ были выполнены поинтервальные опытно-фильтрационные работы (далее – ОФР) на всю глубину на первом и втором ярусе штабеля по методу В.М. Насберга [79] в четырёх скважинах при условиях установившегося расхода и поддержания в скважине постоянной высоты столба воды, не превышающей длины интервала опробования, равного двум метрам. Схема расположения скважин для ОФР представлена на рисунке 3.28.

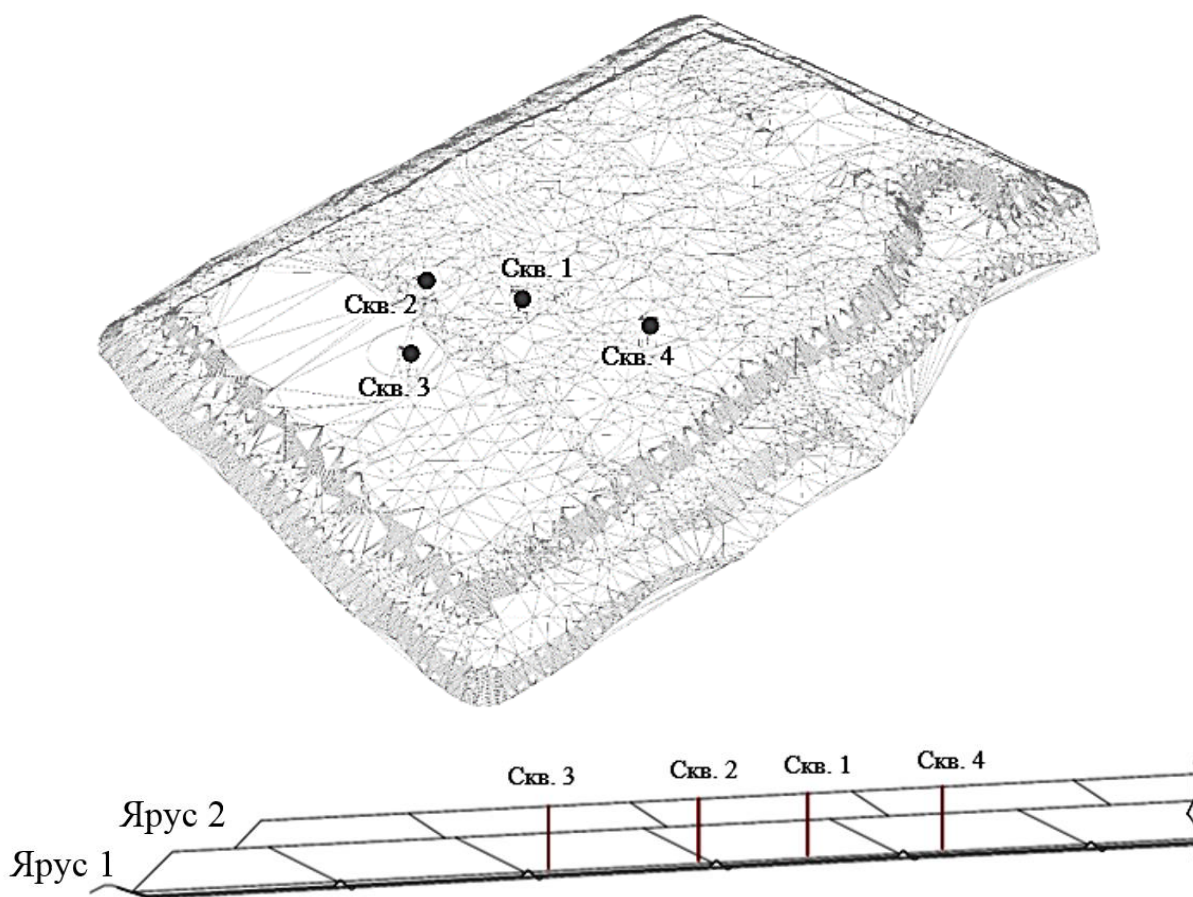


Рисунок 3.28 – Схема расположения скважин ОФР

Определение коэффициента фильтрации выполнено по формуле В.М. Насберга (3.12):

$$k = 0,423 \frac{Q}{l_0^2} \lg \frac{2l_0}{r_w}, \quad (3.12)$$

где Q —установившийся расход, м^3 ; l_0 —высота столба в скважине: измеряется от дна скважины, м ; r_w —радиус фильтра, м .

Наливы выполнялись по схеме «сверху вниз», при которой скважина опробуется последовательно по мере ее углубления. Скважину разбуривали до первого сверху интервала опробования, промывали и производили налив. Затем разбуривали скважину до подошвы следующего интервала опробования, промывали вскрытый участок и производили следующий налив и т.д. Глубина скважин составляла 15-21 м. Интервал опробования 2 м (фильтр d 146 мм, длина 2 м).

Поступление воды в скважину определялось расходомером, а постоянство уровня воды в фильтровой колонне контролировалось датчиком гидростатического

давления, хлопушкой и уровнемером (рисунок 3.29). Подача воды в скважину осуществлялась через шланг, конец которого находился ниже верха фильтра на 1,0-1,5 м, что позволило беспрепятственно использовать уровнемер. Высота воды в скважине 1,8-1,9 м поддерживалась постоянной во время опытных работ.

а)



б)

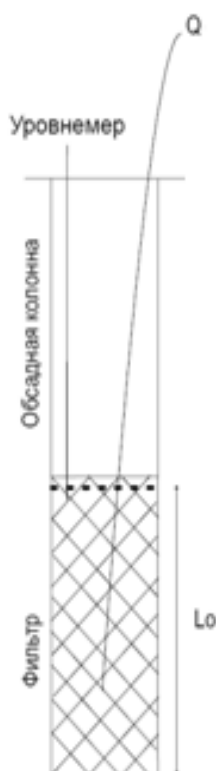


Рисунок 3.29 – а) Схема проведения наливов на площадке КВ; б) Схема скважины опытного налива в необводненные породы по методу В.М. Насберга, где Q - установившийся расход воды в скважине, L_0 - высота столба воды в скважине

Резкое увеличение скорости фильтрации на глубине около 10 м для скважин указывает о подсечении скважинами для ОФР межъярусного дренажного слоя, либо участков, сложенных преимущественно обломками карбонатных пород классом +40-125 мм, что по расчетам показывало коэффициент фильтрации более 100 м/сут. Остальные полученные данные по результатам полевых испытаний представлены на рисунке 3.30.

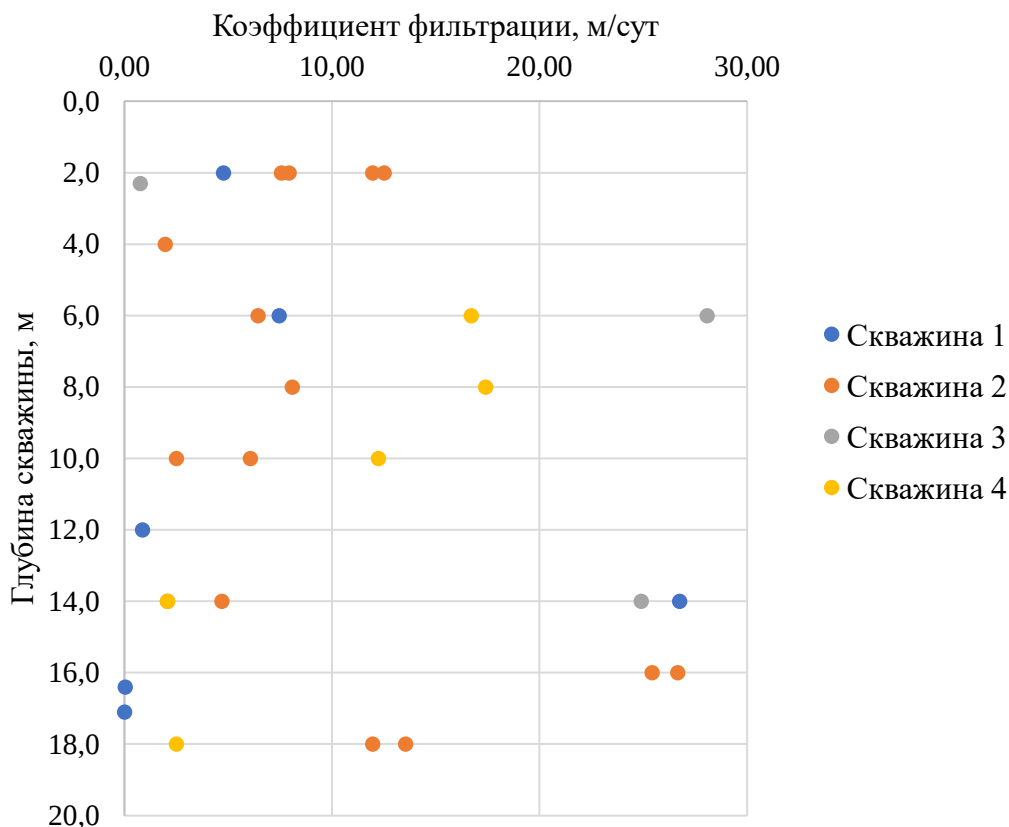


Рисунок 3.30 – Распределение коэффициента фильтрации по глубине штабеля КВ по данным наливов по методу В.М. Насберга

Установлено, что величина коэффициента фильтрации изменяется в широком диапазоне (в зависимости от положения по глубине интервала проведения испытания): в основном величина коэффициента фильтрации располагается в диапазоне от 2 до 10 м/сут. Медианное значение коэффициента фильтрации по штабелю составляет 14 м/сут.

На отдельных участках значение коэффициента фильтрации падает значительно ниже до 0,01-0,001 м/сут, что характерно для суглинков и глин.

Подобные значения были зафиксированы в ходе исследований на глубине 16-17 метров в скважине №1, фотографии образцов из данной скважины представлены на рисунке 3.31. Возможно это связано с поднятием уровня раствора выше дренажного слоя и последующим размоканием окатышей или нарушением технологии окомкования. В остальном сравнение участков падения фильтрационных характеристик в штабеле КВ с процессом его отсыпки показало, что снижение K_f в большей степени обусловлено спецификой формирования штабеля.



Рисунок 3.31 – Фото керна из скважины №1 (глубина 16,10-16,30 м)

По результатам проведения ОФР с помощью наливов по методу В.М. Насберга согласно полученному коэффициенту фильтрации руд выявлена неоднородность строения массива штабеля КВ, что позволяет предположить о неравномерности движения растворов в массиве. Однако фактическая картина распределения фильтрационных характеристик пород штабеля КВ оказалась более благоприятная по отношению к данным, получаемым на основании лабораторных исследований.

3.8 Выводы по главе 3

1. Песчано-глинистые окомкованные руды являются специфическими техногенными грунтами, характеризующимися изменением состава и физико-механических свойств во времени при инфильтрационном и фильтрационном гидродинамических режимах эксплуатации штабелей КВ, что необходимо учитывать при прогнозе их устойчивости.

2. По гранулометрическому составу окомкованные песчано-глинистые золотосодержащие руды куранахского типа являются неоднородными крупнообломочными грунтами с водонеустойчивым заполнителем, что может приводить к просыпанию или суффозии мелких частиц к дренажному слою и возможному его заиливанию.

3. Окатыши рудного материала при проведении лабораторных испытаний по определению коэффициента фильтрации при состоянии полного водонасыщения полностью размокают спустя непродолжительное время, что ведёт к снижению фильтрационных характеристик руды.

4. По результатам испытаний на одноплоскостной срез класса -5 мм установлено, что при проведении опытов с замачиванием образцов окомкованных песчано-глинистых руд угол внутреннего трения практически не меняется $\varphi = 31-33^\circ$, а удельное сцепление уменьшается до 29-30 кПа.

5. Испытания на компрессионное сжатие класса -5 мм показали, что при нагрузках до 0,2 МПа исследуемый материал характеризует себя как сильно сжимаемый, что обусловлено не только увеличением плотности, но и разрушением окомкованных руд, в том числе и для уже выведенной из орошения руды, о чем свидетельствуют данные анализа гранулометрического состава до и после испытаний.

6. По результатам укрупнено-лабораторных стендовых испытаний установлено, что коэффициент фильтрации окомкованных песчано-глинистых руд куранахского типа снижается в процессе орошения рудного материала вследствие размокания окатышей, а также при увеличении интенсивности орошения

и переходе от инфильтрационного к фильтрационному гидродинамическому режиму выщелачивания.

7. Установлено, что наиболее достоверные значения коэффициента фильтрации можно получить путем выполнения опытно-фильтрационных работ на участке опытной отсыпки массива штабеля. Полевые опытно-фильтрационные работы с помощью наливов по методу В.М. Насберга показали существенную неоднородность фильтрационных характеристик массива руд в штабеле КВ от 10^{-3} до 10^2 м/сут, преимущественно обусловленную технологией формирования штабеля и условиями его эксплуатации. В основном величина коэффициента фильтрации по данным наливов варьирует в диапазоне от 2 до 15 м/сут при медианном значении 14 м/сут. Результаты опытно-фильтрационных работ согласуются с данными бурения скважин, что позволяет сделать вывод о зависимости коэффициента фильтрации от сегрегации при формировании рудного штабеля.

8. По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что наиболее целесообразный подход при изучении состава и физико-механических свойств окомкованных золотосодержащих песчано-глинистых руд в процессе лабораторных испытаний заключается в исследовании и сравнении результатов для материалов свежеекомкованной руды и после выщелачивания, что позволяет более объективно оценить эксплуатационные изменения техногенного массива.

ГЛАВА 4 ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ ШТАБЕЛЯ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

4.1 Анализ результатов маркшейдерских наблюдений за деформациями массива штабеля кучного выщелачивания

На основе результатов маркшейдерских наблюдений и аэрофотосъёмки с использованием беспилотных летательных аппаратов были построены положение поверхности и профили штабеля КВ (рисунок 4.1 - 4.2), демонстрирующие динамику изменения конфигурации поверхности штабеля на протяжении 4-ех лет эксплуатации. Анализ профилей позволили выделить участки с максимальной и минимальной интенсивностью деформаций. Съёмка проводилась в масштабе 1:500, при этом средняя погрешность относительно планового положения составила 7,5 см, а по высотному положению — 15 см.

Анализ маркшейдерских наблюдений показал, что наибольшие абсолютные осадки наблюдаются на этапе формирования первого яруса штабеля, начальная высота которого составляла 10 м. Средние значения деформаций достигали 1,98 м, а локальные осадки варьировались в диапазоне от 0,6 до 3,8 м. Такие изменения обусловлены уплотнением рудного материала под действием собственного веса и проливки растворами цианида. Лабораторные испытания подтвердили, что проливка приводит к осадке рудного материала на величину около 7%. Механизмы деформирования материала происходят с различной интенсивностью в зависимости от гранулометрического состава материала и гидродинамического режима эксплуатации штабеля КВ.

Краевые зоны штабеля оказались наиболее подвержены деформациям. Осадки в этих зонах превышали показатели центральной части массива на 15–25%, что связано, помимо уплотнения с меньшей устойчивостью краевых участков и возможностью проявления локальных гравитационных процессов, связанных с осыпанием и скатыванием включений рудного материала. При этом следует отметить, что орошения на откосных поверхностях не происходило, а руда подвергалась воздействию только атмосферных осадков. По данным наблюдений

формирование откосных поверхностей происходит под углом близким к углу естественного откоса $39-41^{\circ}$, а впоследствии к концу первого года эксплуатации угол снижается до $33-34^{\circ}$, после второго года до $29-30^{\circ}$.

