

**ВЛАДИКАВКАЗСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

На правах рукописи



БАДОЕВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

**ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ
ФОРМИРОВАНИЯ НАМЫВНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВЫХ
МАССИВОВ В УСЛОВИЯХ КРИОЛИТОЗОНЫ
(на примере Норильского промышленного района)**

Специальность 25.00.08

«Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор **А. Б. Лолаев**

Владикавказ 2020

Содержание

Введение.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ	
ВОЗВЕДЕНИЯ НАМЫВНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ	
МАССИВОВ.....	
1.1 Общие положения	10
1.2 Общие сведения о намывных техногенных массивах и обзор основных способов их формирования	16
1.3 Краткая характеристика климатических и мерзлотно-геологических условий Норильского промышленного района.....	25
1.4 Цели и задачи исследований.....	38
ГЛАВА 2 КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА,	
СТРУКТУРЫ, СВОЙСТВ ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ	
И АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ	
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА	
ВОЗВЕДЕНИЯ НАМЫВНЫХ СООРУЖЕНИЙ.....	
2.1. Комплексное исследование состава, структуры и свойств техногенных грунтов.	40
2.1.1 Методика, состав и материалы исследований	40
2.1.2 Исследование физико-механических свойств хвостов	41
2.1.2.1 Гранулометрический и минеральный состав грунтов. ...	41
2.1.2.2 Физические и физико-химические свойства намывных грунтов	47
2.1.2.3. Определение механических свойств намывных грунтов.	48

2.2 Постановка задачи определения параметров возведения намывного техногенного массива - хвостохранилища «Лебяжье» ПАО ЗФ «ГМК «Норильский никель».....	51
2.3 Обоснование методики математического моделирования при оптимизации параметров намыва техногенного массива	55
2.3.1 Основные положения сетевого планирования процессов	57
2.3.2 Основные положения корреляционно-регрессионного анализа	61
Выводы по главе 2.....	67

ГЛАВА 3 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НАМЫВА

ОГРАЖДАЮЩЕЙ ДАМБЫ ХВОСТОХРАНИЛИЩА.... 68

3.1 Общие положения моделирования.....	68
3.1.1 Принципы и критерии физико-математического моделирования намыва ограждающей дамбы	69
3.2 Обоснование физической модели для изучения параметров намыва	72
3.3 Оценка адекватности модели намыва.....	72
3.4 Описание лабораторной установки.....	74
3.5 Оборудование и методика определения параметров консолидации намываемых хвостов	77
Выводы по главе 3.....	102

ГЛАВА 4 ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ

ВОЗВЕДЕНИЯ НАМЫВНОГО

ХВОСТОХРАНИЛИЩА «ЛЕБЯЖЬЕ»

ЗФ ГМК «НОРИЛЬСКИЙ НИКЕЛЬ»..... 103

4.1 Методика определения параметров намыва.	103
4.1 Оптимизация параметров возведения намывного хвостохранилища «Лебяжье»	110
4.2 Применение сетевого планирования.....	115
Выводы по главе 4.....	116
Заключение	118
Список использованных источников	120

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Технологии добычи и переработки полезных ископаемых постоянно совершенствуются, однако, несмотря на это, объем отходов горно-металлургического производства не уменьшается.

Горно-металлургические комбинаты и обогатительные фабрики ежегодно сбрасывают миллионы тонн отходов обогащения, для складирования которых требуются специальные хранилища (хвостохранилища, шламонакопители, гидроотвалы и т.д.), которые должны иметь не только максимальную емкость, но и удовлетворять условиям охраны окружающей среды.

В связи с этим, вопросы проектирования, оптимизации, строительства и безопасной эксплуатации накопителей отходов обогащения как опасных производственных объектов и источников воздействий на окружающую среду, в настоящее время имеют большую актуальность. Это связано с большим количеством аварий, необходимостью строительства новых накопителей отходов, а также плохим состоянием сооружений и прилегающих к ним территориях природной среды.

Особенно эта проблема актуальна в условиях криолитозоны, так как завершение процесса консолидации намытого слоя до начала промерзания является одним из условий обеспечения устойчивости сооружения. В связи с этим формирование намывных геотехнических массивов с учетом консолидационных характеристик хвостов является актуальной научной задачей.

Цель работы инженерно-геологическое обоснование формирования намывных геотехнических массивов в криолитозоне с учетом консолидационных свойств техногенных грунтов для повышения устойчивости.

Идея работы: повышение устойчивости намывных геотехнических массивов за счет учета консолидационных характеристик слагающих его грунтов.

Методы исследования: обобщение и анализ теории и практики, лабораторные и натурные исследования, физико-математическое моделирование с использованием методов сетевого планирования и математической статистики.

Научные положения, защищаемые в работе:

1. Установлены закономерности формирования физико-механических свойств хвостов в намывных массивах, основные виды микроструктур и типы контактов между структурными элементами, составлена классификация намывных грунтов, которая используется для прогноза технологической и экологической безопасности хвостохранилища
2. Формирование геотехнического массива происходит при оптимальном значении влажности 20%, а группы консолидационных характеристик намываемых грунтов, определенные при различных значениях влажности и плотности, однородны между собой, и различия между парами групп статистически незначимы.
3. Намыв геотехнического массива при отрицательных температурах прекращается за период, равный времени консолидации до наступления температуры -5°C .

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Установлены закономерности формирования физико-механических свойств хвостов в намывных массивах, основные виды микроструктур и типы контактов между структурными элементами, составлена классификация намывных грунтов, которая используется для прогноза технологической и экологической безопасности хвостохранилища;
- Определены соотношения между максимальной плотностью и оптимальной влажностью хвостов в процессе консолидации твердой

фракции при намыве геотехнического массива в условиях криолитозоны;

- Установлены корреляционные зависимости консолидационных характеристик намываемых хвостов при различных значениях влажности и плотности с использованием критериев Крускала-Уоллиса и Манна-Уитни;
- Выполнено математическое описание зависимости технологических параметров возведения геотехнического массива (времени заполнения участка намыва, высоты годового намыва, времени заполнения яруса участка намыва) от геометрических характеристик объекта и участка складирования, физико-механических свойств хвостов и климатических условий;
- Доказана необходимость учета консолидационных характеристик твердой фракции при возведении геотехнического массива с использованием сетевого планирования.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается обобщением и использованием большого объема исходных фактических данных, применением современных методов исследований, сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований с результатами опытно-промышленных работ (расхождение не более 5%) и положительной практической реализацией разработок на предприятии.

Научное значение состоит в инженерно-геологическом обосновании технологии формирования намывных геотехнических массивов в криолитозоне с учетом консолидационных характеристик супесчаных грунтов.

Практическое значение работы заключается в том, что применение разработанной методики оптимизации параметров возведения намывного техногенного массива с учетом консолидационных характеристик слагающих грунтов, позволяет прогнозировать высоту годового намыва техногенного

массива, оперативно осуществлять вариантное сравнение технологических схем возведения с учетом изменений исходных данных, давать прогнозную оценку сроков возведения и составлять сетевые графики производства работ.

Методика может быть использована горнорудными предприятиями, научно-исследовательскими и проектными организациями.

Реализация результатов работы.

Диссертация выполнена в соответствии с исполнением научно-исследовательских работ по темам, в которых автор принимал непосредственное участие в качестве исполнителя:

- «Исследования и разработка инновационных технологий комбинированной переработки и утилизации отходов предприятий цветной металлургии» в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2013 года», ГК №16.515.11.5027;
- «Развитие фундаментальных и прикладных исследований в области наук о Земле для мониторинга и изучения фанерозойского магматизма, современного состояния земной коры тектонически активных регионов Большого Кавказа, научного обеспечения прогнозирования, предупреждения и снижения ущерба от природных и техногенных катастроф, расширения минерально-сырьевой базы и неразрушающего природопользования» в рамках выполнения плана НИР в рамках государственного задания ВНИЦ РАН. Номер государственной регистрации - АААА-А19-119040190054-8.

Результаты исследований использованы при составлении проекта эксплуатации хвостохранилища «Лебяжье» Норильской обогатительной фабрики Заполярного филиала ПАО ГМК «Норильский Никель».

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались и получили положительную оценку на региональных, всероссийских и международных научно-технических конференциях и конгрессах: ежегодных

научно-практических конференциях СКГМИ (ГТУ) (2011-2019); Строительно-промышленном форуме «Гостеприимная Осетия» (Владикавказ, 2011); Республиканской научно-технической конференции «Пути совершенствования качества строительства промышленных и гражданских зданий и инженерных сооружений» (Владикавказ, 2012); 2-nd International Conference “Geotechnics for Sustainable Development” GEOTEC (Hanoi, Vietnam, 2013); Всероссийской конференции «Геодинамика, вулканизм, сейсмичность и экзогенные геологические процессы природного и техногенного характера на Кавказе» (Владикавказ, 2014); 1-st International Conference on Natural Hazards&Infrastructure (Chania, Greece, 2016); XVIII Brazilian Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, "The Sustainable Future of Brazil goes through hour Minas" COBRAMSEG 2016 (Belo Horizonte, Brazil, 2016); 2-nd International Seminar “Numerical Analysis in Geotechnics” NAG2018 (Ho Chi Minh City, Vietnam, 2018); 1-ой Всероссийской научно-практической конференции «Современные научно-технические и социально-гуманитарные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации» (Владикавказ, 2019); 2-nd Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG) (Sousse, Tunisia, 2019); 3-rd International Conference on Information Technology in Geo-Engineering (ICITG2019) (Guimaraes, Portugal, 2019); 4-th International Conference on “Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development” GEOTEC (Hanoi, Vietnam, 2019).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 27 работ, в том числе 1 в изданиях, включенных в международные базы цитирования Web of Science, 4 в изданиях, включенных в международные базы цитирования Scopus, 4 в изданиях, рекомендованных ВАК и приравненных к ним, а также 1 патент РФ.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав и заключения, содержит 29 рисунков, 23 таблицы. Список использованных источников включает 161 отечественных и зарубежных наименования.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ ВОЗВЕДЕНИЯ НАМЫВНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ

В главе рассматриваются особенности формирования и эксплуатации намывных техногенных массивов в криолитозоне, общие вопросы обеспечения их устойчивости, основные требования нормативных документов.

1.1 Общие положения

Специфика добычи и обогащения руд заключается в извлечении и переработке огромных масс горных пород. Современные технологии позволяют использовать лишь часть извлекаемой горной массы, а оставшаяся часть породы накапливается в виде техногенных отходов.

«Так на сегодняшний день по горнодобывающей промышленности количество твердых отходов составляет от 50 до 95 % извлекаемой из недр горной массы» [Месяц, Волкова, 2009].

«Горно-обогатительная промышленность по степени влияния на окружающую среду занимает одно из ведущих мест, что проявляется в накопленных миллиардах тонн вскрышных и вмещающих пород, хвостохранилищах, занимающих миллионы гектар земельных угодий и аккумулирующих сточные воды обогатительных фабрик» [Чуянов, 1998].

«Состав сточных вод обогатительных фабрик достаточно сложен и содержит ионы цветных и черных металлов, различные органические и неорганические соединения. Сточные воды являются источником загрязнения поверхностных и подземных вод, которые используются человеком для хозяйственно-питьевых нужд. Внедрение систем оборотного водоснабжения и очистки сточных вод позволяет существенно уменьшить негативное влияние хвостохранилищ на природу. Влияние хвостохранилищ на окружающую среду проявляется и в загрязнении атмосферного воздуха за счет выноса тонких пылеватых частиц воздушными потоками, в результате

чего загрязняются значительные территории, прилегающие к хвостохранилищам.

Накопленные отходы горно-обогатительного производства имеют потребительскую стоимость, они могут быть использованы в других отраслях народного хозяйства как источник сырья для производства различных видов продукции. Поэтому полная утилизация накопленных отходов является важнейшей народнохозяйственной задачей, позволяющей решить многие экологические проблемы.

В настоящее время в переработку вовлекается все больше месторождений с относительно низким содержанием ценных компонентов, что вызывает необходимость переработки значительных объемов горных масс. Пустая порода (хвосты) после обогащения, осуществляемого преимущественно в водной среде, перемещается и складывается гидротранспортом в хвосто- и шламохранилищах. Значительные объемы перерабатываемых полезных ископаемых приводят к увеличению отчуждения земель под хвостохранилища, которыми уже заняты многие тысячи гектаров» [Рекомендации...ВНИИ ВОДГЕО, 1986]

«В горнотехнической практике создаются намывные хвостохранилища, которые являются объектами повышенной экологической и промышленной опасности. С возведением этих сооружений связано загрязнение воздушного бассейна, поверхностных и подземных вод, а также нарушение прилегающих территорий из-за изъятия плодородных земель и перекрытия их оползневыми массами при прорыве ограждающих дамб» [Семенова, 2017] .

«Мероприятия по устранению негативного влияния хвостохранилищ на природную среду должны включать решение комплекса проблем, таких, как обеспечение безаварийной работы этих сложных гидротехнических сооружений; сбережение земельных ресурсов при создании хвостохранилищ за счет компактности и увеличения высоты сооружений, что может быть предусмотрено только на стадии проектирования; сохранение полезных ископаемых путем сведения до минимума их выщелачивания, а также выноса

при ветровой и водной эрозии; охрана воздушного бассейна в результате работ по прекращению пыления хвостохранилищ; охрана поверхностных и подземных вод от загрязнения сточными водами хвостохранилища и от загрязнения в результате ветрового переноса хвостов; приведение территории отработанных хвостохранилищ в состояние, пригодное для хозяйственной и экологической деятельности» [Чуянов, 1998].