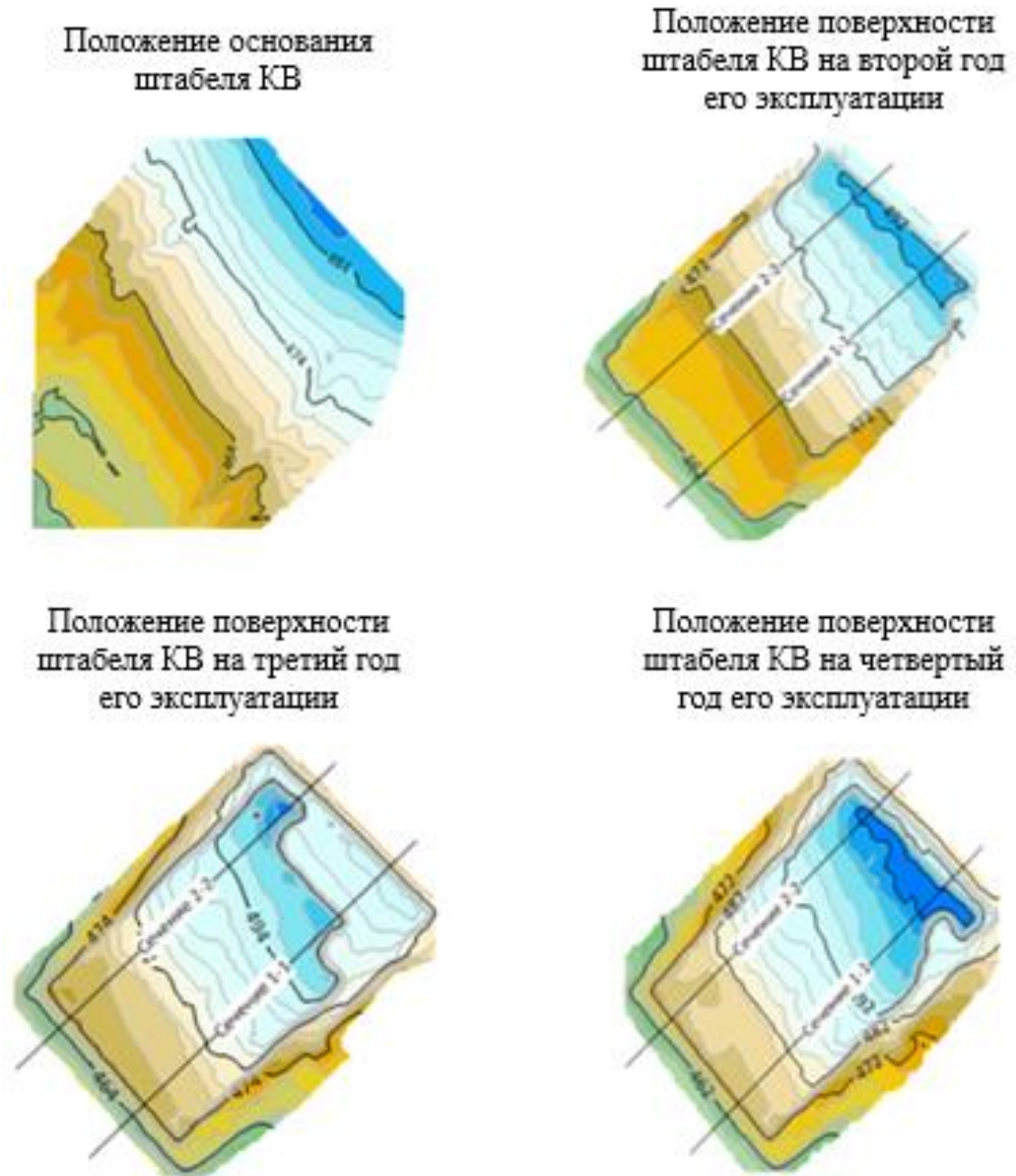
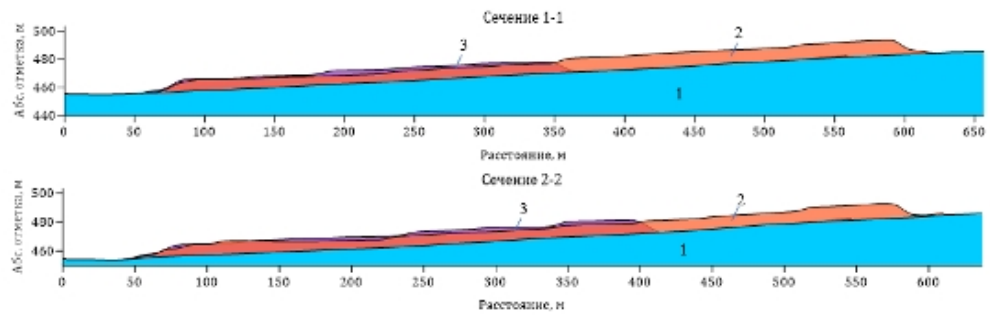
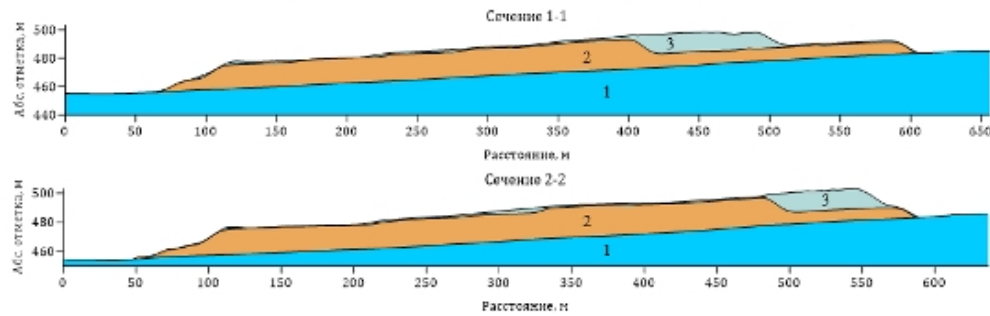


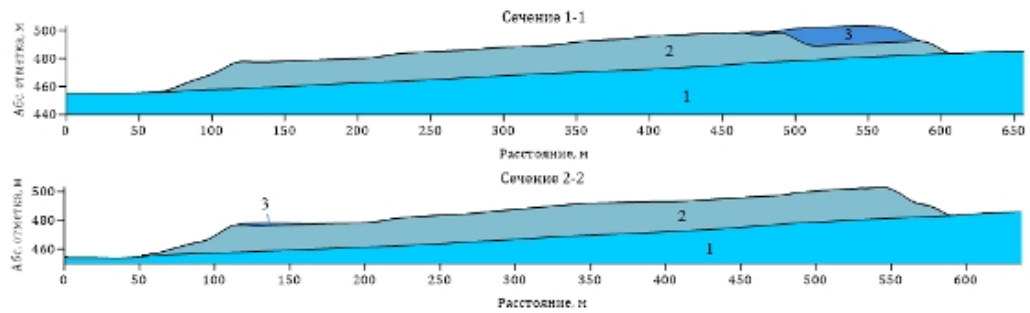
Рисунок 4.1 – Положения поверхности штабеля КВ на разных этапах его эксплуатации, а также направление сечений продольных профилей штабеля



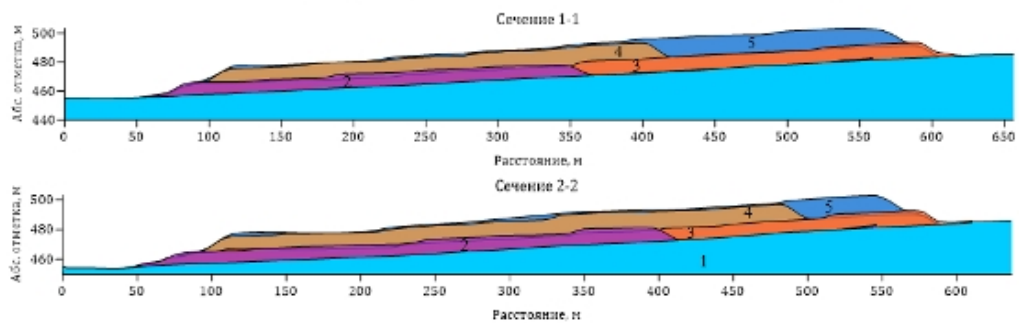
1 – поверхность основания штабеля КВ; 2 – конфигурация штабеля КВ в первый год;
3 – конфигурация штабеля КВ во второй год.



1 – поверхность основания штабеля КВ; 2 – конфигурация штабеля КВ в третий год;
3 – конфигурация штабеля КВ в юнц третьего года эксплуатации.



1 – поверхность основания штабеля КВ; 2 – конфигурация штабеля КВ в третий год;
3 – конфигурация штабеля КВ в четвертый год.



1 – поверхность основания штабеля кучного выщелачивания; 2 – конфигурация штабеля КВ в первый год; 3 – конфигурация штабеля КВ во второй год; 4 – конфигурация штабеля КВ на третий год; 5 – конфигурация штабеля КВ в четвертый год.

Рисунок 4.2 – Профили продольного сечения штабеля КВ на различных этапах его формирования и эксплуатации

Анализ формирования второго яруса показал, что его сооружение и сопровождалось менее значительными деформациями. Средняя величина осадки варьировалась в пределах от 0,23 до 0,76 м. Центральные участки штабеля также демонстрировали минимальные значения осадки, а краевые зоны также деформировались как в случае с первым ярусом.

По серии маркшейдерских съемок установлено, что интенсивность деформационных процессов снижается со временем, что связано с уменьшением пористости материала вследствие его уплотнения и изменения структуры в процессе разрушения части окатышей при орошении растворами. Так, в первые два года эксплуатации осадка штабеля достигала 70–80% от общего объёма уплотнения, а в последующие годы её темпы снижались более чем в два раза.

4.2 Характеристика сегрегации рудного материала массива штабеля кучного выщелачивания

Анализ фото и видео материалов по формированию штабеля КВ (рисунки 4.3-4.5), а также данные бурения скважин для выполнения ОФР указывают на неоднородность строения техногенного массива за счет сегрегации рудного материала, что также подтверждается научными исследованиями этого процесса [57, 105], что позволяет сделать следующие обобщения и выводы.



Рисунок 4.3 – Зоны скопления крупной фракции в процессе сегрегации материала при формировании штабеля КВ



Рисунок 4.4 – Зоны скопления крупной фракции в процессе сегрегации материала в основании штабеля КВ при его формировании



Рисунок 4.5– Откосная поверхность рудного штабеля КВ, сложенная мелкой фракцией

1. Распределение окомкованных песчано-глинистых руд с включениями обломков карбонатных пород с размерами -125 мм по вертикали штабеля определяет геометрические закономерности изменений различных характеристик рудной массы, в том числе и инженерно-геологические.

2. Степень разделения кускового материала по гранулометрическому составу в процессе отсыпки штабеля на плоскости с естественным углом откоса зависит от гранулометрического состава и соотношения высоты штабеля к размерам максимального куска отсыпаемой породы.

3. При формировании штабелей кусковым рудным материалом отмечается закономерность: отсыпка производится наклонными слоями, а распределение масс по крупности формирует слои, по-разному ориентированные к основанию штабеля.

Таким образом можно сделать вывод, что при формировании слоя рудного материала стакером (рисунок 4.6), что приводит к сооружению насыпного массива со сложной неоднородной структурой. Во время отсыпки куч происходит концентрация рудной мелочи в центре навала, а более крупных кусков – на нижних склонах и в основании куч, что более благоприятно для обеспечения устойчивости штабеля. Также стоит отметить, что в этом случае формируется дополнительная подушка крупной фракции обломочного материала в его основании, что можно рассматривать как увеличение мощности дренажного слоя. При этом укладка агломерированной руды в штабель происходит достаточно равномерно, распределение обломочного скального и окатанного материала происходит как по горизонтали, так и по вертикали рудного штабеля, что достигается за счет применения на участке КВ способа двурусной и двухрядной отсыпки рудного штабеля [94,128].



Рисунок 4.6 – Схема строения структуры штабеля при укладке руды стакером в
один ряд

В период просачивания растворителя через рудный штабель, когда мелочь просыпается через более крупные частицы руды, происходит дополнительная сегрегация материала за счет перемещения более мелких частиц. Она приводит к образованию локализованных зон с заметной разницей в проницаемости, в результате чего выщелачивающие растворы следуют по пути, минуя или чуть смачивая зоны с большим количеством мелочи или шлама, т.е. образуются каналы. Таким образом, сегрегация руды при укладке стакером с одной стороны повышает устойчивость штабеля, а с другой формирует фильтрационную неоднородность.

Установленные данные о сегрегации рудного материала в штабеле КВ не поддаются аналитическому описанию и не могут быть воспроизведены в рамках численного моделирования для отображения реальной структуры штабеля КВ. Основную сложность составляет то, что для построения подробного профиля сечения рудного штабеля КВ требуется достаточно масштабная система скважин и последующего анализа результатов бурения, что является очень трудозатратным и длительным процессом. Кроме того, профиль сечения рудного штабеля по своему строению ни в поперечном, ни в продольном направлении не будет идентичным по всей площади сооружения. Это связано с тем, что работа стакера укладывающего окомкованную руду в штабель определяется оператором смены и зависит от ряда факторов, что также приводит к изменению распределения рудного материала внутри штабеля.

4.3 Фильтрационное моделирование орошения штабеля кучного выщелачивания

Комплексный подход при исследовании фильтрационных характеристик окомкованной руды в лабораторных условиях на образцах, на стендовом оборудовании в процессе укрупненно-лабораторных испытаний, моделирующих часть массива на участке КВ, а также в полевых условиях при выполнении ОФР позволяет установить корреляцию между различными способами изучения

фильтрационных характеристик руд и использовать ее при последующем моделировании [137].

Как уже отмечалось выше, при решении задачи по обеспечению устойчивости массива, сложенного окомкованными песчано-глинистыми рудами куранахского типа, важным фактором является обеспечение инфильтрационного режима эксплуатации штабеля КВ, что обеспечивает наличие отрицательного порового давления в массиве, способствующего возникновению абсорбции [75]. В соответствии с выполненным ранее обоснованием расчетной схемы в разделе 2.4 для описания фильтрации через пористые тела как в полностью водонасыщенном состоянии, так и в неполностью водонасыщенном состоянии принята модель Van Genuchten – Mualem, позволяющая оценить степень водонасыщения грунта в зависимости от величины отрицательного порового давления.

При выполнении фильтрационных расчетов принято, что коэффициент фильтрации определяется гранулометрическим составом с учетом крупных включений. Параметры фильтрационной модели сведены в таблицу 4.1, а также для окомкованной руды представлены в виде закономерностей изменения отрицательного порового давления и коэффициента фильтрации от степени водонасыщения (рисунок 4.7).

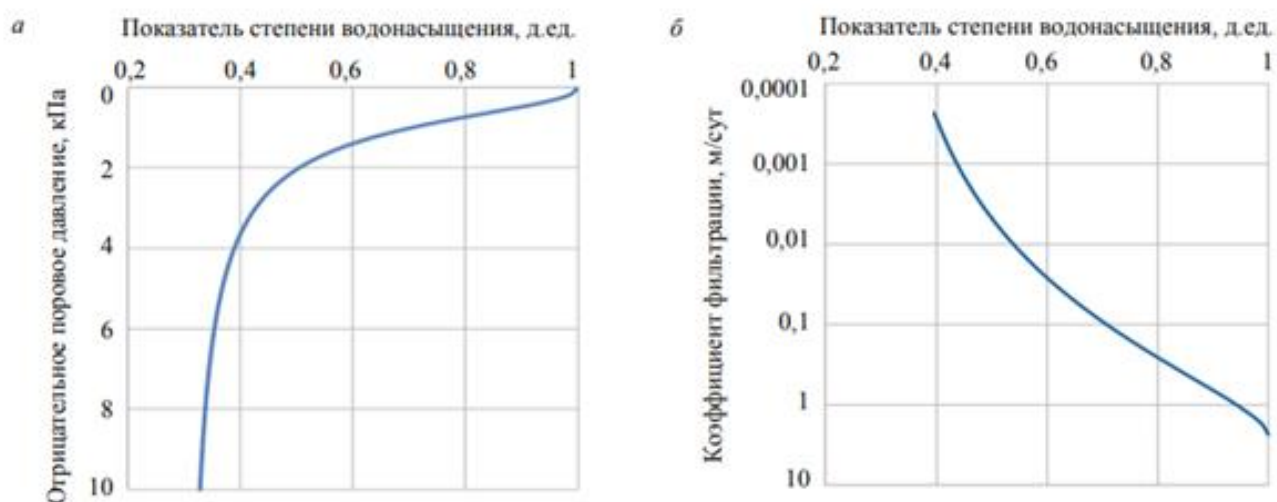


Рисунок 4.7– Зависимости изменения отрицательного порового давления (а) и коэффициента фильтрации (б) от степени водонасыщения

Таблица 4.1 – Параметры фильтрационной модели Van Genuchten – Mualem

Наименование материала	Коэффициент фильтрации полностью насыщенного раствором пористой среды k_{sat} , м/сут.	θ_r	θ_s	α , 1/м	n	m	θ_s
Окомкованная руда	2,35	0,139	1,0	12,4	2,28	-0,56	0,5
Гравийный слой	7,0	0,105	1,0	14,5	2,68	-0,62	0,5
Песчаный слой	3,5	0,105	1,0	14,5	2,68	-0,62	0,5

Калибровка численной фильтрационной модели выполнялась по результатам фильтрационных испытаний, полученных на стенде представленных в разделе 3.6 диссертационной работы. Визуализация численной модели лабораторного комплекса изображена на рисунке 4.8. Численная модель геометрически повторяет физическую модель: мощность слоя окомкованной руды – 70 см; мощность дренажного слоя 30 см; размеры квадратного поперечного сечения 0,2 м². В процессе калибровки расчетной модели использовались идентичные значения интенсивности орошения, которые были применены в рамках укрепленно-лабораторных испытаний.

Выполненные расчеты показали, что насыщение окомкованной руды происходит за 17 часов, что в целом соответствует данным, полученным в рамках физического моделирования. Влажность окомкованной руды достигает величины 0,32 д.ед., что соответствует показателю водонасыщения равного 76% (рисунок 4.8).

Также для оценки возможности фильтрации раствора через штабель и оценки эффективности дренажного слоя были использованы построенные численные модели насыщения пористой среды и распространения жидкости через пористую среду. Высота штабеля принята равной 20 м. Интенсивность орошения принята равной 0,3 л/м²сут. Коэффициент фильтрации принят переменным по глубине.

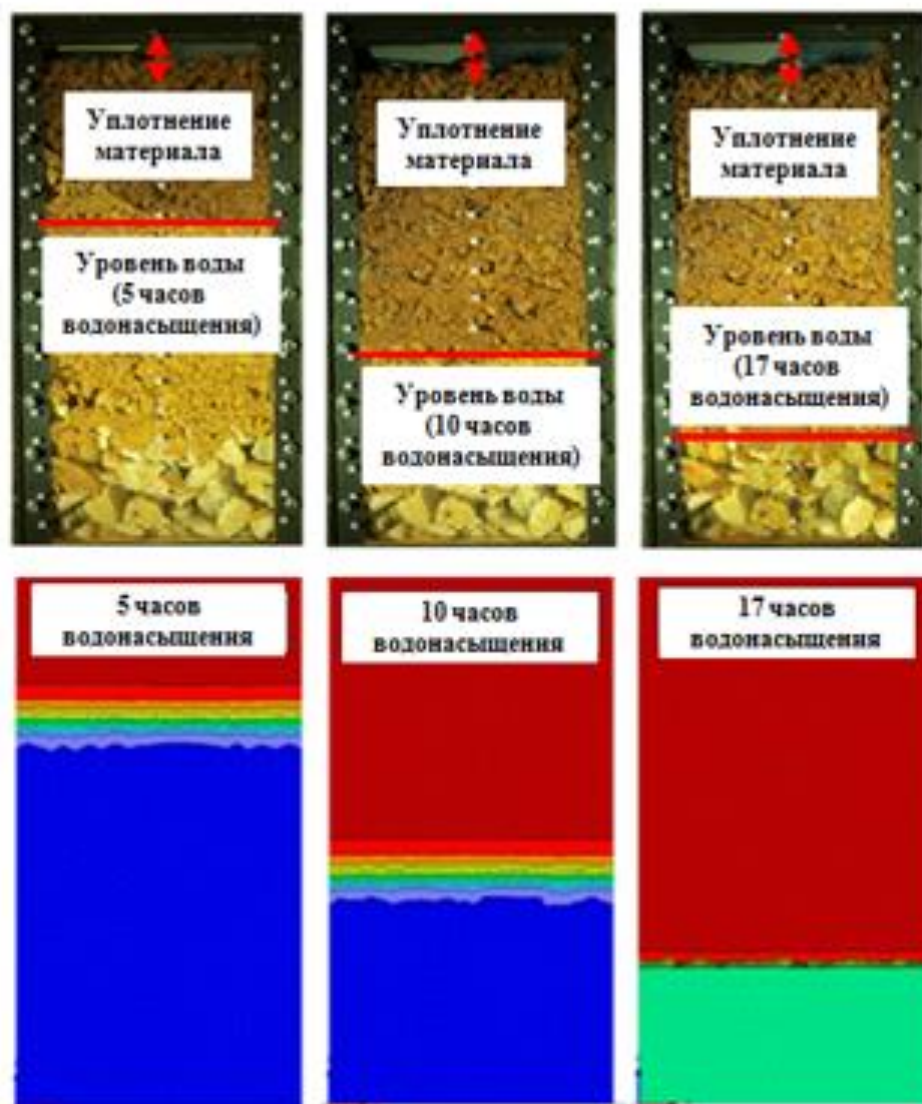
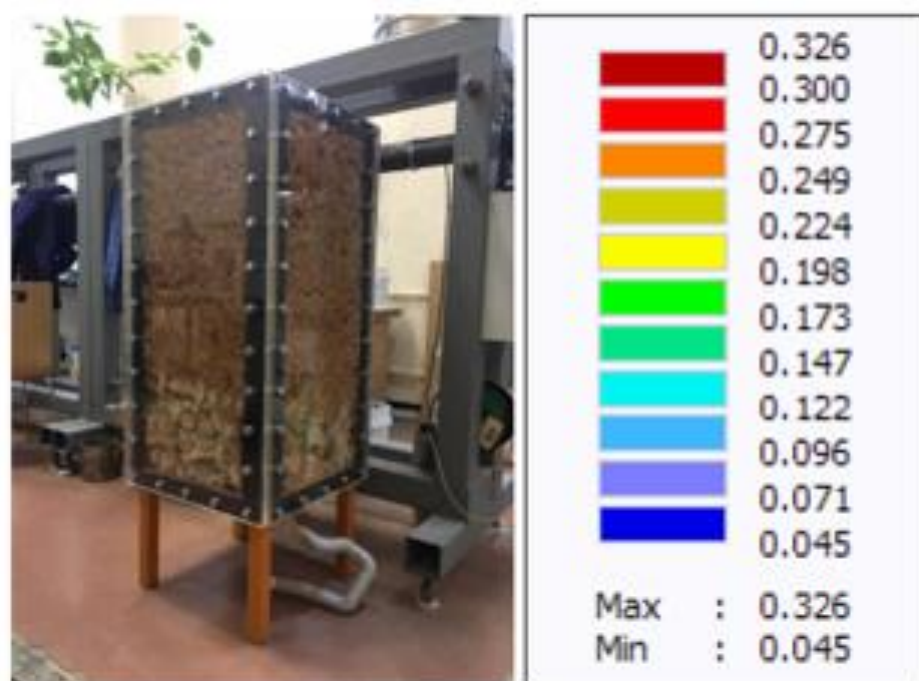


Рисунок 4.8 – Визуализация численной модели лабораторного комплекса

По результатам выполненных численных расчетов было установлено, что при фильтрационных характеристиках окомкованной руды, соответствующей классу крупности -125 мм, степень ее водонасыщения изменяется от 0,54 до 0,91 д.е. по высоте штабеля. Учитывая, что условное полное водонасыщение окомкованной руды достигается при значительном изменении ее физического состояния, равным 0,85-0,9 д.е., из представленных результатов следует, что при высоте штабеля 17 м и более степень водонасыщения окомкованной руды достигает предельных значений. При снижении интенсивности орошения до 200 л/м²сут показатель водонасыщения не достигает предельных значений при высоте штабеля участка КВ вплоть до значения 20 м.

Для определения параметра интенсивности орошения массива был выполнен анализ его фильтрационные свойства, с точки зрения распределения коэффициента фильтрации по глубине полученное для -125 мм по результатам экспериментальных исследований в данной работе и для -20 мм [67]. Результаты, полученные на отсеве -20 мм, показали, что при формировании штабеля участка КВ только такими породами, внутри штабеля будет наблюдаться формирование зон полного водонасыщения.

Лабораторные исследования по определению фильтрационных характеристик пород штабеля, полученные при различных классах крупности окомкованной руды, позволили получить закономерности изменения фильтрационных характеристик по глубине (рисунок 4.9).

Зависимости для двух классов крупности руды имеют одинаковый характер. Как видно из представленных закономерностей, коэффициент фильтрации снижается по мере увеличения плотности руды и снижения ее пористости, что характерно для пористых сред. Необходимо отметить, что абсолютные значения коэффициента фильтрации в значительной степени отличаются.

Начальное значение коэффициента фильтрации окомкованной руды при классе крупности – 20 составляет 3,1 м/сут, при классе крупности – 125 коэффициент фильтрации равен 50 м/сут (с учетом формирования зон повешенной проницаемости при насыпной плотности), то есть изучаемый класс крупности руды

оказывает значительное влияние на значение коэффициента фильтрации и в меньшей степени влияет на характер его изменения под нагрузкой (рисунок 4.9).

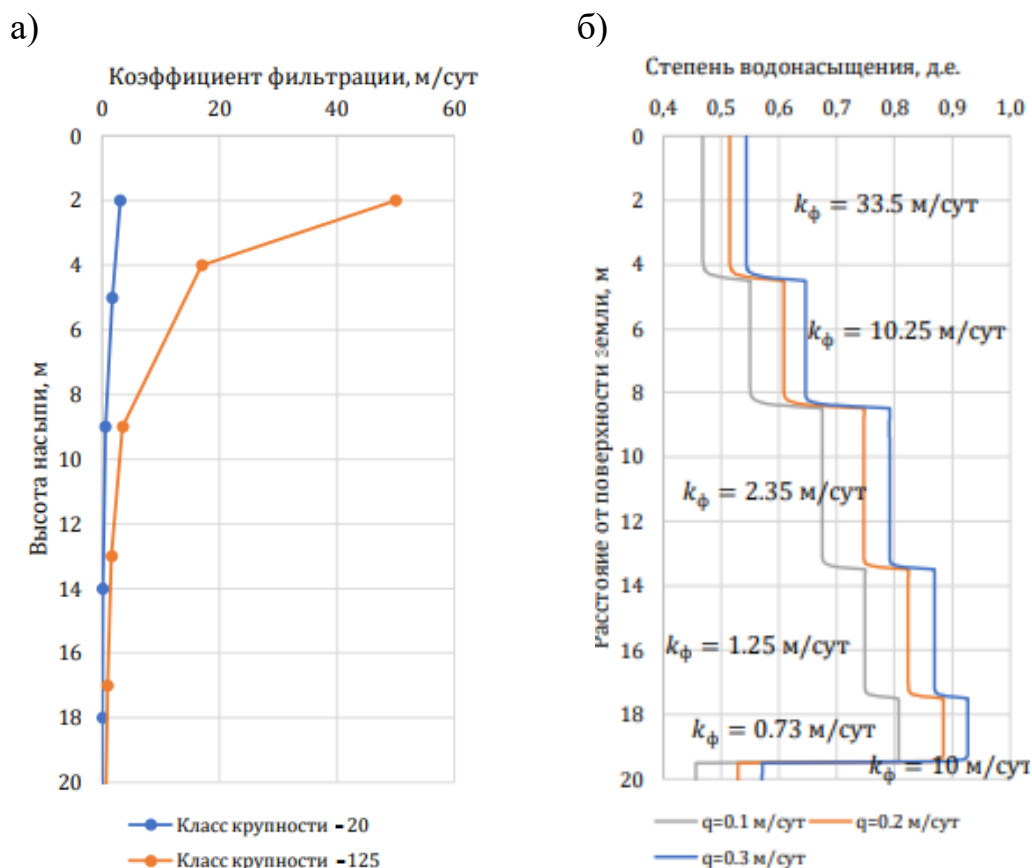


Рисунок 4.9 – Принятые величины коэффициента фильтрации окомкованной руды: а) – при полном водонасыщении; б) – с учетом степени водонасыщения окомкованной руды по глубине

Для оценки влияния фильтрационных характеристик среды на формирование зоны не полностью водонасыщенных пород выполнены расчеты, в которых значение коэффициента фильтрации изменялось от 2 до 20 м/сут. В расчетах принимались минимальные значения коэффициента фильтрации без учета его изменения в плане на каждом исследованном интервале глубин по результатам опытно-фильтрационных работ.

Характеристики модели не полностью водонасыщенной среды принимались по данным укрупненно-лабораторных испытаний. Для фактического гранулометрического состава окомкованной руды были получены закономерности изменения степени водонасыщения пород штабеля от интенсивности проливки раствора.

На основании выполненных расчетов для принятых фильтрационных параметров окомкованных руд получены закономерности изменения максимальной степени водонасыщения пород штабеля от коэффициента фильтрации (рисунок 4.10, а) и интенсивности орошения (рисунок 4.10, б).

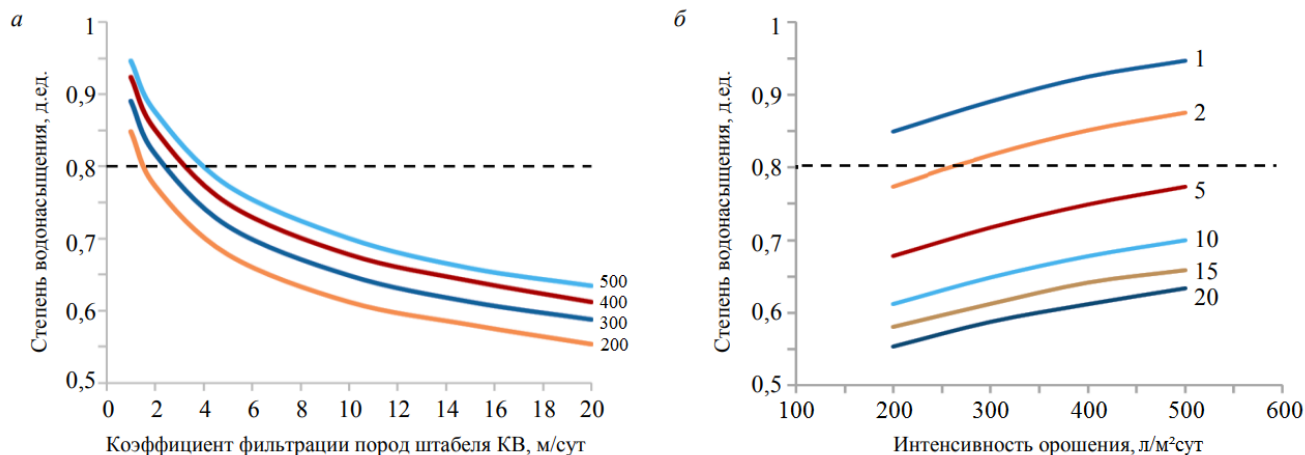


Рисунок 4.10 – Результаты оценки закономерности изменения степени водонасыщения штабеля участка КВ в зависимости от коэффициента фильтрации (а) и интенсивности орошения (б) при заданной величине интенсивности орошения (200, 300, 400, 500 л/м²·сут) и коэффициенте фильтрации пород (1, 2, 5, 10, 15, 20 м/сут)

Результаты показывают, что по мере увеличения коэффициента фильтрации наблюдается снижение степени водонасыщения пород штабеля, что позволяет увеличивать интенсивность орошения поверхности штабеля растворами. При коэффициенте фильтрации 5 м/сут интенсивность орошения может быть увеличена до 500 л/м²·сут, при 4 м/сут– 400 л/м²·сут, при 2 м/сут– не должна превышать 300 л/м²·сут.