Хвостовым хозяйством называется комплекс сооружений и установок для гидравлического транспорта и гидравлической укладки хвостов обогатительной фабрики. В состав хвостовых хозяйств входят следующие сооружения: насыпные и намывные плотины, дамбы обвалования хвостохранилищ и вторичных отстойников; водосборные сооружения для отвода вод из хвостохранилищ; хвостовые насосные станции и насосные станции обратного водоснабжения с энергетическим и гидромеханическим оборудованием; хвостопроводы и сооружения по трассе хвостопроводов (эстакады, дюкеры и др.); водоводы обратного водоснабжения; электрические подстанции обратного водоснабжения, сгустители для хвостов; сооружения для химической очистки хвостовых вод; аварийные бассейны; водоприемные и водосборные сооружения для отвода ручьев и рек; подсобные сооружения, склады и помещения для обслуживающего персонала; связь и сигнализация.

В зависимости от рельефа местности хвостохранилища подразделяют на равнинные, косогорные, овражные, пойменные и речные (рисунок 1.1) [Чуянов, 1998].

Хвостохранилища равнинного типа располагают на местности с малопересеченным рельефом. При этом выбирается участок с небольшой естественной впадиной или с подниманием рельефа местности, который ограждают со всех сторон дамбами. Внутри ограждения образуется искусственный бассейн, в который сбрасывают хвостовую пульпу, происходит ее осветление за счет осаждения твердой фазы и откачивают обратную воду.

Хвостохранилища косогорного типа сооружаются на склонах возвышенностей. Дамбы обвалования насыпаются с трех сторон. Осветленные воды отводятся из хвостохранилища водосборными сооружениями, которыми удаляются также паводковые и дождевые воды. Последние могут отводиться также по специально сооруженным каналам.

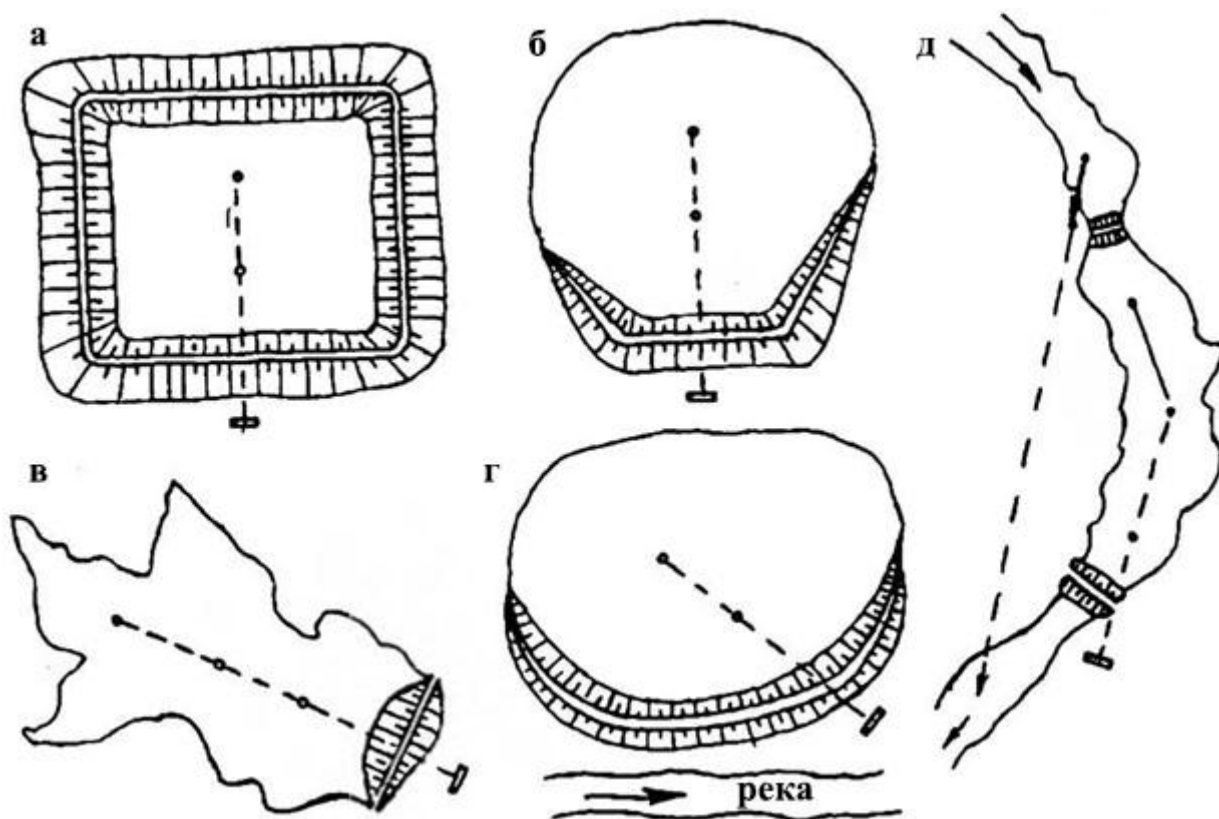


Рисунок 1.1 Основные типы хвостохранилищ:

а – равнинное, б – косогорное, в – овражное, г – пойменное, д – речное

Хвостохранилища овражного типа возводятся в оврагах и балках, выход из которых перегораживается дамбой. Хвостохранилище должно вмещать не только хвостовую пульпу фабрики, но и паводковые и дождевые воды, объем которых может быть значительным, что зависит от площади водосбора. В некоторых случаях объем воды с площади водосбора может в несколько раз превышать объем осветленной воды. В этом, случае необходимо решать вопросы о пропуске через водосбросные сооружения

хвостохранилища паводковых вод или об их аккумуляровании в хвостохранилище.

«Пойменные – располагаются в поймах рек с обвалованием с двух или трех сторон, в зависимости от рельефа местности» [Чуянов, 1998; Лолаев, Бутюгин, 2003].

«На горнодобывающих предприятиях черной и цветной металлургии Российской Федерации эксплуатируются около 300 хвостохранилищ, в том числе более 150 намывных, в которых уложено около 4 млрд. м³ хвостов обогащения» [Государственный доклад «О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 1998 году», 1999]. «Причем более 180 хвостохранилищ находятся в аварийном состоянии, но продолжают эксплуатироваться, так как за последние 20 лет практически не было построено ни одного нового хвостохранилища. В угольной промышленности эксплуатируется более 50 шламоохранилищ. В намывные сооружения в стране укладывается более 200 млн. м³ вскрышных пород и отходов» [Кириченко, 1999, 2002].

«Ёмкость хранилища любого типа, кроме котлованного и котловинного, требует возведения ограждающих дамб или плотин, которые намываются из отходов или насыпаются из вскрышных пород или местных грунтов. Ограждающие подпорные сооружения в зависимости от технических условий могут быть возведены на полную высоту или очередями. Тип ограждающих сооружений устанавливается в зависимости от наличия в районе строительства тех или иных грунтов, способа возведения, инженерно-геологических и гидрогеологических условий сооружений. При этом основные требования, предъявляемые к ограждающим конструкциям, независимо от способа их возведения (намыв, отсыпка) сводятся к обеспечению устойчивости их откосов от оползания, обрушения, оплывания, пыления, фильтрации» [Чуянов, 1998].

Проблемы строительства, безопасности и экологически чистой эксплуатации техногенных массивов хвостохранилищ для районов

распространения вечномерзлых грунтов особенно актуальны. Объясняется это следующими причинами:

- опыт эксплуатации хвостохранилищ, расположенных в криолитозоне, весьма невелик;
- влияние намывных горно-технических сооружений на грунты в криолитозоне практически не изучено;
- технология намыва и складирования минерального сырья в летний и зимние периоды подразумевает интенсивное строительство ограждающих сооружений летом для создания достаточной емкости прудка для складирования под лед и обеспечения обратного водоснабжения;
- экологическая безопасность накопителя, определяемая минимальной площадью и максимальной высотой, находится в противоречии с его устойчивостью, для которой перечисленные выше параметры являются отрицательными.

В зимнее время производится укладка хвостов под лед. «Зимним считается намыв дамб, производимый при температуре окружающего воздуха ниже -5°C . [Правила безопасности..., 2002].

Вопросы формирования намывных горно-технических сооружений актуальны и потому, что процесс возведения массива сопряжен с изменяющимися в процессе работы составом и свойствами техногенных грунтов, гидрогеологическими и геокриологическими условиями и т. д.

При этом гидротехнические сооружения хвостохранилищ отличаются рядом особенностей:

- при сравнительно небольших размерах, они, как правило, находятся в несравненно менее благоприятных условиях;
- в основаниях и телах таких сооружений наиболее интенсивно проявляются инженерно-геологические процессы и явления;

- при разработке мероприятий по повышению устойчивости отсутствуют варианты их сноса или переноса в другие более благоприятные условия;
- они являются источниками активного техногенного воздействия на окружающую среду;
- основные принципиальные подходы в обеспечении устойчивости объектов промышленной гидротехники могут быть применены для любого объекта.

Существование проблемы безопасной и эффективной эксплуатации хвостохранилищ обусловлено: отсутствием достаточных знаний об инженерно-геологических процессах, происходящих в основаниях и телах сооружений; оторванностью в процессе эксплуатации от комплекса динамично изменяющихся инженерно-геологических характеристик объекта и природной среды; недостаточно разработанной системой прогнозов устойчивости в режиме формирования массива; несовершенством методик определения основных характеристик, обеспечивающих устойчивость сооружений и интерпретации их результатов.

1.2 Общие сведения о намывных техногенных массивах и обзор основных способов их формирования

Не имея возможности отказаться от эксплуатации недр, вольно или не вольно человек непрерывно работает над производством отходов. Как уже отмечалось ранее только малая часть сырья превращается в конечную продукцию.

В России эксплуатируются сотни хвостохранилищ, шламохранилищ и гидроотвалов. В таблице 1.1 приведены сведения о наиболее крупных хвостохранилищах в Российской Федерации.

Следует отметить и ряд недостатков, встречающихся при проектировании и строительстве техногенных массивов:

- часто, при их строительстве не соблюдаются такие строгие требования к материалам, производству работ, качеству и подготовке основания и т.д., как для гидроэнергетических и мелиоративных плотин такого же класса;
- емкость накопителей такого рода достаточно хаотически заполняется минеральным сырьем, которое впоследствии становится основанием и материалом при наращивании ограждающих сооружений;
- физико-механические свойства минерального сырья значительно отличаются от характеристик естественных грунтов, но подходы к их изучению остаются стандартными.

Таблица 1.1 Некоторые сведения о хвостохранилищах горно-добывающих и горно-металлургических комбинатов

Наименование комбината	Емкость хвостохранилища, млн. м ³	Площадь хвостохранилища, га	Проектная высота ограждающих сооружений, м	Класс капитальности	Объем воды в прудке, млн. м ³
Качканарский	525	1695	57,0	I	20,6
Костомукшский	455	3700	22,3	II	314,2
Коршуновский	378	600	126,0	I	3,5
Лебединский	587	1081	94,5	I	15,8
Удаченский	243	930	68,0	I	56,0
Норильский*					
№ 1	144	620	50	I	1,0
№2	168,7	430	50	II	5,2
НМЗ	26,5	345	40	II	9,0

Примечание: * данные на 2005 г. [Лолаев, Бутюгин, 2005]

Большинством исследователей и специалистов, в качестве основной причины аварий на намывных горно-технических сооружениях, выдвигается отсутствие постоянных наблюдений (мониторинга) за состоянием плотин и водопропускных сооружений [Аксенов, 1997; Перльштейн, 2001 и др.], хотя за последние годы увеличился опыт эксплуатации техногенных сооружений, намываемых из минерального сырья, и разработано большое количество

инструкций, рекомендаций, правил, и т.д. «Государственной думой Российской Федерации принят Федеральный Закон «О безопасности гидротехнических сооружений». Правительством Российской Федерации принят ряд постановлений, определяющих порядок организации государственного надзора и декларирования безопасности сооружений. Тем не менее ситуация на хвостохранилищах практически не изменяется и дело не в том, что указанные нормы и правила выполняются не в полном объеме, а в том, что даже их безусловное выполнение совсем не гарантирует безопасности накопителя» [Лолаев, Бутюгин, 2005].

При эксплуатации и рекультивации намывных горнотехнических массивов (гидроотвалов и хвостохранилищ), большое значение приобретают вопросы, связанные с геомеханическими процессами, которые во многом определяют экологическую безопасность сооружения, его вместимость и направление дальнейшего использования. [Щекина, 2001]

Контроль и управление устойчивостью дамб хвостохранилищ остается одной из самых актуальных проблем промышленной гидротехники, несмотря на совершенствование методов оценки и расчетов устойчивости, появление мощной вычислительной техники и соответствующего программного обеспечения, а также расширения контролируемых параметров хвостохранилищ. Результаты контроля показывают, что геомеханические процессы, происходящие в телах дамб, не всегда соответствуют предполагаемому характеру их развития. Одними из основных причин этих отличий являются; неравномерное увеличение высоты дамб; изменение уровня воды в прудке; изменение во времени физико-механических свойств грунтов и напряженно-деформированного состояния массивов и т.д., а главной – отсутствие или недостаточность знаний о процессах, происходящих в сооружениях и их основаниях.

Технологические схемы эксплуатации и проектирования намывных техногенных массивов, требования к обеспечению их промышленной и экологической безопасности в достаточной мере отражены в нормативных

документах: Федеральный закон о безопасности гидротехнических сооружений (2003 г с изменениями 2004-2011 гг.); Типовая инструкция по эксплуатации хвостовых хозяйств (1976); Правила безопасности при эксплуатации хвостохранилищ..." (1986, 1997, 2002, 2010); Инструкция о ведении мониторинга (1988); Рекомендации по проектированию и строительству шламонакопителей и хвостохранилищ... (1986); СНиП (1986); и др. Решению этих вопросов посвящены многочисленные работы специализированных организаций (ГИДРОПРОЕКТ, НИИ ВОДГЕО, ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, ГУП ВИОГЕМ, АОЗТ «Механобр инжиниринг» и др.), а также работы Е. Б. Близняка (1937), Л. А. Ярг (2011); С. Г. Аксенова (1997), А. М. Гальперина (2006), Ю. Н. Дьячкова (1993), А. Л. Гольдина, Л. Н. Рассказова (1987), М. М. Гришина (1979), Г. К. Бондарика (2011), А. М. Ильина (1989), Н. Н. Розанова (1983), Т. Г. Рященко () М. В. Щекиной (2006), А. Б. Лолаева (2005), В. В. Бутюгина (2005) и др.

Несмотря на наличие всевозможных рекомендаций нормативных документов, многочисленных методик расчетов и соответствующего программного обеспечения (ГУП ВИОГЕМ, НИИ ВОДГЕО, МГСУ, УГГУ, Гидропроект, ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, АО «ВНИПИпромтехнологии» и др.), проблема оценки устойчивости ограждающих дамб и плотин не теряет своей актуальности. Устойчивости намывных горно-технических массивов посвящены работы Р. Р. Чугаева (1967), Н. Н. Маслова (1968), А. А. Ничипоровича (1973), Ю. К. Зарецкого (1991), Я. А. Кроника (1990, 1996, 2001), С. Б. Ухова (1994), П. Л. Иванова (1991), С. Г. Аксенова, (1997), Г. Ф. Биянова (1989), А. Б. Лолаева и В. В. Бутюгина (2005) и др.

Основные трудности, с которыми сталкивается исследователь при расчетах устойчивости, связаны с подбором расчетных схем адекватных реальному состоянию массива; динамичностью физико-механических свойств грунтов и несовершенством методик их определения; некорректностью перехода от нормативных значений к расчетным и т.д.

Вопросы экологической безопасности накопителей техногенного сырья в настоящее время приобретают особое значение, т.к. практически все подобные объекты являются долгосрочными источниками негативных воздействий на атмосферу, гидросферу, почвенно-растительный покров, изменяют существующие ландшафты, а в криолитозоне являются и фактором техногенного оттаивания вечномёрзлых грунтов.

Анализ теории и практики регулирования природопользования свидетельствует о недостаточности учета результатов оценки географических и экологических особенностей территорий: качественного состояния окружающей природной среды, состояния природных комплексов, их способности к самовосстановлению, устойчивости экологического потенциала и наличия резерва экологической емкости территории.

В большей части документов стратегического и программного характера в недостаточной мере отражен экологический аспект. Отсутствует тщательный контроль за выполнением программных мероприятий, заявленные цели и задачи не имеют достаточного ресурсного обеспечения для их выполнения, отсутствуют рекомендации по экологическим ограничениям. Выявлен ряд недостатков, связанных с механизмом государственного регулирования природопользования.

Исходя из вышесказанного, основное внимание в настоящей работе уделено вопросам инженерно-геологического обоснования формирования намывных техногенных массивов с обеспечением устойчивости ограждающих конструкций и выполнением условий технологической и экологической безопасности сооружений.

В результате проведенных патентно-информационных исследований, выделены основные направления, применяемые при формировании намывных массивов, включающие способы и основные схемы намыва.

К основным способам намыва, широко применяемым при формировании намывных массивов относятся: эстакадный, безэстакадный и низкоопорный [Недрига, 1983; Иванов, 1991; Гальперин, 2003].

При эстакадном способе намыва эстакадном способе намыва распределительный пульпопровод укладывается на деревянную эстакаду высотой до 5 м, высота яруса намыва определяется высотой эстакады. В нижней части трубы пульпопровода через 6-8 м прорезаются отверстия, оборудованные задвижками или патрубками с затворами, через которые рассредоточено выпускают пульпу. Для удобства распределения пульпы или равномерной раскладки по пляжу могут быть устроены деревянные лотки или металлические лотки, которые укорачиваются по мере намыва яруса сооружения, а затем снимаются и намыв производится непосредственно из патрубков. При небольшой высоте эстакады или малой длине пляжа распределительные лотки не применяют. После намыва очередного яруса стойки использованной эстакады, а часто и пульпопровод, оставляют в теле намываемого яруса и возводят новую эстакаду. Основным достоинством эстакадного намыва является возможность управления равномерным распределением пульпы по фронту и интенсивностью намыва, что бывает необходимо при намыве отходами с большим содержанием мелких фракций. Основные недостатки способа – значительные затраты на лесоматериалы (до 1,5 м³ на 1000 м³ намываемого грунта), трудоемкость при возведении, трудность отсыпки дамб обвалования вблизи эстакады, сложность монтажа распределительного пульпопровода на стойки эстакады, - поэтому этот способ утратил свое значение.

При безэстакадном способе намыв ведут сосредоточенно из торца распределительного пульпопровода, уложенного непосредственно на грунт на расстоянии 5-6 м от подошвы дамбы первичного обвалования. Распределительный пульпопровод состоит из звеньев. Снабженных быстросъемными раструбными соединениями. Данный способ более механизирован по сравнению с эстакадным, однако он непригоден при намыве мелкодисперсных грунтов.

Низкоопорный способ позволяет вести намыв как из торца пульпопровода, так и рассредоточено. Пульпопровод укладывают на

расстоянии 4-5 м от подошвы дамбы обвалования на опоры высотой до 1,5 м, мощность слоя намываемого грунта при таком способе составляет 1-1,2 м. После намыва очередного яруса опоры извлекают из грунта. Отдельные звенья пульпопровода сочленяют самоуправляемыми бандажными соединениями, при наращивании пульпопровода выпуск пульпы приостанавливают, разборка пульпопровода возможна без остановки намыва. По экономичности низкоопорный способ занимает промежуточное положение между эстакадным и безэстакадным.

К основным схемам намыва относят: двустороннюю – намыв может производиться эстакадным, безэстакадным и низкоопорными способами; одностороннюю – также может осуществляться тремя способами; преимуществами по сравнению с двухсторонней являются более высокие темпы намыва и сокращение работ по устройству дамб обвалования [Недрига, 1983].

Как правило, формирование намывных массивов выполняют в две очереди. В первую очередь намывным или насыпным способом возводят первичную дамбу обвалования, для чего могут быть использованы вскрышные породы, местные грунты, а также хвосты. После заполнения емкости минеральным сырьем, на нем как на основании, вдоль первичной дамбы обвалования со смещением оси в сторону верхнего бьефа сооружают дамбу вторичного обвалования из намывного минерального сырья. В случае необходимости напорную грань дамб обвалования, ложе накопителя или его часть, сложенную высокопроницаемыми грунтами покрывают противифльтрационными барьерами. Накопитель обычно заполняют по следующей схеме – пульпопровод располагается на гребне дамбы по ее периметру, при этом по всему фронту пульповыпусков образуется пляж из наиболее крупных фракций, а мелкие попадают в отстойный пруд. Это обстоятельство является благоприятным для повышения устойчивости дамбы, к тому же способ позволяет наращивать дамбы вторичного

обвалования путем намыва, создает хорошие условия для осветления воды и достаточно экономичен.

По результатам анализа основных способов формирования намывных массивов, их можно объединить в несколько групп.

«Основная – картовый намыв, включающий: разбивку сооружения на карты намыва, обвалование карт (отсыпка продольных и поперечных дамбочек), подачу пульпы на карты, раскладку грунта по течению пульпы по карте и отвод воды с карты. Основные различия в разных способах заключаются в различии геометрических параметров карт, материале, применяемом при отсыпке дамбочек, наличии или отсутствии противофильтрационных устройств, способах отвода воды» [Мырзахметов и др., 1987; Красильников и др., 1986; Калишевский, 1991; Головишников, Щетинина, 1988; Гальперин, 2003 и др.].

К следующей группе относится создание вторичных дамб обвалования насыпным методом (при этом в качестве материала для отсыпки могут применяться как вскрышные грунты, так и непосредственно хвосты) с последующим намывом [Пихтельников и др., 1985; Микунис и др., 1983; М].

К третьей группе относятся, по существу, способы картового намыва, отличающиеся от второй группы расположением распределительных пульпопроводов [Пихтельников, Шевченко, 1985; Гальперин, 2003 и др.]. Приведенные способы практически не могут быть использованы на хвостохранилищах, расположенных в условиях криолитозоны из-за высоких затрат на их осуществление, сложной строительной технологии и трудностей при эксплуатации.

«К четвертой группе методов возведения намывных массивов относятся способы управления интенсивностью намыва за счет изменений направлений намыва, циклической подачи пульпы и управления фракционированием хвостов» [Лаушкин, Дудышкин, 1980; Мельник и др., 1988; Гальперин 2003 и др.]. Данные способы весьма сложны как при проведении подготовительных работ, так при непосредственной эксплуатации.

К пятой группе отнесены способы, включающие изменение свойств пульпы добавлением флокулянтов, цементирующих растворов и др. [Рощупкин и др., 1978, 1987; Огарков, Пантелеев, 1991].

К последней группе отнесены способы намыва под воду, методы ускорения консолидации намывного массива, способы разделения минерального сырья в процессе намыва, способы увеличения интенсивности намыва применением специальных щитов, закреплённых в пляжной зоне и др. [Саратов, Камышник, Осадчий, 1988; Лолаев, Бутюгин, 2005 и др.].

Способы, рассмотренные выше, широко применяются в настоящее время. Однако, возведение конкретного массива изменяется в процессе его эксплуатации, как правило, без остановки процесса намыва. На начальном этапе эксплуатации, при рельефе местности, позволяющем производить складирование без возведения ограждающей дамбы либо плотины, вопросы устойчивости и схем намыва не имеют столь острого значения. В данном случае может быть применена любой из перечисленных способов намыва. Однако, при заполнении естественной емкости и необходимости возведения искусственных ограждающих конструкций, вопросам устойчивости следует уделять особое внимание. В данном случае, выбор схемы и параметров намыва, очередности на отдельных участках объекта и т. д., могут сказаться на устойчивости, как отдельных участков, так и сооружения в целом. Одним из наиболее неблагоприятных случаев являются каскадные накопители, возведение которых требует особого внимания при определении технологических параметров намыва. Последствия потери устойчивости сооружений приведены выше.

Определение и оптимизация параметров возведения намывного массива в процессе его эксплуатации дает возможность прогнозирования и оперативного управления в случае изменения объемов минерального сырья, поступающего на складирование, условий площадки складирования, устойчивости сооружения и т. д.

«Отличие техногенных грунтов от исходных природных грунтов в естественном залегании и от насыпных грунтов - в измененном гранулометрическом составе за счет отмыва части тонкодисперсных фракций, в распределении (фракционировании) частиц по крупности, в однородности их в массиве, выраженной анизотропии свойств, часто в более рыхлом сложении (особенно при намыве под воду). Физико-механические свойства техногенных грунтов существенно изменяются со временем под влиянием процессов уплотнения и упрочнения; увеличивается плотность сухого грунта» [Дунаева, Кузьмин и др., 2014].

«Использование решений задач консолидации позволяет определять осадки породных масс и производить оценку устойчивости намывных сооружений, исходя из прочности неконсолидированных грунтов их тела и основания» [Гальперин, Семенова, 2016].

Таким образом, проведенный сбор, анализ и обобщение результатов ранее выполненных исследований показали, что вопросам выбора схем намыва должно уделяться большее внимание. Выбор той или иной схемы должен получить обоснование с единых научных позиций. При выборе схемы намыва должен учитываться целый комплекс факторов, включая и климатические условия. А для объектов, расположенных в криолитозоне, влияние климатических условий на процесс возведения техногенных массива имеет особо важное значение.

1.3 Краткая характеристика климатических и мерзлотно-геологических условий Норильского промышленного района

Объектом исследований является намывной техногенный массив – хвостохранилище «Лебяжье», расположенное в Норильском промышленном районе (Рисунок 1.2).

Норильский промышленный район расположен к востоку от р. Енисей, в северо-западной части Средне-Сибирского плоскогорья (Рисунок 1.3).

«Территория предназначенная под хвостохранилище представляет собой пересеченную местность с перепадами высот до 10-12 м и многочисленными непромерзающими озерами и протоками их соединяющими. Существующий рельеф сильно изменен вследствие заполнения понижений и котловин озер хвостами обогатительных фабрик, а также в результате строительства дамбы.