При оценке влияния атмосферных осадков на водонасыщение штабеля КВ следует, согласно разделу 2.1 таблица 2.3 наибольший среднемесячный показатель количество осадков составляет 108 мм в месяц, что при среднем значении в сутки составляет 3,5 л/м²·сут. Следовательно, влияние атмосферных осадков на водонасыщение массива штабеля КВ в рамках одного сезона является незначительным и составляет менее 2% от минимальной интенсивности орошения. При этом в случае аномального выпадения осадков интенсивность орошения

должна быть скорректирована в зависимости от фактических условий для предупреждения превышения предельного показателя степени водонасыщения массива.

За граничное значение степени водонасыщения принята величина равная 0,8 д.е. [126, 130, 142], поскольку по результатам выполненных лабораторных испытаний установлено, что при значениях выше 0,8 д.е. механические характеристики пород за счет насыщения их раствором резко начинают снижаться.

В соответствии с расчетными параметрами орошения проанализирована способность дренажного слоя отводить растворы из-под штабеля при нормальном режиме эксплуатации. Согласно полученным результатам, зона полного водонасыщения не поднимается выше дренажного слоя. Оценка эффективности дренажного слоя представлена на рисунке 4.11.

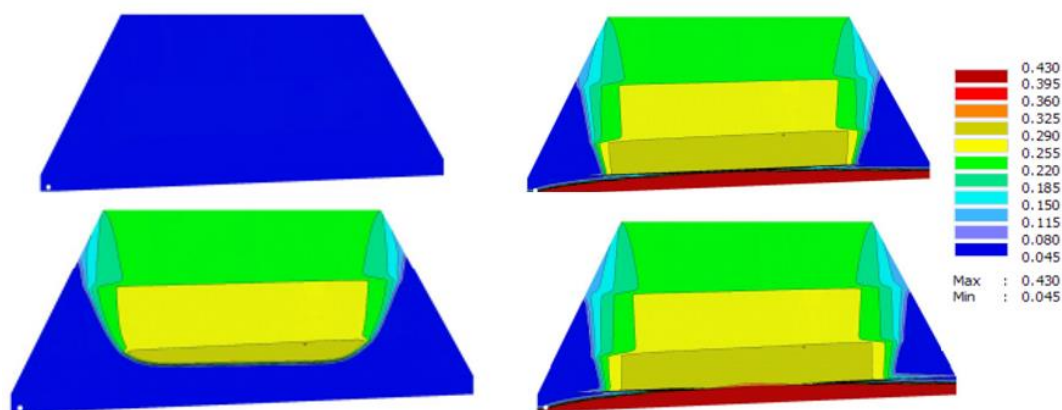


Рисунок 4.11 – Результаты численного моделирования влажности окомкованной руды и степени обводнения дренажного слоя массива штабеля

По результатам расчетов получены граничные величины интенсивности орошения пород, при которых внутри штабеля не будет формироваться водоносный горизонт, а механические характеристики пород штабеля практически не изменятся. Учет возможной вариативности фильтрационных характеристик в зависимости от фактического гранулометрического состава окомкованной руды показал, что значение предельных величин интенсивности орошения изменяется в пределах 20%. Можно отметить, что фактическая картина распределения фильтрационных характеристик пород штабеля участка КВ более благоприятная

по отношению к данным, получаемым на основании лабораторных исследований, что позволяет потенциально повысить интенсивность орошения пород растворами.

Предложенный метод прогноза фильтрационных процессов в штабеле КВ, основанный на определении фильтрационных показателей среды по данным укрупнено- лабораторных исследований на стендовом оборудовании и их изменчивости по глубине штабеля на основании полевых испытаний, в рамках модели ненасыщенной фильтрации позволяет качественно повысить достоверность результатов расчетов скорости фильтрации, определения допустимой интенсивности орошения и возможности формирования водоносного горизонта внутри тела штабеля.

4.4 Оценка устойчивости штабеля кучного выщелачивания

Расчет оценки механической устойчивости массива штабеля участка КВ произведен по результатам численного моделирования НДС пород штабеля. Оценка устойчивости выполнялась для статического варианта нагружения, уровень раствора в теле штабеля определен на основании фильтрационных расчетов. Характеристики пород штабеля и грунтов основания принимались в соответствии с результатами исследований, в рамках инженерно-геологических изысканий [107] и выполненных в лабораторных условиях, описанных в главе 3. Устойчивость оценивалась с учетом развития НДС пород массива на разных стадиях его формирования в продольном, так и в поперечном направлениях штабеля, при выполнении расчетов учитывалась нагрузка от горнотранспортного оборудования.

Для проведения расчета устойчивости были рассмотрены два основных расчетных варианта. Первый соответствует стадии строительства, где анализируется напряженное состояние массива при его сооружении. Второй соответствует стадии эксплуатации и учитывает изменение напряженного состояния массива при выщелачивании [83, 86]. В процессе формирования штабеля руда массива штабеля и грунты основания были определены как сухие. В процессе эксплуатации руда, ниже уровня дренажного слоя считалась полностью

насыщенной, выше этого уровня сухой. Дополнительно выполнен расчет при подъеме уровня раствора в теле массива до верха каждого из ярусов.

Расчет устойчивости был выполнен с помощью вычислительного комплекса Plaxis, методом численного моделирования в рамках плоско-деформационной модели [121, 133, 134]. Сооружение массива сопровождалось деформационными процессами рудной массы, что влекло за собой изменение геометрических параметров массива в результате уплотнения руды.

Плоско-деформационная постановка задачи подразумевает, что при любом виде напряженного состояния и способа нагружения рассчитываемой системы продольные деформации ε_y приравниваются к нулю вдоль всей протяженной части системы, вместе с тем, главные нормальные максимальные напряжения σ_1 , главные средние нормальные напряжения σ_2 , главные минимальные нормальные напряжения σ_3 и компоненты могут отличаться от нуля. Выбор данной постановки задачи численного моделирования решает проблему уменьшения размерности численной модели при сохранении высокой точности результатов, представляет собой традиционный подход при определении НДС, тогда как пространственная постановка задачи имеет существенные ограничения в применении из-за отсутствия практических рекомендаций для разработки математических моделей инженерно-геологических задач [38].

Целью выполнения расчетов являлось определение устойчивости откоса штабеля участка КВ на различных этапах формирования и эксплуатации массива штабеля КВ.

Конструкция основания отвала штабеля участка КВ в расчетной модели в явном виде включает гравийный слой, песчаный слой, геомембрану LDPE и противофильтрационный элемент. В связи с невозможностью учета реального строения массива при выполнении расчетов устойчивости принято, что тело штабеля КВ однородное. Наклон основания в поперечном направлении составляет 3° , в продольном направлении менее 1° . Схема откоса штабеля КВ представлена на рисунке 4.12.

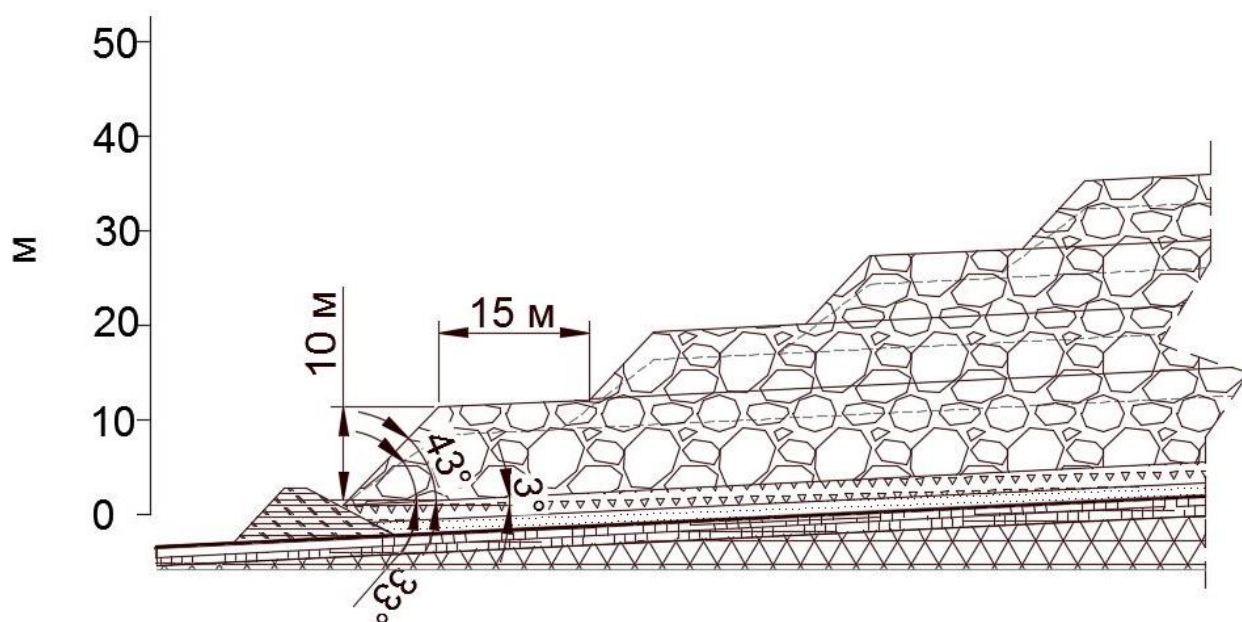


Рисунок 4.12 – Схема откоса штабеля КВ в поперечном сечении

Для выполнения расчетов оценки устойчивости массива штабеля КВ в соответствии с разделом 2.4 были выбраны две модели деформирования сред. Модель Кулона-Мора применяется для описания механического поведения грунтов основания и грунтов сооружения штабеля, в то время как модель упрочняющегося грунта (Hardening soil model) была обоснована для описания механического поведения окомкованной руды.

Расчетные параметры физико-механических характеристик материала пород основания и окомкованной руды штабеля сведены в таблице 4.2 и таблице 4.3. Расчетные характеристики тела массива штабеля участка КВ приняты согласно результатам лабораторных испытаний.

Таблица 4.2 – Основные физико-механические характеристики, используемые в расчетах (модель Кулона-Мора)

Наименование грунта	γ_{unsat} , кН/м ³	γ_{sat} , кН/м ³	e	E_0 , МПа	ν_0	c' , кПа	$\varphi', ^\circ$
Грунты основания							
Суглинок дресвяный с примесью торфа, мягкопластичный	15,6	18,4	0,73	10,0	0,35	18	20
Материал сооружения							
Тело дамбы	21,0	22,0	0,32	40,0	0,40	10	35
Защитный слой из щебенистого грунта	22,0	24,0	0,73	40,0	0,40	5	40

Примечание: γ_{unsat} – объемный вес грунта при естественной влажности; γ_{sat} – объемный вес грунта при полном водонасыщении; e – коэффициент пористости; E_0 – модуль деформации грунта; ν_0 – коэффициент Пуассона; c – удельное сцепление грунта; φ' – угол внутреннего трения

Таблица 4.3 – Основные физико-механические характеристики окомкованной руды, используемые в расчетах (модель Hardening soil)

γ_{unsat} , кН/м ³	γ_{sat} , кН/м ³	E_{50} , МПа	E_{oed} , МПа	E_{ur} , МПа	m	C , кПа	φ , град	ψ , град
15,6	17,3	10,0	6,5	30	0,6	40	31	0

В таблице 4.3: параметры γ_{unsat} , γ_{sat} , C имеют тот же смысл, что и в таблице 4.2; E_{50} – модуль деформации породы; E_{oed} – упругий модуль деформации породы; E_{ur} – модуль упругости породы; m – показатель, учитывающий влияние среднего напряжения на деформационные свойства породы; ψ – угол дилатансии.

Совместное деформирование руд штабеля и грунтов основания в значительной степени изменяют конфигурацию массива, а также наклон грунтового основания, что учтено при проведении расчетов.

Анализ научных публикаций позволил установить, что величина трения песчаного грунта по поверхности полимерной пленки принимается равным не более 0,57 (угол внутреннего трения не более 30°), для глинистых грунтов величина трения принимается не более угла внутреннего трения глинистого грунта [16, 18, 36, 52, 59, 94]. С учетом того, что контакт грунтового основания по пленке осуществляется с двух сторон, где по верху пленки отсыпается слой песка, а подстилающим слоем является противofильтрационный слой из суглинистого материала, и скольжение может осуществляться по верху и низу пленки, величина трения по контакту грунта с геомембраной принято равным 0,27 (угол внутреннего трения равен 15°) [59, 52]. Параметры геомембраны LDPE указаны в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Характеристики геомембраны LDPE

Материал	Толщина листа, мм	Модуль упругости, МПа	Предел прочности при разрыве, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %
Геомембрана LDPE	2	3,9	27	8

На контакте между геомембраной LDPE и грунтами основания дамбы принято специальное контактное условие, позволяющее моделировать условие скольжение тела массива относительно полимерной пленки.

Сначала, для оценки величин и характера перемещений была выполнена численная модель штабеля высотой 10 м. Результаты расчётов представлены на рисунке 4.13, где визуализирована картина распределения результирующих абсолютных смещений, полученных в процессе формирования первого яруса. Установлено, что в зависимости от начальной насыпной плотности руды величина оседания поверхности штабеля за счет самоуплотнения находится в пределах до 0,3 м.

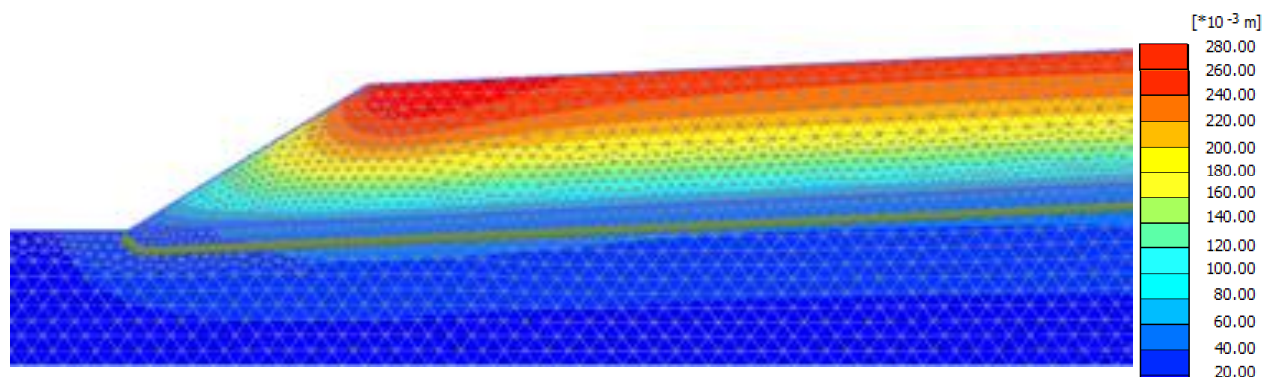


Рисунок 4.13 – Картина распределения результирующих абсолютных смещений (м) штабеля при формировании первого яруса (высота 10 м)

Затем численное моделирование формирования напряженного состояния штабеля КВ выполнялось согласно этапам его наращивания, с учетом проектных нагрузок от горнотранспортного оборудования (рисунок 4.14).