Рисунок 1.2 Общий вид хвостохранилища «Лебяжье»

Абсолютные отметки изменяются в пределах от 33,0 м до 58,0 м, уклон естественного рельефа в сторону озера Пясино. Хвостохранилище «Лебяжье» расположено на озерно-термокарстовой равнине, в пределах междуречья рек Купец и Щучья. В геоморфологическом отношении площадка хвостохранилища приурочена к озерно-бугристой долине р. Норильской. В

северной и западной частях хвостохранилища протекают наиболее крупные реки Щучья и Купец, максимальные расходы которых достигают суммарно 25-30 м³/сек. (для года 10% обеспеченности)» [Геотехнические и фильтрационные исследования, 1978].

«Основное промышленное предприятие НПП – самый крупный в России горно-металлургический комбинат, добывающий и перерабатывающий медно-никелевые руды» [Лолаев, Бутюгин и др., 2001].

Рудная база комбината состоит из месторождений богатых, медистых и вкрапленных медно-никелевых руд: Норильск - 1, Талнахского и Октябрьского. Месторождение Норильск - 1 отрабатывается подземным рудником «Заполярный» и карьером «Медвежий ручей». Талнахское и Октябрьское месторождения, входящие в состав Талнахского рудного узла, отрабатываются подземными рудниками «Маяк», «Комсомольский», «Октябрьский», «Таймырский» и «Скалистый».



Рисунок 1.3 - Норильский промышленный район

Обогащение производится на Норильской и Талнахской фабриках с получением медного, никелевого, пирротинового концентратов и отвальных хвостов. Концентраты направляются на металлургические заводы, а хвосты складировются в хвостохранилище «Лебяжье» [Лолаев, Бутюгин и др., 2001].

По системе гидротранспорта протяженность которой составляет более 200 км производится доставка продуктов и отходов обогащения к местам переработки и складирования.

Климат района

«Климат Норильского промышленного района резко континентальный и характеризуется отрицательной среднегодовой температурой воздуха, равной в среднем по району минус 9,8°C. Зима длительная и суровая, продолжительность периода с отрицательными температурами составляет 240 – 250 дней, он длится с октября по май, причем в течении 4 – 5 месяцев среднемесячная температура воздуха ниже минус 20°C. Средняя температура воздуха для холодного периода колеблется в пределах минуса 17 – 19°C. Лето - короткое, холодное и дождливое. Продолжительность безморозного периода составляет 115 – 120 дней (с июня по сентябрь) средняя температура воздуха 12 – 14°C» [Лолаев, Бутюгин и др., 2001].

Самые высокие среднегодовые температуры воздуха от -6°C до - 7°C наблюдались в 1943, 1953 и 1993 годах. Самые низкие – с температурой ниже -11,5°C наблюдались в 1958, 1966 и 1974 годах. Среднегодовые температуры за последние 60 лет наблюдений не обнаруживают устойчивых тенденций в сторону их повышения.

Количество дней с температурой ниже -30°C в среднем равно 110. Первые оттепели наблюдаются в марте-мае, последние - в октябре-ноябре. Морозный период без оттепелей длится 200-210 дней в году.

Относительная близость Северного Ледовитого океана обуславливает своеобразие климатических условий данного района.

«Характерным для района является частая и резкая смена погоды, неопределенность общеустановленных сезонов. Переходные сезоны - весна, осень - непродолжительны; для них характерны резкое повышение и, соответственно, понижение температуры в течение небольшого промежутка времени (две-три недели)» [Лолаев, Бутюгин и др., 2001].

«Средняя многолетняя величина атмосферного давления составляет 751 мм. рт. ст. Амплитуда колебаний месячных значений достигает 50-60 мм. рт. ст., суточных - до 20 мм. рт. ст.

Отличительной чертой весенне-осенних сезонов является резкое повышение и соответственно понижение температуры в течение небольшого промежутка времени» [Лолаев, Бутюгин и др., 2001].

Осадки и снежный покров.

Подавляющая часть осадков (~70%) выпадает в теплый период с апреля по октябрь (рисунок 1.3).

Среднее количество выпавших осадков за год составляет 564,5 мм, изменяясь от 226,0 мм (1947г.) до 1086,7 мм (1973 г.) и 919,5 мм (1992 г.). Суточный максимум осадков составляет 73,4 мм (декабрь 1994 г.), так в марте 1964 года он составил 51,0 мм, в феврале 1973 года - 70,7 мм, в декабре 1992 года - 51,4 мм.

В районе наблюдается хорошо выраженная зависимость количества выпавших осадков от местоположения тех или иных районов: как правило, с повышением абсолютных отметок рельефа местности осадков выпадает больше.

Продолжительность существования снежного покрова составляет 240-250 дней – устанавливается в середине-конце сентября. Высота снежного покрова на плато колеблется в пределах 0,4–0,8 м, а в ущельях и у подножий гор иногда достигает 10 м и более.

«Плотность снежного покрова в среднем составляет – 0,3 – 0,5 г/см³, что объясняется мелкой структурой снежинок и сильными ветрами, способствующими уплотнению снега.

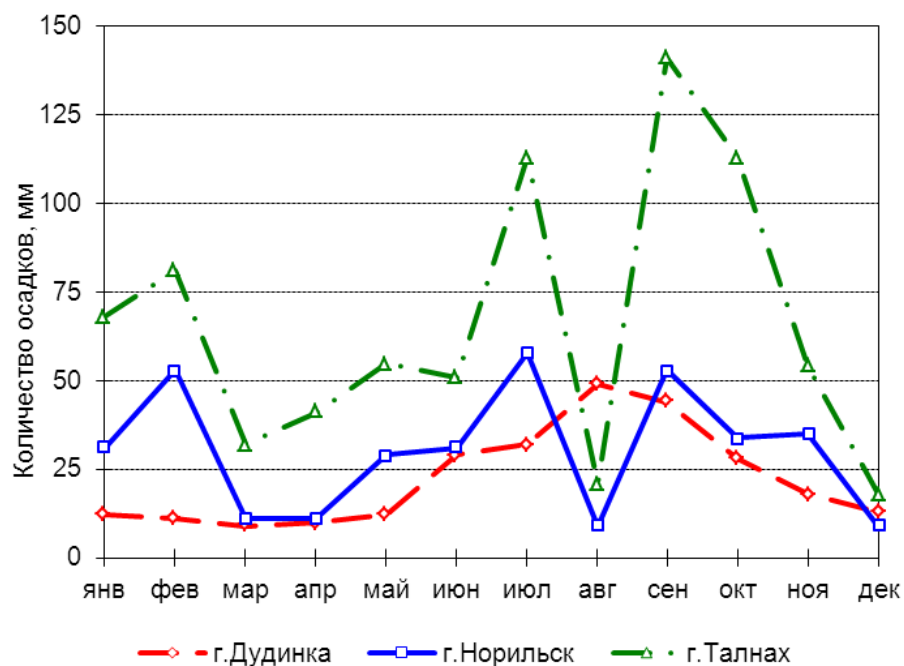


Рисунок 1.4 Среднемесячное количество осадков

Наиболее продолжительно снежный покров удерживается в горной части района, в ущельях и на склонах северной экспозиции, где сходит в конце лета, либо не сходит совсем, формируя многолетние снежники.

Истинные даты схода и образования устойчивого снежного покрова из года в год колеблются в пределах месяца. Для данного района характерны большие переносы снега господствующими ветрами» [Лолаев, Бутюгин и др., 2001].

Инженерно-геологические условия территории

Первые инженерно-геологические изыскания на исследуемой территории относятся к 1965-70-м годам, работы проводились Комплексной экспедицией инженерных изысканий для строительства хвостохранилища №2 «Лебяжье». В дальнейшем инженерные изыскания выполнялись институтом «Норильскпроект», а с 2005 года ООО «Норильскгеология». Исследования вблизи проектируемого объекта выполнялись под строительство гидротехнических сооружений и вспомогательных сооружений хвостохранилища.

Материалы изысканий использованы для получения информации о природной среде участка работ.

В геоморфологическом отношении хвостохранилище «Лебяжье» расположено в бассейне р. Купец, которая является притоком р. Щучья, впадающей в озеро Пясино.

Территория района представляет собой аллювиально-озерную равнину. Общий уклон поверхности рельефа имеет северное и северо-западное направление, естественный рельеф низкий, мелкорасчлененный.

В инженерно-геологическом строении площадки строительства участвуют грунты четвертичной системы и комплекса карбонатно-осадочных пород нижнего девона (доломиты, мергели, гипсы и ангидриты).

Мощность четвертичных отложений составляет более 40 метров и представлена современными и верхнечетвертичными образованиями: техногенные грунты (t QIV) и биогенные грунты (b QIV).

Техногенные грунты (tQIV) В районе исследуемой территории выделяются два вида техногенных образований: крупнообломочные грунты (щебень магматических пород и металлургического шлака) и намывные грунты (суглинки, супеси, пески). Их происхождение связано с производственной деятельностью ГМК.

Техногенные грунты на участке изысканий имеют широкое распространение, их максимально вскрытая мощность по материалам изысканий составляет в основании ограждающей дамбы хвостохранилища Лебяжье (поле 2) – 44,5 метров. Распространение намывных грунтов отмечается в районе реки Купец, вскрытой мощностью до 4,0 метров, намывы происходили в 1975-1979 годах при аварийных сбросах во время строительства и эксплуатации недостроенного хвостохранилища.

Щебенистый грунт металлургического шлака залегает с поверхности на участке действующего хвостохранилища Лебяжье и прилегающей территории, мощностью 0,5 – 10,5 метров. Техногенные песчано-глинистые намывные грунты (ОФ) распространены на исследуемой территории в основании действующей ограждающей дамбы суммарной мощностью до 30,0 метров, и в восточной и центральной части, мощностью от 0,2 до 8,8 м.

Биогенные грунты (bQIV) распространены незначительно преимущественно в западной части территории, а также на заболоченных участках понижений рельефа. В восточной части территории торфы и растительные остатки погребены под чехлом техногенных образований.

Торф характеризуется как слаборазложившийся, техногенно засоленный, в составе грунта просматриваются мохово-растительные остатки. Мощность торфов не превышает 3,0 метров.

Нерасчлененные аллювиально-флювиогляциальные отложения (afgQIII-IV) условно объединенные в один покровный комплекс, включают в себя осадки последних оледенений, флювиогляциальные образования и аллювиально-озерные отложения.

Комплекс отложения (afg QIII-IV) развит на всей территории хвостохранилища до глубины 40,0 и более метров. в центральной и восточной части хвостохранилища естественные грунты преимущественно залегают под техногенными намывами.

Геологический разрез исследуемой территории до глубины 25,0 м представлен преимущественно мерзлыми суглинками и глинами. Глинистые грунты по разрезу характеризуются как органоминеральные с содержанием органики до 7 %. В долине реки Купец и мелких водотоков в верхней части разреза встречаются русловые отложения, представленные маломощными прослоями гравия и разнозернистых песков (до глубины ~ 8.0 метров). Крупнообломочный материал (включения) в суглинках и глинах в верхней части разреза встречается редко.

В нижней части, ориентировочно с глубины 15,0 метров появляются прослой гравийно-галечниковых грунтов магматических пород и плотных суглинков с включением гальки и валунов. В целом отмечается, что с глубиной мощность прослоев гравийно-галечниковых грунтов и количество обломков в суглинках увеличивается. По составу гравийно-галечниковые грунты содержат валунов до 10 % и заполнителя до 30 %, в суглинках содержание крупнообломочного материала неравномерно от 15 до 30 %.

Аллювиально-флювиогляциальные отложения с глубины от 25,0 до 40,0 метров характеризуются выклиниванием слоев крупнообломочных и песчаных пород в глинистых отложениях. Мощность слоев изменчива и достигает до 12,0 метров.

Гравийные грунты характеризуются повышенным содержанием легко- и среднерастворимых солей 0,24 %, засоление связано с близким залеганием минерализованных подмерзлотных вод (до 2,18 г/дм³).

Кроме текстурообразующего льда в основании залегают прослои и линзы подземного льда мощностью 0,5-11,4 метров.

Кровля естественных грунтов на территории хвостохранилища повсеместно загрязнена техногенными отходами Норильской обогатительной фабрики (отвальные хвосты), примесь представлена песчанистым материалом, который массово переносится по площадке ветром и в весенне-летний период сезонными талыми водами.

Геокриологические условия

Территория Норильского промышленного района относится к Енисей-Путоранскому геокриологическому региону. Территория района хвостохранилища расположена в пределах геокриологической области Норильско-Рыбнинской межгорной равнины. В пределах Норильско-Рыбнинской равнины мощность многолетнемерзлых пород изменяется в зависимости от абсолютных отметок рельефа, составляя в поймах рек 15-20 метров, а в пределах распространения ледово-морских и озерных террас - до 50 метров. На предсклоновых участках территории мощность многолетнемерзлых пород увеличивается до 100 метров. По способу промерзания горных пород мерзлая толща относится к эпигенетическому типу.

Геокриологические условия территории хвостохранилища характеризуются распространением прерывистой толщи многолетнемерзлых грунтов мощностью более 50 метров. На участке изысканий встречаются талики гидрогенного типа и смешанного гидрогенно-техногенного типа.

Гидрогенные талики приурочены к поверхностным водам, которые широко распространены, аккумулируют тепло и таким образом оказывают согревающее воздействие на нижележащие породы. Гидрогенно-техногенные талики развиты в районе дамбы хвостохранилища «Лебяжье».

Талые грунты в естественных гидрогенных таликах вскрыты на глубине от 3,0 до 12,0 м (абсолютные отметки 21,8-35,0 м в Балтийской системе высот). При этом на территории вблизи действующего хвостохранилища активно развиваются талики техногенного типа, которые увеличиваются по площади и таким образом объединяются с таликами природного генезиса.

Подмерзлотные талики вскрыты на глубине от 6,0 до 39,5 м. Подмерзлотные талики до глубины ~ 25 метров в слабопроницаемых глинистых отложениях характеризуются как безводные, с глубины ~ 25 метров – грунтово-фильтрационные, в которых залегают подземные подмерзлотные воды. Направление потока подземных вод происходит в соответствии с уклоном рельефа.

Толща многолетнемерзлых пород характеризуется различной криогенной текстурой и льдистостью от 0,03 до 0,9 д.ед. По разрезу преобладают льдистые и очень сильнольдистые глинистые грунты – слоистой, сетчатой и атакситовой криогенной текстуры, в нижней части разреза слабольшдистые и нельдистые грунты – слоистой и массивной криогенной текстуры.

«Происходит промерзание намывных грунтов сверху вниз и снизу-вверх, с преобладающим промерзанием сверху. Мощность мерзлых грунтов изменяется от 8,0 до 13,0 м. Верхняя часть находится в мерзлом состоянии до глубины 4,5 - 5,0 м с температурой мерзлых грунтов от -0,4°С до -3,7°С. Ниже 4,5 м мерзлые грунты находятся в высокотемпературном состоянии, борта дамбы сложены мерзлыми грунтами. Под существующим прудом-отстойником хвосты обогатительных фабрик находятся в талом состоянии. Мощность слоя сезонного оттаивания составляет 2,5 м для намывных

грунтов и 3,0 м - для насыпных, мощность сезонного промерзания 2,5 м и 3,5 м соответственно» [Геотехнические и фильтрационные исследования, 1978].

По температурно-прочностному режиму грунты на территории хвостохранилища делятся на:

- техногенные грунты – пластичномерзлые;
- естественные грунты – твердомерзлые;
- естественные грунты – пластичномерзлые.

Геокриологическая ситуация на территории характеризуется как устойчивая (мерзлая).

Гидрогеологические условия

Гидрогеологические условия территории характеризуются наличием двух комплексов подземных вод – воды четвертичных отложений и девонского терригеннокарбонатного комплекса.

Комплекс четвертичных отложений Подземные воды четвертичных отложений объединяют сезонно-действующие и таликово-криогенные воды.

Сезонно-действующие (надмерзлотные) подземные воды не вскрыты, воды этого горизонта появляются в летне-осенний период в слое сезонного оттаивания до глубины 2,5 метров. Водовмещающими породами преимущественно служат насыпные крупнообломочные грунты (коэффициент фильтрации 5-20 м/сутки) и пески (коэффициент фильтрации до 2 м/сутки). Питание подземные воды получают за счет инфильтрации атмосферных осадков. В отсутствие питания (дожди, таяние снегов) водоносный горизонт срабатывается, водоупором является толща многолетнемерзлых пород.

Подземные таликово-криогенные воды залегают на глубине от 2,5 до 9,2 метров. Подземные воды приурочены к гидрогенным и техногенным таликам. Питание горизонт получает за счет инфильтрации атмосферных осадков и притока поверхностных вод, подземные воды горизонта имеют застойный режим и не перемерзают в течении года. В летний период

горизонт гидравлически связан с надмерзлотными водами сезонно действующего слоя.

Водовмещающие грунты представлены суглинками (коэффициент фильтрации $<0,001$ м/сутки), песком (коэффициент фильтрации до 2 м/сутки), галечниковыми грунтами и металлургическим шлаком (коэффициент фильтрации до 20 м/сутки). Водоупором служат мерзлые и слабофильтрующие грунты (суглинки и глины).

Максимальный уровень подземных вод наблюдается в периоды весеннего снеготаяния и интенсивного выпадения дождей.

По химическому составу подземные воды сульфатные магниево-кальциевые, пресные и слабосолоноватые, жёсткие.

Уклон территории преимущественно в северо- и северо-западном направлении, поэтому долины рек Купец и Щучья являются областью разгрузки данного комплекса подземных вод.

Девонский терригенно-карбонатный комплекс (подмерзлотные воды) - подмерзлотный комплекс условно можно разделить на несколько водоносных зон.

Первая зона — это подземные воды трещиноватых скальных пород, и вторая включает фильтрующие отложения на границе соприкосновения их с трещиноватыми породами.

Водовмещающими породами горизонта являются трещиноватые коренные породы и гравийно-галечниковые грунты. Подмерзлотные подземные воды на участке изысканий характеризуются повышенной минерализацией от 0,5 г/дм³ до 2,18 г/дм³ и имеют геохимические особенности, обусловленные наличием в разрезе известняков, гипсов, ангидритов.

Питание подземных вод девонского комплекса (подмерзлотных) происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков на участках прерывистой мерзлоты или путем перетекания подземных вод выше залегающего горизонта (таликово-криогенные воды).

Наличие в разрезе прослоев водопроницаемых пород на контакте с водовмещающими коренными породами способствует фильтрации вод в рыхлые отложения (четвертичных пород).

Специфические грунты

К специфическим грунтам в пределах территории хвостохранилища относятся техногенные (насыпные и намывные), органические, органоминеральные грунты и подземные льды.

Техногенные грунты на территории изысканий выделяются двух видов насыпные и намывные. Намывные грунты представлены переслаивающимися суглинками, супесями и мелкими песками, суммарная мощность составляет от 0,2 до 30,0 м. Насыпные грунты представлены щебенистым грунтом металлургического шлака, мощность составляет 10,5 м.

Намывные грунты залегают на территории Лебяжье в направлении на северо-запад по низинам и временным водотокам. Намывные грунты засоленные, засоленность в грунтах изменяется от 0,6 до 1,0 %. В мерзлом состоянии хвосты ОФ в основном льдистые, содержание льда достигает до 90 %.

Насыпные и намывные грунты в границах исследуемой территории сформированы в результате строительства и эксплуатации комплекса хвостового хозяйства – хвостохранилища «Лебяжье». Насыпь из металлургического шлака и хвостов – служит для удержания намываемых хвостов. Отсыпаны и намыты техногенные образования планомерно по специально разработанному проекту, грунт характеризуется как слежавшиеся, самоуплотненный.

За время эксплуатации гидротехнического сооружения естественный рельеф территории, прилегающей к хвостохранилищу Лебяжье, видоизменен в результате подъема высоты дамбы, максимальная мощность техногенных грунтов составила 44,5 метров.

Техногенные грунты до глубины 4,0 метра, могут находиться как в мерзлом, так и талом состоянии - грунты деятельного слоя.

К органическим и органоминеральным грунтам на исследуемой территории относятся торф и глинистые грунты с содержанием органического вещества до 14 %. Торф распространен на территории незначительно (локально) и залегает в верхней части аллювиально-озерных отложений мощностью до 3,0-х метров.

Торфы на территории хвостохранилища характеризуются как слабо и среднеразложившиеся с содержанием органики до 70 %, объемный вес торфов, на участках, составляет 0,93-1.46 г/см³, грунт имеет высокую пористость и влажность (более 100 %), при переходе из мерзлого состояния в талое обладает сильной сжимаемостью, поэтому несущая способность у торфа низкая. Торфы относятся к слабым, неравномерно деформируемым грунтам, обладающим очень изменчивыми свойствами, неблагоприятными для строительства.

Подземные льды (ледогрунт) распространены в техногенных и естественных отложениях, имеют пространственно невыдержанные прослои, и характеризуются изменчивым строением из-за примесей и включений. Кристаллический лед встречается повсеместно, мощность его варьируется в широких пределах от 0,5 м до 11,4 м, залегает с 0,2 до 27,0 метров.

1.4 Цели и задачи исследований

Несмотря на известные достижения в проектировании и эксплуатации намывных техногенных массивов, в методическом и научном обеспечении исследований вопросов разработки и оптимизации способов их формирования еще недостаточно.

Особенно эта проблема актуальна в условиях криолитозоны, так как завершение процесса консолидации намывного слоя до начала промерзания является одним из условий обеспечения устойчивости сооружения. В связи с

этим применение методов оптимизации с учетом консолидационных характеристик твердой фракции является актуальным.

В соответствии с этим цель данной работы заключается в инженерно-геологическом обосновании формирования намывных геотехнических массивов в криолитозоне с учетом консолидационных свойств техногенных грунтов для повышения устойчивости.

В задачи исследований входили:

- анализ особенностей строительства и эксплуатации намывных техногенных массивов горнодобывающего и металлургического производства;
- исследование физико-механических характеристик техногенных грунтов-хвостов в лабораторных условиях;
- разработка методики оптимизации параметров намыва техногенного массива с учетом консолидационных свойств твердой фракции;
- практическая реализация разработанной методики (на примере хвостохранилища «Лебяжье» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель»).

ГЛАВА 2 КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА, СТРУКТУРЫ, СВОЙСТВ ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВОЗВЕДЕНИЯ НАМЫВНЫХ СООРУЖЕНИЙ

2.1. Комплексное исследование состава, структуры и свойств техногенных грунтов.

2.1.1 Методика, состав и материалы исследований

В лабораторных условиях исследования техногенных грунтов – хвостов были выполнены по методической схеме, разработанной в лаборатории грунтоведения Института земной коры СО РАН д.г-м.н. Т.Г.Рященко и включающей определение комплекса показателей, которые разделены на четыре группы: структурную (характеризующую структурные элементы, тип структурных связей и типы структур), химическую (показатели химического состава и физико-химических свойств), физическую (показатели физического состояния и свойств) и механическую (показатели деформационных и прочностных свойств).

Были проведены следующие виды исследований: изучение гранулометрического состава грунтов; изучение основных параметров микроструктур хвостов и установление типов их структурных моделей; изучение физических и физико-химических свойств (плотность минеральной части, седиментационный объем, углы естественного откоса на воздухе и под водой, пластичность, емкость катионного обмена); исследование механических свойств (прочностных характеристик, деформационных характеристик грунтов при различных значениях влажности)

Использовались воздушно-сухие образцы техногенных грунтов-хвостов нарушенного сложения, отобранные в пределах дамбы 1-го поля хвостохранилища «Лебяжье» с пикетов ПК-104, ПК-101, ПК-98. Отобранные образцы по визуальному описанию представляют собой однородную песчано-пылеватую сыпучую массу темно-серого (дымчатого) цвета

(кусочков нет). Выбор образцов с указанных пикетов обусловлен тем, что до южного борта 1-го поля хвостохранилища, который является самым отдаленным, доходят хвосты мелкой фракции. В связи с этим данный борт является наиболее опасным с позиции обеспечения устойчивости.

2.1.2 Исследование физико-механических свойств хвостов.

2.1.2.1 Гранулометрический и минеральный состав грунтов

Гранулометрический анализ выполнялся пипеточным методом тремя способами подготовки образца: микроагрегатным, стандартным (кипячение с аммиаком) и дисперсным (кипячение с пирофосфатом натрия) [Ломтадзе, 1990]. Для изучения степени агрегированности намывных отложений применялся метод структурных диаграмм, предполагающий использование результатов гранулометрического анализа при расчете коэффициентов микроагрегатности ($K_{ма}$) для шести фракций по разности их содержаний при дисперсной и агрегатной подготовке образца [Рященко, 1998].

В таблице 2.1 приведены принятые индексы показателей с их расшифровкой.

Таблица 2.1 Принятые индексы показателей

Показатель	Расшифровка	Ед. изм.	Крупность
$M_{пс}^1$	содержание крупно-песчаной фракции	%	более 0,25мм
$M_{пс}^2$	содержание мелко-песчаной фракции	%	0,25 - 0,05мм
$M_{п}^1$	содержание крупно-пылеватой фракции	%	0,05 - 0,01мм
$M_{п}^2$	содержание мелко-пылеватой фракции	%	0,01- 0,002мм
$M_{с}^1$	содержание крупно-глинистой фракции	%	0,002- 0,001мм
$M_{с}^2$	содержание мелко-глинистой фракции	%	менее 0,001мм

где $M_{пс}$, $M_{п}$, $M_{с}$ - суммарное содержание песчаных, пылеватых и глинистых фракций, %; $^1, ^2$ – индексы.