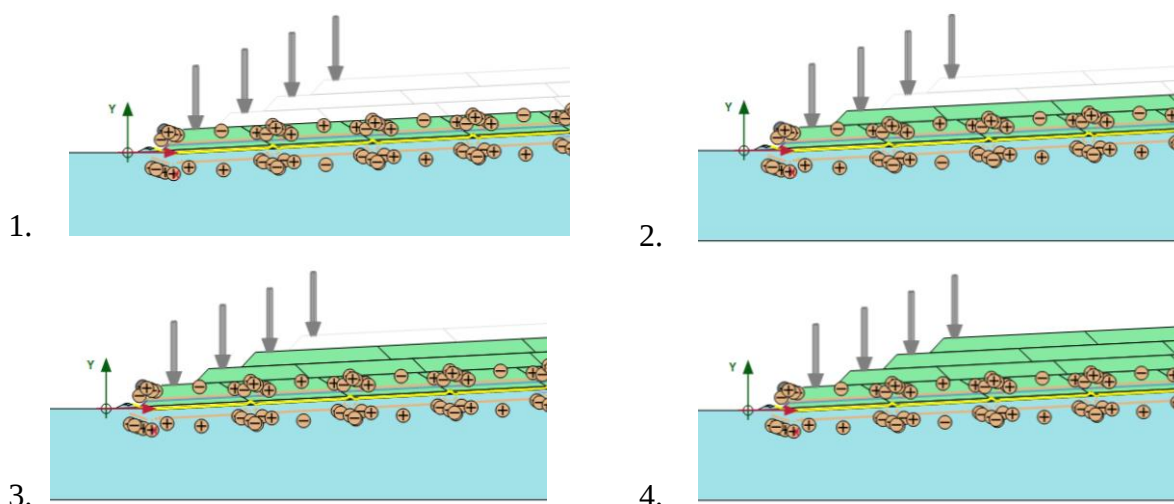


Рисунок 4.14 – Стадии численного моделирования формирования напряженного состояния штабеля КВ (поперечное сечение)

Результаты оценки устойчивости массива штабеля участка КВ в соответствии с принятыми расчетными схемами представлены в таблицах 4.5 и 4.6, а в таблице 4.7 приведены результаты оценки общей устойчивости массива с учетом фильтрационной модели.

Таблица 4.5 – Результаты оценки местной устойчивости массива на стадии строительства

Расчетное сечение	Коэффициент запаса по устойчивости при формировании яруса массива			
	I ярус	II ярус	III ярус	IV ярус
Без нагрузки от горнотранспортного оборудования				
Поперечное сечение - I	2,16 (1,72)	2,12 (1,72)	1,98 (1,72)	1,98 (1,72)
Продольное сечение - II	2,18 (1,87)	2,16 (1,87)	2,13 (1,87)	2,01 (1,87)
С учетом нагрузки от горнотранспортного оборудования				
Поперечное сечение - I	1,57 (1,44)	1,76 (1,73)	1,97(1,82)	1,90(1,82)
Продольное сечение - II	1,80 (1,53)	1,95 (1,84)	1,99 (1,85)	1,93 (1,80)

Примечание. Вне скобок приведены результаты оценки устойчивости, учитывающие изменение конфигурации массива в процессе его уплотнения; в скобках приведены результаты оценки устойчивости массива методом предельного равновесия, не учитывающие изменение начальной конфигурации тела массива в процессе уплотнения.

Таблица 4.6 – Результаты оценки общей устойчивости откоса

Расчетное сечение	Коэффициент запаса по устойчивости при различных схемах нагружения			
	Стадия строительства	Стадия эксплуатации, режим нормальной эксплуатации	Стадия эксплуатации, полное водонасыщение первого яруса	Стадия эксплуатации, полное водонасыщение всех ярусов
Поперечное сечение - I	1,83	1,61	1,36	0,76
Продольное сечение - II	1,94	1,88	1,52	0,91

Графическое представление результатов расчетов устойчивости для других расчетных вариантов и расчетных схем представлены в работе [135].

Таблица 4.7 – Результаты оценки устойчивости массива на стадии эксплуатации (фильтрационный расчет)

Расчетное сечение	Коэффициент запаса по устойчивости при формировании яруса массива			
	I ярус	II ярус	III ярус	IV ярус
Без нагрузки от гонотранспортного оборудования				
Поперечное сечение - I	1,54	1,55	1,56	1,69
Продольное сечение - II	1,71	1,71	1,80	1,83
С учетом нагрузки от горнооттранспортного оборудования				
Поперечное сечение - I	1,26	1,27	1,26	1,36
Продольное сечение - II	1,52	1,53	1,53	1,54

На рисунках 4.15 - 4.16 представлены результаты моделирования процесса развития деформаций массива. По результатам исследования установлено, что поверхность скольжения локализуется в рамках яруса и не распространяется на весь штабель, это говорит о более высоком общем коэффициенте устойчивости штабеля ввиду того, что сдвигающие призмы сил активного давления не превышают внутренние силы сопротивления смещению пород штабеля. Поверхность уровня подземных вод (раствора) принята, исходя из наихудшего варианта, вне зависимости от этапа сооружения массива.

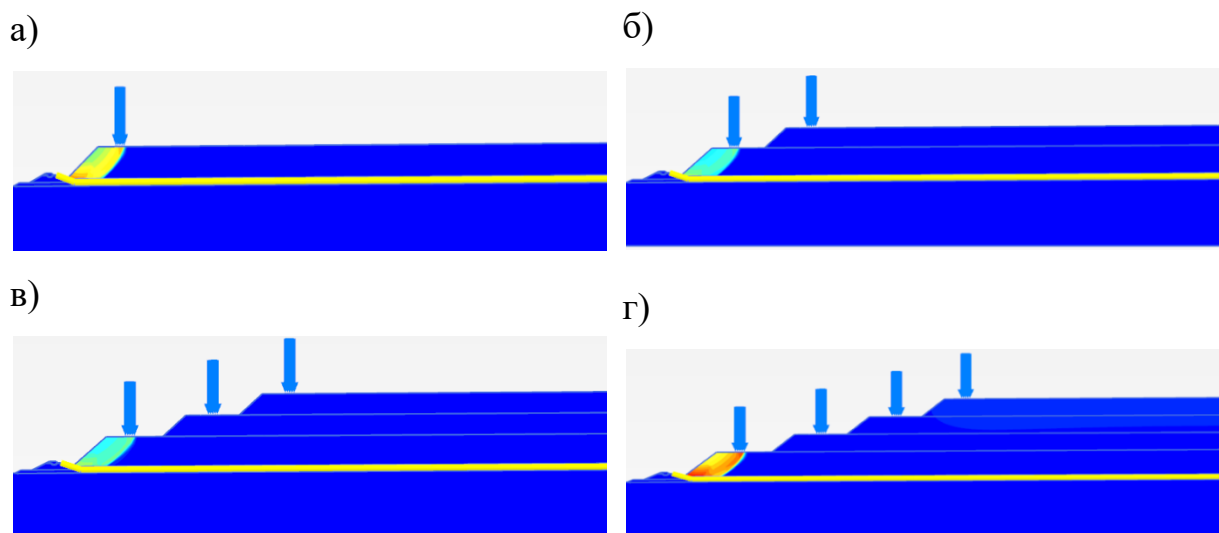


Рисунок 4.15 – Визуализация результатов численного моделирования НДС, форма потери устойчивости штабеля участка КВ: продольное сечение, с учетом нагрузки от горнотранспортного оборудования, стадия эксплуатации

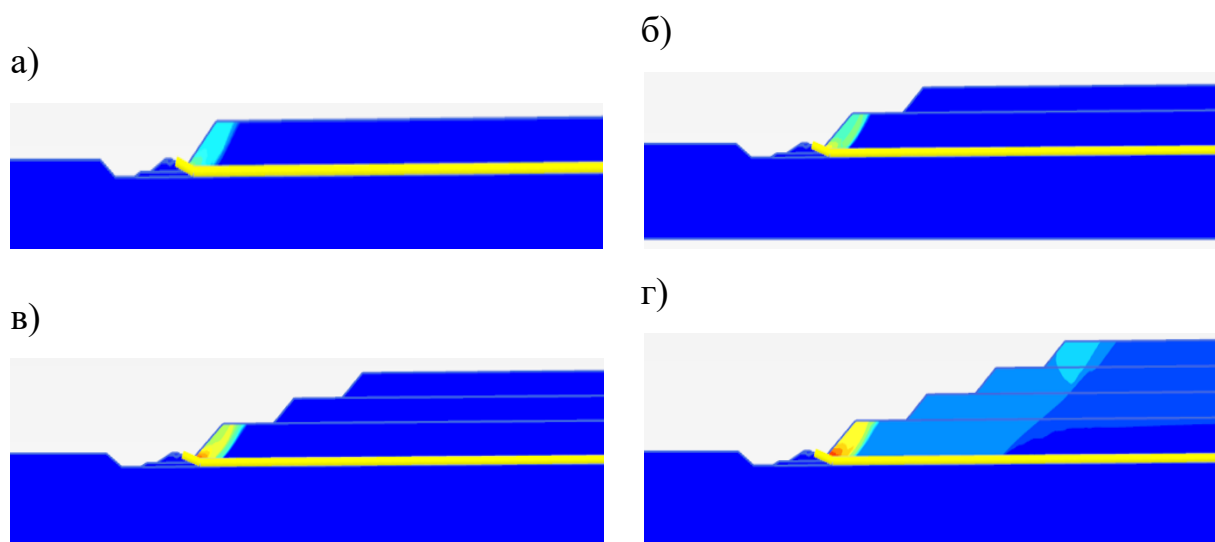


Рисунок 4.16 – Визуализация результатов численного моделирования НДС, форма потери устойчивости штабеля участка КВ: продольное сечение, без учета нагрузки от горнотранспортного оборудования, стадия эксплуатации

По результатам анализа основные деформации при различных расчетных схемах происходят в окомкованной руде первого яруса. Минимальный коэффициент запаса по устойчивости для рассмотренных расчетных схем составляет 1,26 – что выше нормативного значения, равного 1,2 в соответствии с правилами обеспечения устойчивости [89].

С целью уточнения параметров штабеля КВ также было выполнено моделирование различных параметров берм штабеля КВ при нормальном режиме эксплуатации для оценки потенциальной возможности увеличения породоемкости массива.

Коэффициенты устойчивости штабеля участка КВ при различных параметрах берм приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Коэффициенты устойчивости штабеля КВ при различных параметрах берм

Ширина бермы, м	Коэффициент запаса по устойчивости штабеля			
	1 ярус	2 ярус	3 ярус	4 ярус
5	2,06	1,64	1,37	1,21
10	2,06	1,67	1,44	1,27
15	2,06	1,75	1,52	1,29
20	2,06	1,81	1,52	1,29
25	2,06	1,88	1,52	1,29

По результатам моделирования установлено, что ширину берм штабеля КВ возможно сократить до 5 м без возникновения дополнительных рисков потери устойчивости для всех ярусов штабеля КВ.

Анализ результатов расчетов устойчивости показывает, что в процессе строительства при всех возможных вариантах нагружения устойчивость штабеля обеспечивается. На стадии эксплуатации, при принятом режиме эксплуатации устойчивость штабеля при всех возможных вариантах нагружения также обеспечивается. Общая устойчивость массива обеспечивается при всех режимах эксплуатации массива кроме полного насыщения растворами всего тела штабеля. При этом полное водонасыщение массива штабеля не допускается с точки зрения эксплуатации штабеля КВ, а также поскольку общий коэффициент запаса устойчивости в данном случае меньше предельно допустимого.

Оценка устойчивости массива штабеля участка КВ с учетом положения раствора в окомкованной руде и работы дренажной системы, полученной на основании фильтрационных расчетов, показывает, что устойчивость массива

будет обеспечена как при нормальном режиме эксплуатации. Минимальные значения коэффициентов запаса по устойчивости получены при рассмотрении поперечного сечения штабеля участка КВ, где угол откоса штабеля совпадает с наибольшим углом наклона техногенного массива и является наихудшим критическим случаем при рассмотрении задачи устойчивости в рамках выбранного объекта исследования.

4.5 Рекомендации по инженерно-геологическому обеспечению устойчивости штабеля кучного выщелачивания

Инженерно-геологическое обеспечение устойчивости горнотехнических сооружений является одним из ключевых направлений обеспечения промышленной и экологической безопасности горных предприятий. В этой связи научные исследования, посвящённые вопросам устойчивости горно-технических сооружений, проводились и продолжают проводиться различными авторами [18, 53, 54, 70, 71, 129] в отношении к откосным сооружениям различного назначения.

Объекты КВ золота являются сложными природно-техническими системами, поэтому мониторинг состояния техногенных массивов штабелей КВ должен являться неотъемлемой частью системы управления устойчивостью этих сооружений в следствие установленных особенностей процесса их формирования и изменений их структуры и свойств при эксплуатации. Актуальным нормативным документом, регулирующим устойчивость горнотехнических сооружений и положения об их контроле, является Приказ № 439 от 13 ноября 2020 г. [89], который определяет правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов. При этом он не охватывает весь спектр специфических особенностей, свойственных объектам КВ, таких как инфильтрационные процессы, разрушение структуры окатышей, развитие фильтрационных и осадочных деформаций в условиях постоянного изменения водонасыщенности массива, которые требуют учета.

Комплексный мониторинг состояния техногенных массивов штабелей КВ должен основываться на системном подходе к обеспечению их устойчивости и безопасности эксплуатации, и включать в себя следующие компоненты:

маркшейдерский, инженерно-геологический, гидрогеологический, технологический и геомеханический. Это позволяет своевременно выявлять отклонения от проектных параметров, прогнозировать развитие деформационных процессов и своевременно разрабатывать корректирующие мероприятия.

Анализ опубликованных данных [4, 33, 35, 36, 143- 145, 152] и выполненные исследования позволяют сделать вывод, что на штабелях КВ, сложенных окомкованными песчано-глинистыми рудами куранахского типа, могут возникать следующие типы деформаций: осадки поверхности штабеля КВ, оползни и фильтрационные деформации (таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Характеристика деформаций штабелей КВ, сложенных песчано-глинистыми окомкованными рудами куранахского типа

Тип деформации	Причины возникновения	Последствия
Осадки поверхности массива штабеля	Уплотнение рудного материала под действием собственного веса, технологических нагрузок, увлажнения и разрушения окатышей. Превышение уровня растворов кровли дренажного слоя. Нарушение технологических этапов окомкования.	Локальная деформация массива. Изменение НДС. Ухудшение коэффициента фильтрации.
Оползни	Увеличение гидростатического давления. Снижение прочностных характеристик. Превышение допустимых параметров сооружения.	Разрушение откосов или всего сооружения
Фильтрационные деформации	Превышение уровня растворов кровли дренажного слоя.	Ослабление несущей способности и потеря устойчивости. Изменение НДС. Локальные осадки на участках подъема уровня растворов выше дренажного слоя.

На основе анализа условий формирования и эксплуатации штабеля КВ, а также с учетом накопленного отечественного и международного опыта эксплуатации техногенных массивов были сформулированы рекомендации [3, 4,

49, 18, 83] по выполнению комплексного мониторинга, представленные в таблице 4.10.

Предложенный подход позволяет получать объективные данные о процессах деформирования массива на различных стадиях его формирования и эксплуатации. Эти сведения служат основой для последующего проектирования и реализации противодеформационных мероприятий, направленных на стабилизацию массива и предотвращение развития аварийных ситуаций.