Результаты анализа гранулометрического состава грунтов, полученные микроагрегатным, стандартным и дисперсным способами, представлены в таблице 2.2:

Таблица 2.2 Результаты гранулометрического анализа грунтов

№ пробы	Тип подготовки образца	$M_{\text{пс}}^1$	$M_{\text{пс}}^2$	$M_{\text{п}}^1$	$M_{\text{п}}^2$	$M_{\text{с}}^1$	$M_{\text{с}}^2$
ПК104	Агрегатный	57,3	29,6	5,9	2,4	2,8	2,0
	Полудисперсный	54,9	25,9	11,6	0,9	4,1	2,6
	Дисперсный	48,3	31,8	6,6	3,4	6,8	3,1
ПК-101	Агрегатный	39,3	32,2	23,6	2,2	2,2	0,5
	Полудисперсный	34,6	34,3	25,3	2,3	2,0	1,5
	Дисперсный	31,7	35,9	27,7	1,5	2,0	1,2
ПК-98	Агрегатный	10,7	56,1	27,1	1,9	2,1	2,1
	Полудисперсный	10,3	52,3	32,1	1,8	1,6	1,9
	Дисперсный	8,3	53,8	27,8	3,3	3,7	3,1

Содержание фракций (%): $M_{\text{пс}}^1$ - средней и крупной песчаной (250-500 мкм), $M_{\text{пс}}^2$ - тонкой и мелкой песчаной (50-250 мкм), $M_{\text{п}}^1$ - крупной пылеватой (10-50 мкм), $M_{\text{п}}^2$ - мелкой пылеватой (2-10 мкм), $M_{\text{с}}^1$ - грубой глинистой (1-2 мкм), $M_{\text{с}}^2$ - тонкой глинистой (<1 мкм) (По Рященко).

Коэффициенты микроагрегатности рассчитывались по методике, предложенной А.К.Ларионовым (1971) и расширенной Т.Г.Рященко (2010). По этим коэффициентам, которые представляют собой разность содержаний фракций, определенных при дисперсной подготовке образца (максимально разрушаются только агрегаты, если они есть в грунте) и микроагрегатной (разрушаются только водонеустойчивые агрегаты), можно оценить степень агрегированности, определить размеры агрегатов и их строение, т.е. узнать, из каких более мелких частиц они состоят. Кроме того, определяется степень свободы мелкоглинистых (менее 0,001 мм) частиц по величине $K_{\text{ма}}^{1-2}$ [Рященко, 2010].

Коэффициенты микроагрегатности определяются следующим образом:

$$K^{1-2}_{\text{ма}} = M^2_{\text{с}}(\text{д}) - M^2_{\text{с}}(\text{ма})$$

$$K^{1-1}_{\text{ма}} = M^1_{\text{с}}(\text{д}) - M^1_{\text{с}}(\text{ма})$$

$$K^{2-2}_{\text{ма}} = M^2_{\text{п}}(\text{д}) - M^2_{\text{п}}(\text{ма})$$

$$K^{2-1}_{\text{ма}} = M^1_{\text{п}}(\text{д}) - M^1_{\text{п}}(\text{ма})$$

$$K^{3-2}_{\text{ма}} = M^2_{\text{пс}}(\text{д}) - M^2_{\text{пс}}(\text{ма})$$

$$K^{3-1}_{\text{ма}} = M^1_{\text{пс}}(\text{д}) - M^1_{\text{пс}}(\text{ма})$$

где (д) - содержание соответствующей фракции при дисперсном способе подготовки образца, %; (ма) - то же при микроагрегатном способе подготовки, %

Чем меньше этот коэффициент, тем больше степень свободы, то есть глинистые частицы не находятся в составе агрегатов, а являются первичными. Когда все мелкоглинистые частицы свободны и не участвуют в формировании агрегатов $K^{1-2}_{\text{ма}}$ больше или равен нулю.

$K^{3-1}_{\text{ма}}$ всегда отрицателен, если крупнопесчаные частицы представляют собой агрегаты и равен нулю, если все они первичны.

Остальные четыре коэффициента могут иметь произвольные значения.

Результаты определения гранулометрического состава использовались при расчете коэффициентов микроагрегатности ($K_{\text{ма}}$) (Таблица 2.3) для шести фракций по разности их содержаний при дисперсной и агрегатной подготовке образца

Таблица 2.3 Полученные коэффициенты микроагрегатности

№ пробы	$K^{1-2}_{\text{ма}}$	$K^{1-1}_{\text{ма}}$	$K^{2-2}_{\text{ма}}$	$K^{2-1}_{\text{ма}}$	$K^{3-2}_{\text{ма}}$	$K^{3-1}_{\text{ма}}$
ПК104	1,1	4,0	1,0	0,7	2,2	-9,0
ПК-101	0,7	-0,2	-0,7	4,1	3,7	3,7
ПК-98	1,0	1,6	1,4	0,7	-2,3	-2,4

Отрицательное значение коэффициента микроагрегатности говорит о том, что произошло уменьшение содержания фракции при дисперсной

подготовке образца, значит разрушились агрегаты этой размерности и составляющие их частицы ушли в группу более мелких. Следовательно, отрицательный коэффициент показывает количество агрегатов соответствующей величины. Коэффициент микроагрегатности с положительным знаком - прибавка частиц более мелких размеров, которые освободились из агрегатов.

Таким образом, при диспергации происходит закономерный процесс: более крупные элементы разрушаются, а самые мелкие собираются в составе фракции менее 0,001 мм.

Определение микроструктур исследуемых намывных грунтов опирается на положения, представленные в работе Осипова В.И. и др. (1989).

«Для глинистых пород осадочного происхождения различного возраста, генезиса и степени литификации выделено пять основных типов микроструктур: ячеистая; скелетная, или зернистая; матричная; турбулентная и ламинарная.

Скелетная, или зернистая, микроструктура сложена в основном зернами первичных минералов, формирующих однородный минеральный «скелет»; глинистый материал распределен неравномерно и не создает сплошной матрицы; обычно он скапливается на поверхности зерен в виде сплошных «рубашек» или на контактах песчаных и пылеватых зерен, образуя между ними своеобразные глинистые связки и «мостики» (рисунок 2.1) с контактами коагуляционного типа между глинистыми частицами» [Осипов, Соколов и др, 1989].

«Взаимодействие глинистых частиц внутри «мостиков» идет по типу базис-скол и скол-скол, реже базис-базис. Благодаря равномерному распределению зерен первичных минералов скелетная микроструктура выглядит изотропной, равномернопористой с преобладанием изометричных межзернистых, щелевидных и клиновидных межультрамикроагрегатных пор. Размер межзернистых пор определяется размером зерен. Общая пористость составляет 40—60 %.

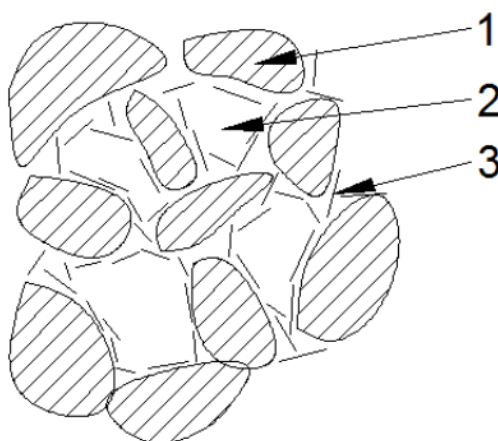


Рисунок 2.1 Скелетная микроструктура глинистых грунтов: 1-пылеватые и песчаные зерна; 2-поры (ячейки); 3-глинистые частицы.

Скелетную микроструктуру имеют глинистые отложения различного минерального состава (чаще всего гидрослюдистые), содержащие значительное количество пылеватых зерен (40 – 60 %) и относительно небольшое количество глинистых частиц (10 – 30 %). Для этой микроструктуры характерна значительная сжимаемость и низкая динамическая устойчивость: в условиях полного водонасыщения она проявляет типичные плывунные свойства, обусловленные низкой прочностью глинистых «мостиков» на контактах зерен. Анизотропия свойств не наблюдается» [Осипов, Соколов и др., 1989].

Кроме того, при определении параметров микроструктуры: количество агрегатов (A) и первичных частиц (M), их распределение по размерам (A_i , M_i) и коэффициенты свободы фракций (F_i), представляющих долю (%) первичных частиц в их общей сумме (первичные плюс находящиеся в агрегатах); выполнялись специальные расчеты [Рященко, 2011].

В зависимости от количества агрегатов тип микроструктуры определялся по классификационной таблице 2.4.

Таблица 2.4 Классификация типов микроструктур глинистых и лессовых грунтов

Общее количество агрегатов (A), %	Микроструктура	Условный индекс
$A < 10$	скелетная	ск
$10 < A < 25$	агрегированно-скелетная	аг-ск
$25 < A < 40$	скелетно-агрегированная	ск-аг
$A > 40$	агрегированная	аг

Тип структурной модели грунта устанавливался по размеру преобладающих элементов ($A_i + M_i$) и специальному коэффициенту G по классификационной таблице 2.5. [Рященко, Акулова, 1998].

Коэффициент G — доля первичных частиц в общей сумме структурных элементов (первичные частицы плюс агрегаты), %; x — размер первичных частиц и агрегатов, мкм.

Таблица 2.5 Классификация типов структурных моделей глинистых и лессовых грунтов

Размер преобладающих элементов	Тип модели	$G = M^x / A^x + M^x$	Тип модели
$A^1 + M^1$	Средне-крупнопесчаная (250-500 мкм)	$80 < G < 100$	Элементарная
$A^2 + M^2$	Тонко-мелкопесчаная (50-250 мкм)	$20 < G < 80$	Смешанная
$A^3 + M^3$	Крупнопылеватая (10-50 мкм)	$G < 20$	Агрегированная
$A^4 + M^4$	Мелкопылеватая (2-10 мкм)		
$A^5 + M^5$	Грубоглинистая (1-2 мкм)		

В результате было установлено, что намывные грунты характеризуются следующими типами структурных моделей (Таблица 2.6).

Таблица 2.6 Типы микроструктур и структурные моделей грунтов

Тип микроструктур	Тип модели по размеру преобладающих элементов	Тип структурной модели (G, %) $G = M^x/A^x + M^x$
Скелетный	Тонко-мелкопесчаная [$A^2 + M^2$]	Элементарная (92,5)
Скелетный	Средне-крупнопесчаная [$A^1 + M^1$]	Элементарная (84,8)
Скелетный	Тонко-мелкопесчаная [$A^2 + M^2$]	Элементарная (93,5)

Из данных, представленных в таблице 2.5 следует, что хвосты обогатительных фабрик НПР имеют скелетную микроструктуру, тип структурной модели — тонко-мелкопесчаный элементарный и средне-крупнопесчаный элементарный. Структурные связи между частицами и агрегатами, формирующиеся в массивах искусственных грунтов хвостохранилищ при диагенезе, относятся к коагуляционному или переходному типу.

2.1.2.2 Физические и физико-химические свойства намывных грунтов

Для определения показателей физических и физико-химических свойств грунтов использовались воздушно-сухие образцы. Проведенные исследования физических и физико-химических свойств намывных грунтов методом «структурных диаграмм» позволили установить следующее: грунты агрегированы, степень агрегатизации высокая, зафиксированы крупнопылеватые, мелкопесчаные и мелкопылеватые агрегаты, сформированные за счет мобилизации мелкоглинистых фракций; основная масса пылеватых частиц является первичной. Структурные связи между частицами и агрегатами относятся к коагуляционному или переходному типу. Внутриагрегатные связи обусловлены присутствием водорастворимых солей и глинистых минералов. Грунты обладают средней физико-химической активностью (емкость катионного обмена 11-23 мг-экв); имеют слабокислую реакцию среды (6,7-6,9). Результаты исследований представлены в (Таблица 2.7).

Таблица 2.7 Показатели физических и физико-химических свойств
грунтов

№ пробы	ρ_s	W_L	W_P	I_P	V	φ_1	φ_2	D_j	$E_{об}$
ПК-104	2,61	32,1	27,9	4,2	2,5	19,2	15,8	7,2	11,0
ПК-101	2,61	31,8	28,1	3,7	2,0	21,3	15,1	5,5	15,4
ПК-98	2,63	32,4	27,2	5,2	2,0	19,6	14,2	2,3	13,0

Примечание: ρ_s – плотность минеральной части грунта, г/см³; W_L , W_P , I_P – верхний, нижний пределы пластичности, число пластичности, %; V – седиментационный объем, см³; φ_1 , φ_2 – угол естественного откоса на воздухе и под водой, град.; D_j – величина изменения угла, град.; $E_{об}$ – емкость катионного обмена грунта, мг-экв на 100 г вещества.

Кроме того, хвосты характеризуются слабой пластичностью (число пластичности не превышает 5,2%) и различной степенью гидрофильности. Хвосты, проявляющие пластичные свойства и характеризующиеся набуханием, имеют минимальные значения фильтрационных параметров.

По величине седиментационного объема ($< 3,3$ см³) грунты относятся к потенциальным пловунам первого типа (без структурных связей), в то же время уменьшение угла естественного откоса под водой (на 6-10°) свидетельствуют о наличии структурного сцепления.

Исследования показали, что песчано-пылеватые хвосты относятся к группе набухающих грунтов (5,2-7,5 %); величина начальной влажности и плотности грунтов на степень набухания влияния не оказывает. Объемная усадка этих образцов не превышает 4%.

2.1.2.3 Определение механических свойств намывных грунтов.

Показатели прочности определялись на специально приготовленных образцах с влажностью, изменявшейся в диапазоне от 2 до 40 %. Подобный влажностной режим обусловлен небольшой разницей (5,2 %) между пределами пластичности и текучести; необходимостью оценки прочности при заниженной влажности, которая соответствует влажности грунтов в период отдыха пляжа.

Испытания проводились на автоматизированном испытательном комплексе «АСИС» (Рисунок 2.2) [<http://npp-geotek.ru/catalog/products/131/9>, Лолаев, Бадоев и др., 2017-2019].



Рисунок 2.2 Автоматизированный испытательный комплекс АСИС

«Он предназначен для проведения механических испытаний природных и промышленных строительных материалов при различных видах напряженного состояния и траекториях нагружения.

Испытания образцов материалов проводятся в автоматизированном режиме.

Автоматизированный испытательный комплекс АСИС представляет собой совокупность устройств силового нагружения и управления давлением, приспособлений для испытаний образцов при различных видах напряженного состояния, измерительной системы АСИС, программного обеспечения на базе ПЭВМ.

Устройства осевого нагружения обеспечивают силовое воздействие по различным траекториям: ступенями, с контролем напряжений; ступенями с контролем положения» [<http://npp-geotek.ru/catalog/products/131/9>].

В составе автоматизированного испытательного комплекса АСИС применяются устройства управления давлением.

Для измерения параметров испытаний применяются измерительная система АСИС. Система представляет собой двух уровневую конструкцию. Нижний уровень Системы представлен датчиками соответствующих

физических величин и вторичным преобразователем. Верхний уровень Системы включает в себя программное обеспечение на базе ПЭВМ. Принцип действия Системы заключается в измерении физических величин первичными преобразователями с последующим преобразованием измерительной информации во вторичном преобразователе (блоке электронно-преобразующем) в цифровой вид. Полученная информация передаётся в ПЭВМ, обрабатывается и выводится на монитор и внешние устройства.

Определение параметров прочности грунтов и оценка устойчивости намывных массивов позволили установить следующие **специфические свойства** хвостов.

Образцы характеризуются очень высоким коэффициентом пористости (0,84-1,64), но по результатам быстрого сдвига имеют относительно высокие значения прочности ($C = 0,065-0,085$ МПа; $\varphi = 17-22^\circ$). При увеличении влажности сцепление уменьшается, угол внутреннего трения также уменьшается или остается без изменений. Длительная прочность грунтов при тех же значениях влажности (10,1- 36,7%) находится в пределах 0,45 – 0,80 МПа, угол внутреннего трения – 14-29°.

Максимальные коэффициенты сжимаемости при нагрузке 0,1 МПа составляют 0,22-0,60 МПа⁻¹, т.е. хвосты относятся к группе сильно сжимаемых разновидностей

Анализ полученных результатов позволил установить при влажности 16,0-22,0% сцепление составляет 0,055-0,085 МПа. Резкое падение прочности наблюдается только при значительном (на 6-8%) превышении предела текучести грунтов: при влажности 38,0-40,0% она составляет 0,018-0,028 МПа.

Проведенные исследования показали, что техногенные намывные грунты, слабoplastичны, имеют высокий коэффициент пористости, однако их прочностные характеристики выходят за рамки стандартов по причине специфического состава этих грунтов. Можно сделать вывод о наличии

признаков устойчивости техногенных отложений при влажности менее предела пластичности: сцепление составляет 0,048-0,085 МПа, ϕ - 17-30°; при длительном деформировании падения прочности почти не происходит; повышение влажности (при условии, что ее значение не выходит за рамки W_p) не вызывает изменения прочности, а в некоторых случаях она даже повышается.

2.2 Постановка задачи определения параметров возведения намывного техногенного массива - хвостохранилища «Лебяжье» ПАО ЗФ «ГМК «Норильский никель»

Заполярный филиал ПАО ЗФ «ГМК «Норильский никель» является одним из крупнейших производственных комплексов России, объединяющий основные производственные мощности горнодобывающих, обогатительных и металлургических предприятий, предприятий энергообеспечения, транспорта, других вспомогательных служб и подразделений. Отходы, главным образом, образуются на обогатительных фабриках, где отвалы хвосты, пройдя стадию гравитационного доизвлечения ценных компонентов, транспортируются в накопитель – хвостохранилище «Лебяжье».

Проведя структурный анализ деятельности ПАО ЗФ «ГМК «Норильский никель» [«Производство металлов за полярным кругом», 2007] была разработана схема производственного комплекса (рисунок 2.3). На схеме приведены процессы поставки сырья (руды) на обогатительные фабрики и процессы укладки пустой породы (хвостов) в накопители отходов.

Добыча и обеспечение обогатительных фабрик, в требуемом количестве, рудой осуществляется горно-геологическим управлением, в подчинении которого находятся рудник «Октябрьский», рудник «Таймырский», рудоуправление «Талнахское» и рудоуправление «Норильск - 1». В состав рудоуправления «Талнахское» входят рудники «Комсомольский», «Маяк» и «Скалистый», а в рудоуправление «Норильск -

1» - рудники «Заполярный», «Кайерканский», «Медвежий ручей», «Скалистый».

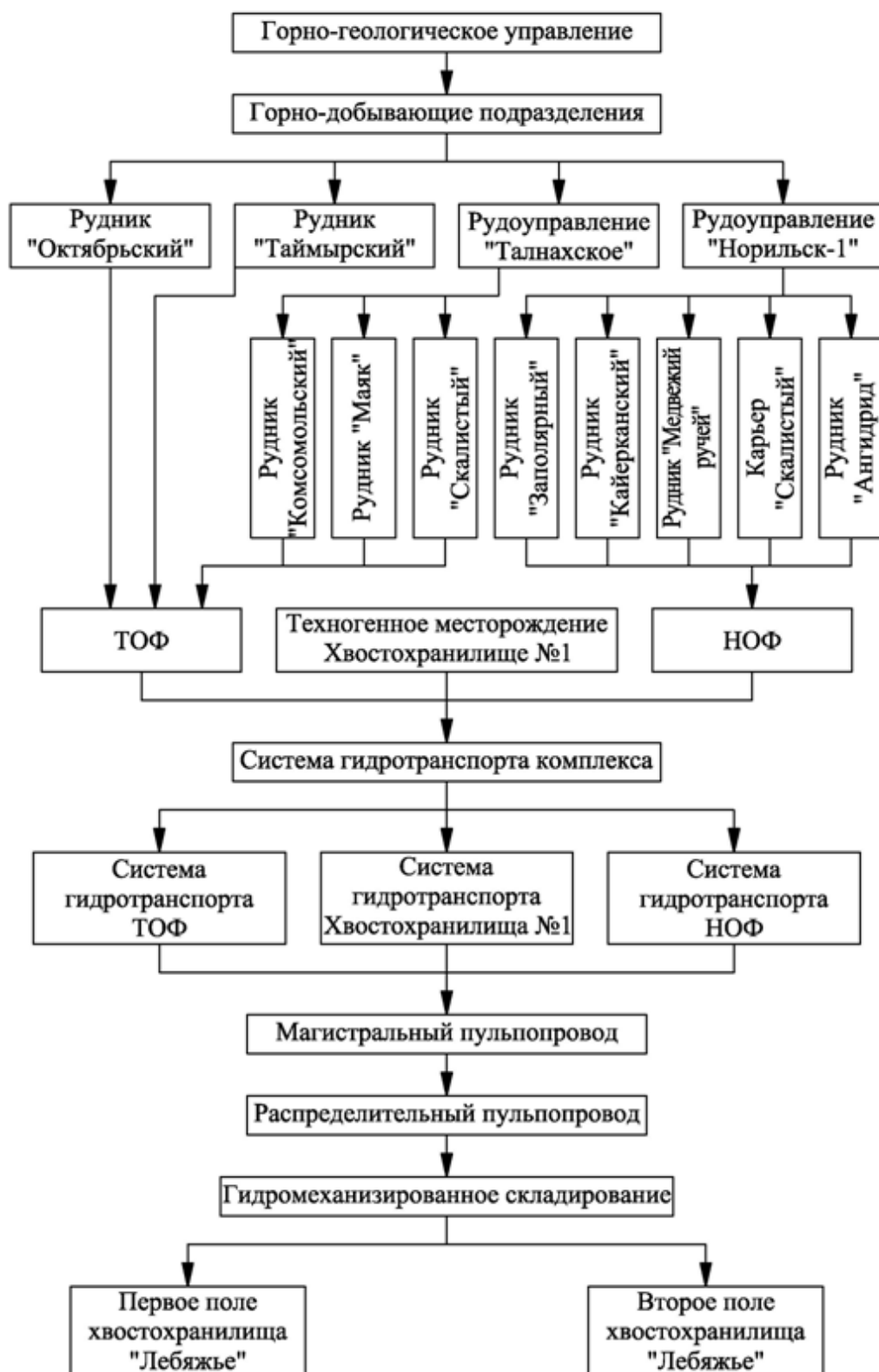


Рисунок 2.3 - Схема производственного комплекса ПАО ЗФ ГМК «Норильский никель» (по состоянию на 2013 год)

«Рудники обеспечивают добычу и поставку руд (сырья) на обогатительные фабрики. Рудник «Октябрьский» и «Таймырский», а также рудники рудоуправления «Талнахское» обеспечивают поставку руды на Талнахскую обогатительную фабрику (ТОФ), а рудники рудоуправления «Норильск - 1» - на Норильскую обогатительную фабрику (НОФ).

Технологический процесс обогатительных фабрик требует осуществления непрерывных поставок руды в необходимом объеме и удаление «пустых» пород, вырабатываемых фабриками при обогащении руды.

В настоящее время на хвостохранилище №1 ведется гидромеханизированный подъем пирротинового концентрата для извлечения меди, а также планируется подъем лежалых хвостов. Отработанная порода из хвостохранилища № 1 поступает также на складирование в хвостохранилище «Лебяжье». Обогащение пирротина осуществляется на месте.

Транспортировка продуктов обогащения на металлургические заводы для переработки и в гидротехнические сооружения для гидравлической укладки осуществляется системой гидротранспорта.

В систему гидротранспорта, осуществляющую гидравлическую укладку в хвостохранилище входят: магистральный пульпопровод, распределительные пульпопроводы первого и второго полей, распределительные выпуски, запорная арматура, пульпонасосные станции ПНС – 1 и ПНС – 2.

Транспортировка минерального сырья в хвостохранилище «Лебяжье» осуществляется системой гидротранспорта ТОФ, НОФ и хвостохранилища № 1 по магистральному пульпопроводу.

Гидромеханизированное складирование хвостов в хвостохранилище «Лебяжье» осуществляется с использованием распределительного пульпопровода.

Складирование осуществляется по участкам – секторам намыва.

Требованиями промышленной и экологической безопасности при эксплуатации хвостохранилища должно обеспечиваться складирование в накопитель всего объема вырабатываемых хвостов.

$$\sum_{i=1}^n a_i = \sum_{j=1}^n b_j \quad (2.1)$$

где a_i – объем хвостов из отдельных источников поступления, b_j – объем хвостов, уложенных (намытых) на отдельные участки – секторы намыва

Уравнение (2.1) можно представить в развернутом виде системы уравнений (2.2) и (2.3)

$$\begin{cases} x_{11} + x_{12} + \dots + x_{1n} = a_1 \\ x_{21} + x_{22} + \dots + x_{2n} = a_2 \\ x_{31} + x_{32} + \dots + x_{mn} = a_m \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\begin{cases} x_{11} + x_{21} + \dots + x_{m1} = b_1 \\ x_{12} + x_{22} + \dots + x_{m2} = b_2 \\ x_{1n} + x_{2n} + \dots + x_{mn} = b_n \end{cases} \quad (2.3)$$

Тогда целевой функцией задачи будет общее время намыва в следующем виде:

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{S_{1i} \cdot h_1}{q} + \sum_{k=1}^n \frac{S_{2k} \cdot h_2}{q} \rightarrow 195 \quad (2.4)$$

где i, k – количество секторов соответственно первого поля и второго поля; S_{1i}, S_{2k} – соответственно площадь i -го сектора I поля и площадь k -го сектора II поля накопителя отходов; h_1, h_2 – соответственно высота намыва на I поле и на II поле; q – дневной объем поступающих на складирование отходов; 195 - продолжительность намыва на пляж хвостохранилища в днях, определяемая из климатических условий региона, т.к. в соответствии с нормативными документами намыв может осуществляться при температуре не ниже -5°C .

Задача состоит в том, чтобы найти такое решение системы уравнений (2.2) и (2.3), при котором целевая функция (2.4) достигает заданного значения.

2.3 Обоснование методики математического моделирования при оптимизации параметров намыва техногенного массива

Одним из основных направлений совершенствования процессов управления является их автоматизация, предусматривающая широкое применение ЭВМ в решении задач управления. Основой автоматизации процессов управления являются математические методы, ставшие базовыми для разработки алгоритмов и программ решения на ЭВМ разнообразных задач, возникающих в сфере управления.

Задачи, с которыми сталкивается современный управленец, достаточно сложные и трудоемкие и их решение, как правило, реализуется на ЭВМ. Поэтому алгоритмы для решения задач удобно применять в строго формальном изложении, позволяющем легко переложить их на машинный язык. А это имеет важнейшее значение при создании автоматизированных систем управления.