Таблица 4.10 – Рекомендации по мониторингу устойчивости штабеля КВ

Вид мониторинга	Диагностические показатели	Методы
Маркшейдерский	Высота, угол откоса	Наземные, дистанционные, визуальные методы для обнаружения первичных признаков развития деформаций
Инженерно-геологический	Прочность включений, удельное сцепление, угол внутреннего трения	Полевые, лабораторные методы для оценки физико-механических свойств
Технологический	Технологические параметры	Инструментальные методы для оценки соответствия проектных и фактических параметров
Гидрогеологический	Коэффициент фильтрации, влажность, положение уровня растворов в массиве	Полевые и лабораторные методы для оценки фильтрационных параметров и уровня режима
Геомеханический	Напряженно-деформированное состояние	Численное моделирование для оценки устойчивости и прогноза развития НДС массива

Маркшейдерский контроль направлен на получение информации об изменении геометрических размеров, деформаций, развивающихся в массиве штабеля участка КВ на различных этапах его формирования и эксплуатации: отсыпка первого яруса, орошение, отсыпка последующего яруса и т.д. Предусматривает замеры положения поверхности штабеля, а также отдельные инструментальные замеры оседания поверхности штабеля посредством наземных и дистанционных методов. На сегодняшний день наиболее эффективным инструментом маркшейдерского мониторинга выступает аэрофотосъемка с помощью беспилотного летательного аппарата (далее – БПЛА) различных типов, характеризуется высокой оперативностью проведения работ, детальностью

и качеством полученных данных, позволяет осуществлять мониторинг процесса работы и выявлять отклонения и потенциальные угрозы, а также проводить контроль соответствия реальных объектов существующим проектным решениям. Также необходимо предусмотреть мониторинг устойчивости откосов массива, выражающийся в периодических измерениях вертикальных и горизонтальных смещений по реперным линиям, закладываемым по откосам, при этом особое внимание необходимо уделить участкам с наклоном основания, совпадающим с падением откосов. Частота: минимум два раза в год, а при наличии рисков – чаще.

Инженерно-геологический контроль направлен на уточнение строения и физико-механических свойств горных пород на отдельных участках, требующих внимания. Основой для проведения дополнительных изысканий служит наблюдение за нарастающими деформациями, которые могут возникать даже при удовлетворительном состоянии сооружения. Контроль включает отбор образцов руды в процессе бурения скважин с последующим лабораторным исследованием отобранных образцов. В том числе это позволяет оценить физико-механические свойства руды штабеля до выщелачивания и после обработки выщелачивающими растворами. Такой подход дает возможность проведения анализа изменения физико-механических характеристик окомкованных руд массива и изучить строение массива по глубине. Анализ полученных данных обеспечивает возможность сверки проектных параметров, заложенным на этапе обоснования конструкции массива. Такие исследования рекомендуется выполнять перед наращиванием высоты штабеля.

Для получения комплексного представления о внутреннем строении техногенного массива штабеля КВ, распределении слабопроницаемых участков, каналах фильтрации и зонах потенциального нарушения гидроизоляции также возможно использовать современные геофизические методы, в частности трёхмерную электротомографию (3D геоэлектрическое моделирование) [78]. Данный метод обеспечивает пространственно-достоверную интерпретацию электрофизических характеристик массива, позволяя дифференцировать участки с различной степенью водонасыщения и фильтрационной проницаемости.

Результаты анализа 3D геоэлектрических моделей могут быть эффективно использованы для корректировки параметров орошения, выявления зон возможных фильтрационных потерь выщелачивающего раствора, а также для оценки равномерности распределения потоков в теле штабеля, что в совокупности повышает эффективность и безопасность технологического процесса.

Гидрогеологический контроль представляет собой важнейший этап мониторинга, позволяющий быстро реагировать на изменения в условиях эксплуатации штабелей КВ. В процессе проектирования параметров массива штабеля КВ необходимо учитывать результаты фильтрационного моделирования гидродинамического режима. Для обеспечения эффективности гидрогеологического контроля необходимо предусмотреть формирование сети датчиков гидростатического давления в основании штабеля КВ с автоматизированной системой сбора данных и оценки наблюдаемых показателей. Это обеспечит динамическое отслеживание гидродинамического режима эксплуатации штабеля КВ.

Геомеханический контроль базируется на основе данных всех составляющих мониторинга. В его структуре методами численного моделирования производится оценка НДС, а также прогноз развития деформаций.

4.6 Выводы по главе 4

1. По результатам анализа данных маркшейдерского мониторинга штабеля КВ при двухярусном его строении на момент исследований установлено, что наибольшие деформации наблюдались на этапе формирования первого яруса. Максимальные деформации отмечены в краевых зонах, где постепенно происходит выполаживание откоса за счёт возникновения и развития гравитационных процессов, а также уменьшения высоты яруса вследствие его уплотнения. Анализ показал, что в процессе эксплуатации штабеля КВ интенсивность деформаций существенно снижается после выведения яруса из орошения, что коррелирует с данными укрупненно-лабораторных стендовых испытаний.

2. Выявлены особенности формирования неоднородности строения массива штабеля КВ из окомкованных песчано-глинистых руд куранахского типа,

что обусловлено сегрегацией рудного материала при формировании штабеля стakerом. Наибольшее накопление крупной фракции наблюдается у основания и на откосах. Сегрегация приводит к образованию зон с различной фильтрационной способностью и каналам миграции растворов, что может снижать эффективность выщелачивания. Моделирование реальной структуры штабеля, образующейся вследствие сегрегации практически невозможно, что для целей оценки и прогноза его устойчивости обуславливает необходимость рассмотрения массива как изотропного.

3. Комплексное исследование фильтрационных характеристик окомкованных песчано-глинистых руд куранахского типа позволило выполнить калибровку численной модели ненасыщенной фильтрации для прогноза техногенного гидродинамического режима эксплуатации штабеля. На основании моделирования определены допустимые параметры орошения при условии недопущения возникновения техногенного водоносного горизонта в массиве руд и подтверждена эффективность работы дренажного слоя при нормальных условиях эксплуатации штабеля.

4. Расчёты устойчивости штабеля, выполненные методом численного моделирования, подтвердили ее обеспеченность при инфильтрационном режиме эксплуатации с обоснованными параметрами орошения. Коэффициент запаса устойчивости определен в диапазоне от 1,26 до 2,16 и соответствует нормативным требованиям (не менее 1,20). Установлено, что наиболее неблагоприятные условия формируются в поперечном сечении штабеля при наибольшем угле наклона основания. Расчетами подтверждено, что уменьшение ширины берм до 5 м не приводит к потере устойчивости, что позволяет повысить эффективность эксплуатации штабеля за счёт увеличения объемов руд, вовлеченных в процесс выщелачивания.

5. По результатам экспериментальных исследований и численного моделирования сформулированы рекомендации по инженерно-геологическому обеспечению устойчивости штабелей КВ. Для обеспечения устойчивости штабеля КВ необходимо проводить комплексный мониторинг, включающий

маркшейдерский, инженерно-геологический, технологический, гидрогеологический и геомеханический контроль. Это позволит своевременно выявлять негативные изменения в состоянии массива и предотвращать аварийные ситуации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена научная задача повышения устойчивости техногенных массивов из окомкованных песчано-глинистых руд на участках кучного выщелачивания золота при их формировании и промышленной эксплуатации. Основные научные и практические результаты исследований заключаются в следующем:

1. Предложен подход к прогнозу техногенного гидродинамического режима в штабеле кучного выщелачивания на основе моделей ненасыщенной фильтрации Van Genuchten – Mualem и результатов укрупненно-лабораторных исследований песчано-глинистых окомкованных золотосодержащих руд.

2. Определены оптимальные параметры интенсивности орошения рудного штабеля растворами цианида для различных значений коэффициента фильтрации окомкованной руды в зависимости от степени ее водонасыщения при условии, что в процессе эксплуатации не достигается показатель предельного значения степени водонасыщения — 0,8 д. ед.

3. Установлено, что гранулометрический состав и физико-механические свойства песчано-глинистых окомкованных руд куранахского типа изменяются в процессе формирования и эксплуатации штабеля кучного выщелачивания, при этом прочностные свойства, благодаря содержанию псефитовых частиц, существенно не ухудшаются.

4. Выявлены причины развития неравномерных деформаций оседаний поверхности рудного штабеля в процессе его орошения растворами цианида и увеличения высоты сооружения при формировании последующих ярусов. Оседания вызваны разрушением окатышей при увеличении их влажности и давления, а неравномерность деформаций обусловлена неоднородностью структуры массива за счет сегрегации рудного материала при его укладке в штабель.

5. Установлено, что процесс сегрегации материала приводит к формированию зон, отличающихся по гранулометрическому составу, что обуславливает фильтрационную анизотропию массива. В результате этого

формируются зоны, сложенные мелкими фракциями, которые при размокании образуют участки с коэффициентом фильтрации, характерным для глинистых пород.

6. Разработаны рекомендации по инженерно-геологическому обеспечению устойчивости штабелей кучного выщелачивания золота на основе выполнения комплексного мониторинга состояния техногенных массивов на всех этапах их формирования и эксплуатации, основанные на маркшейдерском, инженерно-геологическом, технологическом, гидрогеологическом и геомеханическом контроле сооружения.

7. Результаты работы могут быть использованы проектными и эксплуатирующими организациями при обосновании оптимальных параметров штабелей кучного выщелачивания золота и их инженерно-геологическом изучении в процессе эксплуатации, а также для организации мониторинга за их устойчивостью.

Перспективным направлением развития научных исследований по тематике диссертации является разработка методов оценки структуры штабелей кучного выщелачивания в объеме всего техногенного массива в процессе отсыпки рудного материала и ее изменения после орошения и наращивании высоты сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абелев, Ю. М. Основы проектирования и строительства на просадочных макропористых грунтах / Ю.М. Абелев, М.Ю. Абелев//– М.: Стройиздат. – 1968. – 430 с.
2. Абрамов, В. А. Геолого-тектонические предпосылки золотого оруденения Центрального Алдана / В.А. Абрамов, Л.Н. Кичигин, А.Я. Кочетков и др. // Тектоника восточной части Сибирской платформы. Якутск, ЯФ СО АН СССР, 1979. С. 31-52.
3. Авдеев, П. Б. Опыт применения кучного выщелачивания на рудных карьерах Забайкалья/ П.Б. Авдеев, Ю.М. Овешников// ГИАБ. – 2014. – № 4. – С. 90-95.
4. Ананенко, Е.В. Анализ риска развития деформаций и геомеханический мониторинг для природно-технических систем «отвал – основание» / Е.В. Ананенко, С.П. Бахаева // ГИАБ. – 2023. № 9. – С. 5-21. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_9_0_5.
5. Аренс, В. Ж. Физико-химическая геотехнология: учебное пособие. М.: Горная книга, 2001. – 656 с.
6. Багазеев, В. К. Физико-механические свойства минерального сырья в штабеле кучного выщелачивания / В.К. Багазеев, Н.Г. Валиев, С.В. Гринченко // ГИАБ. 2008. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/fiziko-mehanicheskie-svoystva-mineralnogo-syrya-v-shtabele-kuchnogo-vyschelachivaniya> (дата обращения: 11.04.2024).
7. Балобаев, В. Т. Исследования криолитозоны Восточной Сибири / В.Т. Балобаев, Ю.Б. Скачков, Н.И. Шендер // География и природные ресурсы. – 2009. – №2. – С. 50-56.
8. Бахаева, С. П. Расчет устойчивости откосов при открытой геотехнологии: учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Маркшейдерское дело» направления подготовки «Горное дело» //– Кемерово: КузГТУ, 2011. – 158 с.

9. Бойцов, В. Е. Золотоурановые и золоторудные месторождения Центрального Алдана – крупнейший потенциальный источник этих металлов в России / В.Е. Бойцов, Г.Н. Пилипенко // Записки Горного института. – 2001. – Т. 149. – С. 138-140.
10. Васильев, М. Д. Математическое моделирование и прогнозирование состояний экосистем / М.Д. Васильев, Г.И. Иванов, О.И. Матвеева, О.А. Поморцев, **А.А. Поморцева**, Ю.И. Трофимцев – Якутск, ООО «Компания Дани-Алмас», 2020. – 138с.
11. Вестник Золотопромышленника [Электронный ресурс] // Прайм. Топ-10 месторождений по AISC – Россия в лидерах. 29 апреля, 2019. URL:<https://gold.1prime.ru/analytics/20190429/314240.html> (дата обращения: 20.02.2024).
12. Вестник Золотопромышленника [Электронный ресурс] //Первое полугодие 2023: восстановление, 09 октября 2023. URL: <https://gold.1prime.ru/reviews/20231009/512598.html>
13. Вознесенский, Е. А. Общая генетическая классификация техногенных грунтов/ Е.А. Вознесенский// Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2019. – №5 – С. 3-9.
14. Воробьев, А. Е. Типизация систем орошения выщелачиваемой руды и сбора продуктивных растворов/ А.Е. Воробьев, К.Г. Каргинов, Е.С. Одинцова, Т.В. Чекушина // ГИАБ. – 2002. – №9. – С. 54-60.
15. Воробьев, А. Е. Основные факторы, определяющие эффективность орошения штабеля КВ / А.Е. Воробьев, Х. Тчаро // Вестник Евразийской науки. – 2019. – №1. URL: <https://esj.today/PDF/51NZVN119.pdf>.
16. Воробьев, А. Е. Кучное выщелачивание металлов / А.Е. Воробьев, Т.В. Чекушина // В кн.: Физико-химическая геотехнология – М.: МГГУ, 2001. – С. 541-558.
17. Гальперин, А. М. Геомеханика открытых горных работ / А.М. Гальперин // М.: Горная книга, 2012. – 480 с.

18. Гальперин, А. М. Инженерно-геологическое и геотехническое обеспечение возведения, консервации и рекультивации гидроотвалов и хвостохранилищ (анализ 30-летнего опыта) / А.М. Гальперин, В.С. Зайцев, Ю.В. Кириченко – М.: Геоэкология, №4, 2000. – С.307-315.

19. Гальперин, А. М. Гидрогеомеханическая оценка состояния водонасыщенных техногенных массивов / А.М. Гальперин, В.В. Мосейкин, Ю.И. Кутепов // в сб. науч. тр. VIII Международной научно-практической конференции «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий: геомеханическое обеспечение проектирования и сопровождения горных работ», Санкт-Петербург, 2017. – С. 302-309.

20. Гальперин, А. М. Освоение техногенных массивов на горных предприятиях / А.М. Гальперин, Ю.И. Кутепов, Ю.В. Кириченко, // М.: Горная книга, 2012. – 336 с.

21. Голик, В. И. Эколого-экономические аспекты ресурсосбережения при разработке месторождений полезных ископаемых/ В.И. Голик, Ю.И. Разоренов, В.Г. Лукьянов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. –2017. –Т. 328 (6). – С. 18-27.

22. Горчакова, Д. С. Состояние российской золотодобывающей отрасли / Д. С. Горчакова// Экономический журнал. – 2012. – Т. 1. – № 25. – С. 89-96.

23. Господариков, А. П. Математическое моделирование прикладных задач механики горных пород и массивов / А.П. Господариков, М.А. Зацепин // Записки Горного института. – 2014. – Т. 207. – С. 217-221.

24. ГОСТ 21560.2–82. Удобрения минеральные. Метод определения статической прочности гранул: межгосударственный стандарт. – Введ. 1983-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 4 с.

25. ГОСТ 25100–2020. Грунты. Классификация: межгосударственный стандарт. – Введ. 2021-01-01. – Взамен ГОСТ 25100–2011. – М.: Технорматив, 2021. – 38 с.

26. ГОСТ 12536–2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава:

межгосударственный стандарт. – Введ. 2015-07-01. – Взамен ГОСТ 12536–79. – М.: Стандартиформ, 2015. – 19 с.

27. ГОСТ 5180–2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик: межгосударственный стандарт. – Введ. 2016-04-01. – Взамен ГОСТ 5180–84. – М.: Стандартиформ, 2016. – 23 с.

28. ГОСТ 25584–2016. Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации: межгосударственный стандарт. – Введ. 2017-05-01. – Взамен ГОСТ 25584–90. – М.: Стандартиформ, 2017. – 27 с.

29. ГОСТ 22733–2016. Грунты. Методы лабораторного определения максимальной плотности: межгосударственный стандарт. – Введ. 2017-01-01. – Взамен ГОСТ 22733–2002. – М.: Стандартиформ, 2017. – 16 с.

30. ГОСТ 12248.1–2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза: межгосударственный стандарт. – Введ. 2021-06-01. – М.: Стандартиформ, 2021. – 22 с.

31. ГОСТ 21153.3–85. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении: государственный стандарт. – Введ. 1987-01-01. – Взамен ГОСТ 21153.3–75 и ГОСТ 21153.4–75. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 11 с. – (Утв. и введен в действие Постановлением Госстандарта СССР от 27.11.1985 № 3731).

32. Дашко, Р. Э. Механика горных пород: учебник для ВУЗов / Р.Э. Дашко – М.: Недра, 1987. – 264 с.

33. Дементьев, В. Е. Опыт Иргиредмета в области разработки, проектирования и внедрения технологии кучного выщелачивания на предприятиях России / В.Е. Дементьев, А.П. Татаринов, С.С. Гудков, Ю.Е. Емельянов, В.Н. Евдокимов, С.Г. Григорьев, Е.В. Галюков // в кн. Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов, Т. 2: Золото. – М.: Руда и металлы, 2005. – С. 32-39.

34. Дементьев, В. Е. Кучное выщелачивание золота и серебра / В.Е. Дементьев, Г.Я. Дружинина, С.С. Гудков // Иркутск: Иргиредмет, 2004. – 352 с.

35. Демин, А. М. Закономерности проявлений деформаций откосов в карьерах / А.М. Демин – М.: Наука, 1981. – 144 с.
36. Емельянова, Е. П. Основные закономерности оползневых процессов / Е.П. Емельянова–М.: Недра, 1972. – 310 с.
37. Еремин, Г. М. Физико-технические и геомеханические процессы в насыпных породах на склонах / Г.М. Еремин – М.: Горная книга, 2007. – 337 с.
38. Зацепин, М. А. О некоторых подходах к численному моделированию динамического разрушения массива горных пород при ведении буровзрывных работ / А.П. Господариков, М.А. Зацепин // Горный журнал. –2023. – № 9. – С.21-27. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.03.
39. Зиангиров, Р. С. Принципиальные вопросы построения общей классификации грунтов/ Р.С. Зиангиров, В.Т. Трофимов // Геоэкология. – 1995. –№ 3. – С. 103-109.
40. Золотодобыча [Электронный ресурс] // Цена золота: от золотого стандарта до наших дней 2023 года URL:<https://zolotodb.ru/article/12509> (дата обращения: 20.02.2024).
41. Золоторудные месторождения России /Под ред. М.М. Константинова. М.: Акварель, 2010. – 349 с.
42. Иванов, И. П. Инженерная геодинамика / И.П. Иванов, Ю.Б. Тржцинский. – Санкт-Петербург: Наука, 2001. – 414 с.
43. Истратова, К. Российские золотые запасы: мифы и реальность / К.Истратова // Добывающая промышленность. – 2019. – №4 (16). – С. 158-164.
44. Капырин, И. В. Верификация моделей ненасыщенной фильтрации и переноса в зоне аэрации на примере расчетного кода GeRa / И.В. Капырин, В.В. Сускин, А.В. Расторгуев, К.Д. Никитин // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. Вып.1. 2017. – С. 60-75.
45. Карасев, М. А. Анализ моделей прогноза напряженно-деформированного состояния техногенных грунтов низкой прочности /

М.А. Карасев, Г.Б. Поспехов, Т.С. Астапенко, В.С. Шишкина // ГИАБ. – 2023. – № 11. – С. 49-69. DOI: 10.25018/0236-1493-2023-11-0-49.

46. Кашуба, С. Г. Кучное выщелачивание в российской практике – обзор опыта и анализ перспектив / С.Г.Кашуба, М.И.Лесков // Золото и технологии. – Март № 1 (23). – 2014. – С. 10-14.

47. Ковлеков, И. И. Кучное выщелачивание золотосодержащих руд в условиях Севера/ И.И.Ковлеков, В.А.Шерстов, Л.Н.Князев, П.С.Варлаков, А.А.Дмитриев// ГИАБ. – 2004. – № 12. – С. 279-281.

48. Константинов, М.М. Золоторудные месторождения России / М.М. Константинов – М.: Акварель, 2010. – 349 с.

49. Королев, В. А. Мониторинг геологических, литотехнических и эколого-геологических систем: учебное пособие / В.А. Королев, В.Т. Трофимов // Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, геолог. фак. – М.: КДУ, 2015. – 416 с.

50. Крылова, Г. С. Особенности технологических схем кучного выщелачивания золота/ Г.С. Крылова, Г.В. Седельникова, В.Н. Елисеев // в кн. Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов: в 2 томах, Т. 2: Золото.– М.: Издательство «Руда и металлы», 2005. – С. 88-91.

51. Крылова, Г. С. Перспективы кучного выщелачивания золота из техногенного сырья / Г.С. Крылова, Г.В. Седельникова, Н.И. Королев // в кн. Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов: в 2 томах, Т. 2: Золото. – М.: Издательство «Руда и металлы», 2005. – С. 84-88.

52. Кутепова Н. А. Влияние на устойчивость отвалов гидроизоляции основания с применением геосинтетических материалов (геомембран) / Кутепова Н. А., Кутепов Ю. И., Васильева А. Д., Кутепов Ю. Ю. // ГИАБ. – 2025. – № 1. – С. 47–65. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_1_0_47.

53. Кутепов, Ю. И. Методология инженерно-геологического изучения гидрогеомеханических процессов в техногенно-нарушенных массивах при разработке МПИ / Ю.И. Кутепов, Н.А. Кутепова // ГИАБ. –2014. – № 8. – С. 123-131.

54. Кутепов, Ю. И. Научно-методические основы инженерно-геологического обеспечения отвалообразования при разработке угольных месторождений : дис. ... д-ра техн. наук: 05.15.15. – Москва, 1999. – 354 с.
55. Кучное выщелачивание благородных металлов / под ред. М.И. Фазлуллина. – М.: Издательство АГН, 2001. – 647 с.
56. Кучное выщелачивание золота – зарубежный опыт и перспективы развития. Справочник / Под ред. В.В. Караганова, Б.С. Ужкенова // Москва – Алма-Ата, 2002. – 260 с.
57. Лаптев Ю. В. Теоретические основы процесса сегрегации горной массы / Ю. В. Лаптев, А. В. Гальянов // Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр. – Екатеринбург, 2004. – С. 245-259. – (Сб. науч. тр. / ИГД УрО РАН, Вып. 2 (92).
58. Лузин, Б. С. Экономические проблемы золотодобывающей промышленности //– М: Ассоциация горной книги, 2002. – 113 с.
59. Лушников А. С. Геомеханическое обоснование технологических параметров штабеля кучного выщелачивания: дис. ... канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2015. – 137 с.
60. Лушников, Я. В. Определение физико-механических свойств окатышей при формировании штабеля кучного выщелачивания / Я.В. Лушников, В.К. Багазеев // Горный журнал. – 2013. – № 8. – С. 124-127.
61. Лобанов, В. А., Кириллина К.С. Современные и будущие изменения климата Республики Саха (Якутия). Монография – СПб.: РГГМУ, 2019. – 157 с.
62. Ломтадзе, В. Д. Физико-механические свойства горных пород: методы лабораторных исследований / В. Д. Ломтадзе. – 2-е изд. – Л.: Недра, 1990. – 328 с.
63. Ломтадзе, В. Д. Словарь по инженерной геологии/ В.Д.Ломтадзе – СПб: СПб горный институт, 1999. – 360 с.
64. Лысенко М. П. Состав и физико-механические свойства грунтов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.» Недра, 1980. – с. 272.

65. Макаров, В. А. Актуальные вопросы оценки и освоения техногенных месторождений золота / В.А. Макаров, П.Н. Самородский // Золото и технологии. – 2018. – №4 (42). – С.72-90.

66. Максимов, В. М. Справочное руководство гидрогеолога / В.М. Максимов, В.Д. Бабушкин и др. – Л.: Недра, 1979. – 512 с.

67. Маринин, М. А., Комплексное изучение фильтрационных свойств окомкованных песчано-глинистых руд и режимов фильтрации в штабеле кучного выщелачивания/ М. А Маринин, М. А Карасев, Г.Б. Поспехов, **А.А. Поморцева**, В.Н. Кондакова, В.И. Сушкова // Записки Горного института. – 2023. – Т. 259. – С. – 30-40. DOI: 10.31897/PMI.2023.7.

68. Матвеева, Т. Н. Научное обоснование перспективных реагентов для извлечения тонковкрапленного золота из труднообогатимых руд и техногенных продуктов / Т.Н.Матвеева // сб. тр. международной конференции «Проблемы комплексной и экологически безопасной переработки природного и техногенного минерального сырья (Плаксинские чтения – 2021)». Владикавказ, 2021. – С. 42-48.

69. Методика оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем с крупнообломочными включениями / ДальНИИС. – М.: Стройиздат, 1989. – 24 с.

70. Методическое пособие по изучению инженерно-геологических условий угольных месторождений, подлежащих разработке открытым способом – Л.: Недра. 1986. – 113 с.

71. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости– Л.: ВНИМИ. 1987. – 118 с

72. Минеев, Г. Г. Кучное выщелачивание золотосодержащих руд / Г.Г. Минеев, А.А. Васильев, А.Г. Никитенко // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 4. – С. 147-156. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-4-147-156.

73. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 году: гос. докл. – М.: ВИМС, 2023. – 639 с. URL: <https://vims-geo.ru/ru/news/gosudarstvennyj-doklad-o-sostoyanii-i-ispolzovanii-mineralno-syrevyh-resursov-rossijskoj-federacii-v-2022-godu/> (дата обращения: 01.02.2025)

74. Молчанов, А. В. Золоторудные районы и узлы Алдано-Становой металлогенической провинции / А.В.Молчанов, А.В.Терехов, В.В.Шатов, О.В.Петров, К.А.Кукушкин, Д.С.Козлов, Н.В.Шатова // Региональная геология и металлогения. – 2017. – № 17. – С. 93-111.

75. Новгородова, М. А. Влияние давления всасывания глинистых неполностью водонасыщенных грунтов на устойчивость склона / Новгородова М.А., Горобцов Д.Н., Ушаков А.С. // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2024;66(2):69-79. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-2-69-79>

76. Нурок, Г. А. Гидроотвалы на карьерах / Г.А.Нурок, А.Г.Лутовинов, А.Д. Шерстюков – М.: Недра, 1977. – 311 с.

77. Огородникова, Е. Н. Техногенные грунты: учебное пособие / Е. Н. Огородникова, С.К.Николаева – М.: Издательство Московского университета, 2004. – 250 с.

78. Оленченко, В. В. Электротомография при контроле процесса кучного выщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – Т. 15, № 7. – С. 112–118.

79. Опытнo-фильтpационные работы. Под ред. В. М. Шестакова и Д. Н. Башкатова. М., «Недра», 1974. – 202 с.

80. ПАО «Полюс» [Электронный ресурс] // Активы. Куранах URL:https://polyus.com/ru/operations/operating_mines/kuranakh/ (дата обращения: 01.02.2024).

81. Парамонов, В. Н. Метод конечных элементов при решении нелинейных задач геотехники /В.Н. Парамонов. – СПб: Издательство «Геореконструкция», 2012. – 263 с.

82. Патент № 2779166, Российская Федерация, МПК В03В 13/00, Е02Д 1/00. Устройство для определения характеристик песчано-глинистых окомкованных руд: № 2022105698 заявл. 03.03.2022: опубл. 05.09.2022 / Маринин М.А., Поспехов Г.Б., **Поморцева А.А.**, Сушкова В.Н., заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (RU). – 12 с.

83. **Поморцева, А. А.** Инженерно-геологическое обеспечение устойчивости штабеля кучного выщелачивания / **А.А. Поморцева**, М.А. Карасев, Г.Б. Поспехов // Успехи современного естествознания. – 2021. – № 1. – С. 63-69. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37566> (дата обращения: 22.02.2024).

84. Поморцева, А. А. Проявление опасных геологических процессов на автотрассе «Колыма» (Якутск – Магадан) / **А.А. Поморцева**, О.А. Поморцев, Г.Б. Поспехов и др. // Успехи современного естествознания. – 2020. – № 2. – С. 73-78. – DOI: 10.17513/use.37334.

85. Поморцева, А. А. Гелиоциклические модуляции изменчивости природно-климатических и инженерно-геологических обстановок в криолитозоне (на примере Якутии) / **А.А. Поморцева**, О.А. Поморцев // Успехи современного естествознания. – 2020. – № 12. – С. 151-156. DOI: 10.17513/use.37552.

86. **Поморцева, А.А.**, Поспехов Г.Б. Формирование напряженно-деформированного состояния массива штабеля кучного выщелачивания золота / **А.А. Поморцева**, Г.Б. Поспехов // Маркшейдерия и недропользование. – 2024. – № 3. – С. 72-79. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_72_79.

87. **Поморцева, А. А.**, Поспехов Г.Б. Инженерно-геологические факторы развития деформационных процессов массивов окомкованных песчано-глинистых руд кучного выщелачивания золота / **А.А. Поморцева**, Г.Б. Поспехов // Научно-технический вестник «Каротажник». – 2024. – № 3 (329). – С. 154–162.

88. Поседко, Е. Ю., Жмурова, В.В. Технология кучного выщелачивания золота из окисленных руд // В сб.тр.: Переработка природного и техногенного сырья. Сборник научных трудов студентов, магистрантов, аспирантов и молодых

ученых Института металлургии и химической технологии им. С.Б. Леонова. Иркутский национальный исследовательский технический университет. Иркутск, 2016. – С. 153-158.

89. Приказ Ростехнадзора от 13.11.2020 №439 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов».

90. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах: утв. Госгортехнадзором РФ 16.03.1998 г. / ВНИМИ. – СПб. : ВНИМИ, 1998. – 208 с.

91. Приказ Минстроя России от 30.12.2020 № 906/пр «Об утверждении Изменения № 1 к СП 116.13330.2012 «СНиП 22-02-2003 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения».

92. Рашкин А. В. Рациональное формирование рудного штабеля при кучном выщелачивании руд/ А. В. Рашкин, П. Б. Авдеев, И.А. Яшкин // ГИАБ. – 2005. – №11. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ratsionalnoe-formirovanie-rudnogo-shtabelya-pri-kuchnom-vyschelachivanii-rud> (дата обращения: 02.02.2025).

93. Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений. П 92-80/ВНИИГ. – Л., 1981. –105 с.

94. Площадка кучного выщелачивания золотосодержащих руд месторождений и отвалов Куранахского рудного поля производительностью до 1500 тыс.т в год. Проектная документация. П-АЗ-02010.1-ИОС6.1. Раздел 5. Подраздел 6. Технологические решения. Книга 1. Основные решения. ООО «Полюс проект». – 2015. – 182с. – URL: <https://mr-aldanskij.sakha.gov.ru/obschestvennye-slushaniya/deklaratsiya-o-namerenijah-obogatitelnyj-kompleks-nadezhnyj-ao-aldanzoloto-grk-po-pererabotke-zolotosoderzhaschih-rud-mestorozhdenij-i-otvalov-kuchnym-vyschelachivaniem-do-1500-tys-t-v-god> (дата обращения: 23.12.2022).

95. Рогов, Е. И. Обоснование и оптимизация основных геотехнологических параметров при кучном выщелачивании металлов / Е.И.Рогов, А.Е.Рогов, Н.Б.Рыспанов – М: Горная книга, 2010. – 48с.

96. РСН 51-84. Инженерные изыскания для строительства. Производство лабораторных исследований физико-механических свойств грунтов. – М.: Изд-во ПНИИС, 1984. – 38 с.

97. Салахов, И. Н. Анализ способов формирования штабелей минерального сырья для кучного выщелачивания // Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых. Материалы 15 Международной научной школы молодых ученых и специалистов. – 2021. – С. 120-123

98. Салахов, И. Н. Технологические аспекты намыва штабеля кучного выщелачивания // В сборнике: Новые идеи в науках о Земле. Материалы XIV Международной научно-практической конференции: в 7-ми томах. – 2019. – С. 312-315.

99. Санакулов, К. С. Эффективное использование техногенных отходов при кучном выщелачивании золота //– Навои: Типография НГМК, 2021. – 379 с.

100. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть III. Правила производства работ в районах распространения специфических грунтов. – М.: Госстрой России, 1997. – 22 с.

101. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. – М.: Стандартинформ, 2016. – 89 с.

102. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. – Москва: Гарант, 2024. – 160 с.

103. Смолич, С. В. Количественная оценка суффозионной опасности песчаных грунтов/ С.В. Смолич, К.С. Смолич // Сергеевские чтения. Научное обоснование актуализации нормативных документов инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий. – 2010. – Вып. 12. – С. 176-181.

104. Смолич, К. С. Модель фильтрации выщелачивающих растворов в рудном штабеле/ С.В. Смолич, К.С. Смолич // Горный журнал. – 2010. – № 5. – С. 53-54.

105. Смолич, К. С. Исследование и разработка математических моделей процесса кучного выщелачивания золотосодержащих руд: дис. ... канд. техн. наук : 25.00.13. – Чита, 2002. – 152 с.

106. Ступин, В. И. Опыт проектирования предприятий кучного выщелачивания благородных металлов/ В.И. Ступин, М.И. Фазлуллин // в кн. Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов: в 2 томах, Т. 2: Золото. – М.: Издательство «Руда и металлы», 2005. – С. 39-60.

107. Технический отчёт о выполненных инженерно-экологических изысканиях по объекту «Обогащительный комплекс «Надежный АО «Алданзолото» ГРК» по переработке золотосодержащих руд месторождений и отвалов кучным выщелачиванием до 1000 тыс. тонн в год» 504-02/15, Том 1, книга 1, «Нерюнгростройизыскания», 2015.

108. Трубецкой, К. Н. Классификация техногенных месторождений, основные категории и понятия / К.Н. Трубецкой, В.Н. Уманец, М.Б. Никитин // Горный журнал. – 1989. – №12. – С. 6-9.

109. Трушко, В. Л. Перспективы развития геомеханики в условиях нового технологического уклада / В.Л. Трушко, А.Г. Протосеня // Записки Горного института. – 2019. – Т.236. – С.162-166. DOI:10.31897/PMI.2019.2.162.

110. Турсунбаева, А. К. Нетрадиционная геотехнология горных работ кучного выщелачивания руд благородных металлов: монография / А.К. Турсунбаева, В.С. Портнов, Р.К. Камаров, Ю.Н. Шапошник, И.Д. Арыстан, Н.Г. Лайысов; Карагандинский государственный технический университет. – Караганда: Изд-во КарГТУ, 2012. – 338 с.

111. Тчаро, Х. Моделирование проницаемости штабеля для стабилизации фильтрационных свойств выщелачивающих растворов / Х. Тчаро // Вестник Евразийской науки. – 2020. – № 5. – С. 1-10.

112. Федоренко, Е. В. Метод расчета устойчивости путем снижения прочностных характеристик // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. – 2013. № 6. – С. 24-26.

113. Фисенко, Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов/ Г.Л. Фисенко // – М.: Недра, 1965. – 378 с.

114. Чекушина, Т. В. Типизация систем орошения выщелачиваемой руды и сбора продуктивных растворов / Т.В.Чекушина, А.Е. Воробьев, К.Г. Каргинов, Е.С. Одинцова // ГИАБ. – 2002. – № 9. – С. 54-60.

115. Шестернев, Д. М. Изменение коэффициентов фильтрации и гранулометрического состава золотосодержащей окомкованой суглинистой руды в период строительства и водонасыщения штабеля кучного выщелачивания / Д.М. Шестернев, В.П. Мязин, С.Б. Татауров, А.Н. Черепанов // ГИАБ. – 2006. – № 12. – С. 286-294.

116. Яшкин, И. А. Повышение эффективности технологии кучного выщелачивания золотосодержащих руд: дис. ... канд. техн. наук: 25.00.22. – Чита. 2008. – 168 с.

117. Яшкин И. А. Управление гидродинамическими процессами кучного выщелачивания руд // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Кулагинские чтения». – 2005. – С. 89-921.

118. A new area in slope stability analysis: Shear strength reduction finite element technique // RocNews, P.1-10. – 2004.

119. Aleksandrova, T. N. Ore processing efficiency improvements for precious metals based on process simulations / T.N. Aleksandrova, N.V. Nikolaeva, V.V. Lvov, A.O. Romashev // Obogashchenie Rud. – 2019. – № 2. – P. 8-13. DOI: 10.17580/or.2019.02.02.

120. Bishop, A. W. The stability of tips and spoil heaps / A. W. Bishop// Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. – 1973. – № 6(3). – P. 335-376. DOI: 10.1144/gsl.qjeg.1973.006.03.15.

121. Brinkgreve, R. B. PLAXIS 3D 2017. Material Models Manual, Netherlands, 2018. –212 p.

122. Cariaga, E. Flow through porous media with applications to heap leaching of copper ores / E. Cariaga, F. Concha, M. Sepúlveda // Chemical Engineering Journal. – 2005. – Vol. 111(2). – P. 151-165. DOI:10.1016/MIN.2005.02.019.

123. Cariaga, E. Convergence analysis of a vertex-centered finite volume scheme for a copper heap leaching model. / E. Cariaga, F. Concha, M. Sepúlveda // Mathematical

Methods in the Applied Sciences. – 2009 – Vol. 33(9):1059-1077. – DOI:10.1002/mma.1234.

124. Dawson, E. M. Slope stability analysis by strength reduction / E.M. Dawson, W.H. Roth, A. Drescher // *Geotechnique*, Vol. 49, No. 6, P. 835-840. – 1999.

125. Dement'ev, V. E. Basic aspects of gold heap leaching technology for gold-bearing raw materials/ V.E. Dement'ev, A.P. Tatarinov, S.S.Gudkov // *Gornyi Zhurnal*. – 2001. – № 5. – P. 53-56.

126. Elfen, S. Test procedure for degree of saturation of granular material/ Elfen, S., Parra, D. // *XXVI Mining Convention At: Arequipa, Peru*. – 2003. – V.1.

127. Galla, V, Evaluating Unsaturated Flow of Heap Leach Materials in Large Diameter Column Tests / Galla, V, van Zyl, D & Morrow, S // *Rock Dumps 2008: Proceedings of the First International Seminar on the Management of Rock Dumps, Stockpiles and Heap Leach Pads*, Australian Centre for Geomechanics, Perth. – 2008. – P. 193-206, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/802_17

128. Ghorbani, Y. Heap Leaching Technology – Current State, Innovations, and Future Directions: A Review/ Y. Ghorbani, J. P. Franzidis, J. Petersen// *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. – 2016. – Vol. 37. – P. 73-119. DOI: 10.1080/08827508.2015.1115990.

129. Golder Associates Limited. 1995. Mined Rock and overburden piles: runout characteristics of debris from dump failures in mountainous terrain. Stage 2: analysis, modeling and prediction. Interim Report, Report № 932-1493. Prepared in association with O. Hunger Geotechnical Research Ltd. British Columbia Mine Waste Rock Pile Research Committee and CANMET. Contract No. 23440-0-9198-X86.

130. Kime, M. B. Plugging mechanisms and plugging reduction techniques in heap leaching operations: a review. / M.B. Kime, E. Malenga, W. Nheta// *Department of Metallurgy, University of Johannesburg.*, 9913861007691.

131. Kondakova, V. N. Analysis of the problem of classification of mining wastes /V. N. Kondakova, K. V. Pankratova, A. A. Pomortseva, G. B. Pospekhov// *Conference Proceedings, Engineering and Mining Geophysics 2020, Sep 2020, Volume 2020*. – P.1-8. DOI: 10.3997/2214-4609.202051139.

132. Kondakova, V. N. The Comparison of the Russian and Foreign Mining Wastes Classification Systems / V.N. Kondakova, A.A. Pomortseva, G.B. Posphehov// IOP Conference Series. Earth and Environmental Science; Bristol, Mar 2021: 666(5): 052001. DOI: 10.1088/1755-1315/666/5/052001.

133. Krishna, P. Sinha Geotechnical engineering for heap leach operators / Krishna P.S., Mark E.S., Omar Y.C. // Proceedings of Heap Leach Solutions. InfoMine. Reno, Nevada, USA. September 14-16. – 2015. – P. 1-14.

134. Manning, T. J. Chapter 25 – Heap Leaching of Gold and Silver Ores. Gold Ore Processing (Second Edition) / T.J.Manning, D. W.Kappes //Project Development and Operations. – 2016. – P. 413-428. DOI: 10.1016/B978-0-444-63658-4.00025-6.

135. Marinin, M. A. Engineering and geological parameters for heap leaching of gold from low-grade sandy clay ores: a feasibility study / M. A.Marinin, M. A.Karasev, G. B.Posphehov, **A.A. Pomortseva**, V. I. Sushkova // Mining Informational and Analytical Bulletin. – 2023.–№ 9. – P.22-37. DOI: 10.25018/0236-1493-2023-9-0-22.

136. McBride, D. Optimization of a computational fluid dynamics model – Heap leach model and sensitivity analysis of process operation / D.McBride, T.N. Croft, M.Cross, C.Bennett, J. E. Gebhardt // Minerals Engineering. – 2014. – Vol. 63. – P. 57-64. DOI:10.1016/J.MINENG.2013.11.010.

137. McBride, D. Heap Leaching: Modeling and Forecasting Using CFD Technology / D.McBride, J.Gebhardt, N.Croft, M.Cross // Minerals. – 2018. –Vol. 8. – Iss. 1. – № 9. DOI: 10.3390/MIN8010009.

138. Miao, X. 3D dual pore-system leaching model. Part 1: Study on fluid flow / X. Miao, G.A. Narsilio, B.A.Wu, B.A. Yang//Hydrometallurgy. – 2017. – Vol.167. – P. 173-182. DOI:10.1016/J.HYDROMET.2016.11.015.

139. Mostaghimi, P. A control volume finite element method for adaptive mesh simulation of flow in heap leaching / P.Mostaghimi, B.S.Tollit, S.J.Neethling, G.J.Gorman, C.Pain // Journal of Engineering Mathematics. – 2014. – Vol. 87. – P. 111-121. DOI: 10.1007/S10665-013-9672-3.

140. Orr, S. Enhanced heap leaching – Part 1: Insights. // Mining Engineering. – 2002. – Vol. 54(9). – P. 49-56.

141. Orr, S. Enhanced heap leaching – Part 2: Insights. / S. Orr S., V. Vesselinov // Mining Engineering. – 2002. – Vol. 54(10). – P. 33-38.
142. Pacheco, P. G. Flow analysis and dynamic slope stability in a copper ore heap leach / P.G.Pacheco, M.Purizaga, J.Huertas, C.Romanel // Pan-Am CGS Geotechnical Conference. – 2011. – P. 1-7.
143. Petley, D. A major landslide at a heap leach pad at Eagle Gold Mine in the Yukon, Canada // Eos: Science News by AGU. URL: <https://eos.org/contact> (дата обращения: 10.02.2025)
144. Petley, D. First satellite imagery of the 13 February 2024 landslide at Çöpler Mine in Turkey // Eos: Science News by AGU. URL: <https://eos.org/thelandslideblog/copler-mine-3> (дата обращения: 10.02.2025)
145. Petley, D. The Bellavista heap leach gold mine landslide in 2007 // American Geophysical Union. URL: <https://blogs.agu.org/landslideblog/2017/10/17/bellavista-heap-leach-gold-mine/> (дата обращения: 10.02.2025)
146. Pomortsev, O. A. Cyclic Organization of Geological Environment: Permafrost Zone of Yakutia / O.A. Pomortsev, A.A. Pomortseva, Yu.I. Trofimtsev// IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 272 (2) 022059. 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/272/2/022059.
147. Selker, J. Soil Physics with HYDRUS: Modeling and Applications. / J. Selker, J., R. Stewart, //Vadose Zone J., Vol. 10, Is. 4, P. 373. – 2010.
148. Sheikhzadeh, G. A. Computational modelling of unsaturated flow of liquid in heap leaching using the results of column tests to calibrate the model / Sheikhzadeh, G.A., Mehrabian, M.A., Mansouri, S.H., Sarrafi, A. // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2005. – vol. 48. – P. 279-292.
149. Smith, I. M. Programming the Finite Element Method / I.M. Smith, D.V. Griffith // John Wiley& Sons. –1982. – Chisester, UK. – Second edition. – 664 p.
150. Smith, M. E. Geotechnical properties of nickel laterite heap leached ore (ripios) and plant residue. / Smith, M. E., Christie M. // Proceedings of Heap Leach Solutions. – 2015. – P. 251-264.

151. Spencer, E. A. Method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces // *Geotechnique*.—1967. — vol. 17. — № 1. — P. 11-26.
152. Thenepalli, T. A Brief Note on the Heap Leaching Technologies for the Recovery of Valuable Metals / T.Thenepalli, R.Chilakala, L.Habte, L.Q.Tuean, C.S. Kim // *Sustainability*. — 2019. — Vol. 11(12). — P. 33-47. DOI: 10.390/SU11123347.
153. Van Genuchten, M.T.A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils // *Soil science society of America journal*. — 1980. — Vol. 44. — Iss. 5. — P. 892-898. DOI: 10.2136/sssaj1980. 03615995004400050002x.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Патент на изобретение

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2779166

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ
ОКОМКОВАННЫХ РУД**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Маринин Михаил Анатольевич (RU), Поспехов
Георгий Борисович (RU), Поморцева Анастасия
Александровна (RU), Сушкова Вероника Ивановна (RU)*

Заявка № 2022105698

Приоритет изобретения 03 марта 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 05 сентября 2022 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 03 марта 2042 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акт о внедрении результатов кандидатской диссертации на предприятие



УТВЕРЖДАЮ

Операционный директор

АО «Полус Алдан»

А.А. Мифтахов

«16» июня 2022 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертации

Поморцевой Анастасии Александровны

по научной специальности

2.8.3.- Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология,
геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр

Комиссия в составе:

Председатель: А.А Мифтахов - операционный директор АО «Полус Алдан»;

Члены комиссии: Э.Э. Гильдиш - директор по технологиям и перспективному развитию;
Т.Ю. Ковылина-начальник отдела обогащения и технологий.

Настоящим Актом подтверждается, что результаты диссертации на тему «Инженерно-геологическое обеспечение устойчивости техногенных массивов на участках кучного выщелачивания золота», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы АО «Полус Алдан» при обосновании оптимальных с точки зрения устойчивости параметров формирования многоярусных штабелей промышленного комплекса кучного выщелачивания с учетом принятой интенсивности орошения.

Использование результатов диссертационного исследования позволило определить фильтрационные и механические свойства окомкованных руд, принимаемые при численном моделировании штабелей комплекса кучного выщелачивания с целью обеспечения минимальных рисков потери их устойчивости при эксплуатации.

Члены комиссии:

Директор по технологиям
и перспективному развитию

Начальник отдела обогащения
и технологий

Э.Э. Гильдиш

Т.Ю. Ковылина

ПРИЛОЖЕНИЕ В**Фотографии материала для класса +1 мм отобранного методом ситового анализа при сухом способе отсева****Свежая окомкованная руда****Выведенная из орошения руда**

1.



Рисунок В1 – Класс -2+1 мм



Рисунок В2 – Класс -2+1 мм

2.



Рисунок В3 – Класс -5+2 мм



Рисунок В4 – Класс -5+2 мм

3.



Рисунок В5 – Класс -10+5 мм



Рисунок В6 – Класс -10+5 мм

4.



Рисунок В7 – Класс -25+10 мм



Рисунок В8 – Класс -25+10 мм

5.



Рисунок В9 – Класс -50+25 мм



Рисунок В10 – Класс -50+25 мм

6.



Рисунок В11 – Класс -60+50 мм



Рисунок В12 – Класс -60+50 мм

7.



Рисунок В13 – Класс -70+60 мм



Рисунок В14 – Класс -70+60 мм

8.



Рисунок В15 – Класс -100+70 мм



Рисунок В16 – Класс -100+70 мм

9.



Рисунок В17 – Класс +100



Рисунок В18 – Класс +100