Понятие «оптимальное решение» в оптимизационных задачах имеет несколько условный характер, поскольку разработанные к настоящему времени методы их решения дают не подлинно оптимальные варианты в строго математическом смысле, а некоторое приближение к ним. Поэтому эти методы получили название эвристических, при этом понятие «оптимизация» рассматривается как улучшение некоторого варианта решения. Однако, в результате такого улучшения на основе эвристических алгоритмов, получаемые решения, как правило, достаточно близко приближаются к оптимальным, что позволяет использовать их в реальных производственных условиях.

Как отмечалось ранее (Глава I), применяемые в настоящее время технологии переработки продукции минерально-сырьевого комплекса

позволяют использовать 5 – 50 % горной массы, извлекаемой из недр. Соответственно, при таком уровне извлечения полезного сырья, количество минерального сырья, поступающего на складирование в накопители предприятий горнодобывающего комплекса, составляет 50 – 95 %.

Однако вопросам оптимизации схем складирования минерального сырья до сих пор не уделялось должного внимания и нет единого научно обоснованного подхода к решению данной проблемы.

Анализ существующих схем и методов оптимизации показал, что в практическом плане применение сетевого подхода в сочетании с методами корреляционно-регрессионного анализа дает возможность использовать графические методы планирования в сочетании с элементами вероятностных моделей распределения длительностей отдельных этапов работ.

«Методы сетевого анализа и сетевого управления применимы для разработки новых технологий как в традиционных отраслях, для которых типичны лишь пошаговые инновации, так и для новых, быстро развивающихся: сетевое сотрудничество является важным инструментом и при мобилизации ресурсов, и при более эффективном использовании существующих ресурсов» [Хадонов, 2010; Хадонов, Бадоев 2011, 2012].

Поэтому методологический подход решения проблемы, представленной в настоящем разделе будет решаться следующим образом. На первом этапе, для такого класса задач, как формирование технологической схемы процесса намыва хвостохранилища адекватным математическим аппаратом является составление «скелета» сетевого графика.

На втором этапе при определении параметров и установленных количественных показателей для расчета сетевого графика наиболее эффективным становится корреляционно-регрессионный анализ, в том числе аппарат теории планирования эксперимента.

На третьем этапе, на основе полученных количественных показателей процесса намыва выполняется расчет сетевого графика.

Обоснование применения данных подходов будет представлено в последующих разделах.

2.3.1 Основные положения сетевого планирования процессов

Первые сетевые модели были разработаны в США в 1957 - 1958 годах. В 1957 году созданный компаниями «Дюпон» и «Ремингтон Ренд» исследовательский центр разработал новый метод, получивший название «метод критического пути», в основу которого был положен первый в мире сетевой график.

На сегодняшний день сетевые графики получили широкое распространение как в США, так и в других странах. Появился целый ряд новых систем организации, планирования и управления, основанных на сетевых графиках.

В области организации строительного производства сетевые графики стали (и являются) обязательными в составе организационно-технологической документации, в частности, в составе ПОС и ППР.

Создание сетевых моделей стало возможным благодаря развитию одного из направлений прикладной математики – теории графов.

Разновидностью ориентированного графа является сетевая модель.

«Итак, сетевая модель – это ориентированный граф, отображающий совокупность каких-либо процессов и взаимосвязей между этими процессами, выполнение которых необходимо для достижения определенной цели.

Сетевые модели могут использоваться в самых различных областях человеческой деятельности, поэтому процессы, отраженные в сетевой модели, также могут быть самыми разными.

Всякий сетевой график, независимо от его сложности и размеров, состоит из трех элементов: работы, события и пути.

Понятие работа может иметь в сетевом графике одно из следующих трех значений:

1) действительная работа (или просто работа), (под которой понимается некоторый процесс, для выполнения которого требуются время и ресурсы.

2) ожидание - процесс, требующий затрат времени, но не требующий затрат ресурсов. На сетевом графике «ожидание» изображается также как работа - в виде сплошной стрелки.

3) зависимость (или связь), которая не требует для своего выполнения ни времени, ни ресурсов. Она вводится в сетевой график для правильного отображения взаимозависимостей между работами. На сетевом графике зависимость изображается в виде прямой или ломаной пунктирной стрелки. Продолжительность зависимости равна нулю. Зависимость называют также связью (иногда - фиктивной работой).

Событие в сетевом графике - это результат выполнения (факт окончания) одной или нескольких работ, необходимый и достаточный для начала последующих работ. Событие изображается в виде кружочка и нумеруется (i – номер события)» [Хадонов, 2010]. (Рисунок 2.4, 2.5)

Все работы сетевого графика ограничиваются двумя событиями: начальным и конечным.

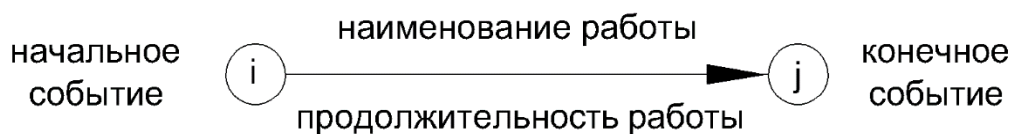


Рисунок 2.4. Отображение событий и работ на сетевом графике.

«Все работы и зависимости в сетевом графике должны быть зашифрованы. Шифр работы состоит из номеров ее начального и конечного событий, записываемых через тире: $i-j$.

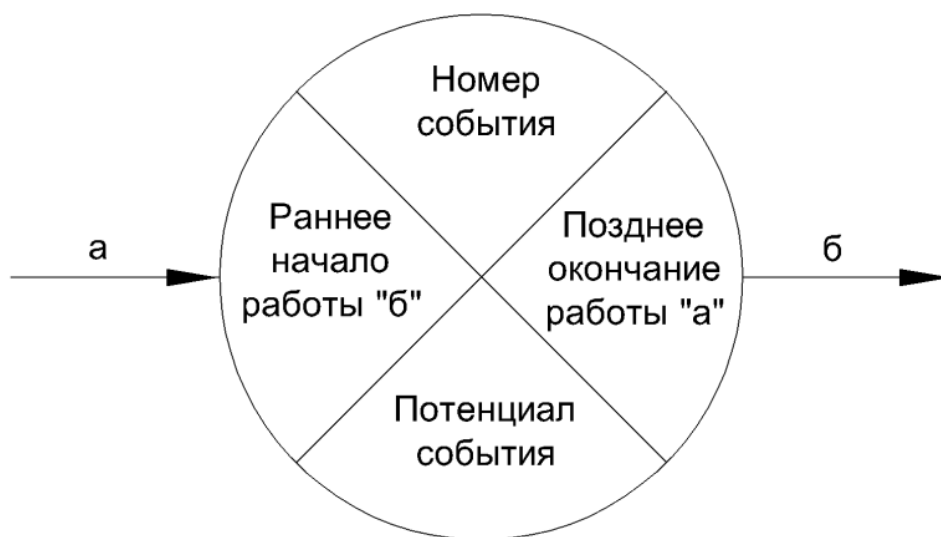


Рисунок 2.5. Событие сетевого графика

Путь в сетевом графике - это любая непрерывная последовательность работ. Различают полный и неполный пути [Хадонов, 2010].

Поскольку работы, из которых состоит путь, имеют продолжительность, то, естественно, сам путь также обладает определенной продолжительностью и равна сумме продолжительностей составляющих его работ.

Полный путь, имеющий наибольшую продолжительность, называют критическим путем. На сетевом графике его обычно выделяют с помощью.

Он определяет общую продолжительность строительства, так как в любом случае строительство не может быть завершено ранее, чем будет выполнена цепочка работ на самом продолжительном, т. е. критическом пути (если даже цепочки работ на всех других путях уже выполнены).

Работы, лежащие на критическом пути, называют критическими работами.

«Знание критического пути и критических работ является одним из главных достоинств сетевого графика как инструмента планирования и оперативного управления строительством. Поскольку продолжительность строительства диктуется критическими работами, то для ее сокращения достаточно уменьшить продолжительность одной или нескольких

критических работ. Кроме того, выявив критический путь, можно сосредоточить больше внимания на своевременном выполнении именно критических работ и тем самым не допустить отклонений хода строительства от установленных сроков» [Ford, Fulkerson, 1956]

Отметим, что в сетевом графике может быть не один, а несколько критических путей.

Путь, продолжительность которого меньше критического, называют некритическим путем. Следовательно, работы, лежащие на этом пути, можно удлинить или завершить позже, т. е. этот путь и лежащие на нем работы обладают определенным резервом времени. Понятие резерва времени наряду с понятием критического пути является одним из важнейших в сетевом графике.

Резерв времени пути равен разности между продолжительностью критического пути и продолжительностью данного пути.

Смысл этого резерва состоит в том, что путь можно как бы растянуть до размеров критического пути. А это дает большие возможности в регулировании выполнения работ на некритических путях, как на стадии планирования, так и оперативного управления.

Работы и события сетевого графика обладают временными параметрами, знание которых необходимо как в процессе планирования, так и в ходе оперативного управления процессом.

Рассмотренные выше параметры сетевого графика определяются в результате его расчёта.

Расчёт ведут в следующей последовательности:

- Сначала последовательно определяют ранние сроки, начиная исходными работами и переходя последовательно от события к событию слева направо и записывая ранние сроки начала работ в левые секторы событий, заканчивая завершающим событием. Затем определяют поздние сроки, начиная завершающими работами и переходя последовательно от события к событию справа налево и

записывая поздние сроки окончания работ в правые секторы событий, заканчивая исходным событием.

- Далее, начиная завершающим событием, определяют потенциалы событий, последовательно переходя от события к событию справа налево и записывая их в нижние секторы событий, заканчивая исходным событием сетевого графика.
- После этого для каждой работы определяют полный и частный резервы времени, которые записывают над стрелкой в виде дроби: в числителе - полный резерв, в знаменателе - частный резерв времени.

2.3.2 Основные положения корреляционно-регрессионного анализа

Наблюдаемые процессы обнаруживают определенные закономерности, которые, однако, невозможно заметить в отдельном случае или же при небольшом числе наблюдений.

«Зависимость одной случайной величины от значений, которые принимает другая случайная величина (физическая характеристика), в статистике называется регрессией. Если этой зависимости придан аналитический вид, то такую форму представления изображают уравнением регрессии.

Первый этап в указанном статистическом анализе касается выявления так называемой корреляции, или корреляционной зависимости. Корреляция рассматривается как признак, указывающий на взаимосвязь ряда числовых последовательностей. Иначе говоря, корреляция характеризует силу взаимосвязи в данных. Если это касается взаимосвязи двух числовых массивов x_i и y_i , то такую корреляцию называют парной.

При поиске корреляционной зависимости обычно выявляется вероятная связь одной измеренной величины x (для какого-то ограниченного диапазона ее изменения, например, от x_1 до x_n) с другой измеренной величиной y (также изменяющейся в каком-то интервале $y_1 \dots y_n$). В таком

случае мы будем иметь дело с двумя числовыми последовательностями, между которыми и надлежит установить наличие статистической (корреляционной) связи. На этом этапе пока не ставится задача определить, является ли одна из этих случайных величин функцией, а другая - аргументом. Отыскание количественной зависимости между ними в форме конкретного аналитического выражения $y = f(x)$ - это задача уже другого анализа, регрессионного.

Корреляционный анализ позволяет сделать вывод о силе взаимосвязи между парами данных x и y , а регрессионный анализ используется для прогнозирования одной переменной (y) на основании другой (x) (Рисунок 2.6). Иными словами, в этом случае пытаются выявить причинно-следственную связь между анализируемыми совокупностями» [Бараз, Пегашкин, 2014].

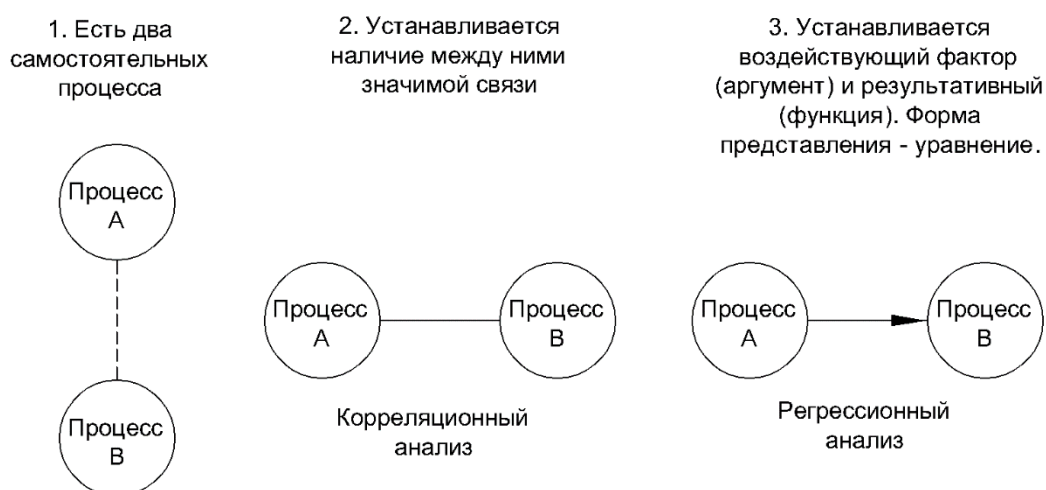


Рисунок 2.6 Связи между данными.

«Строго говоря, принято различать два вида связи между числовыми совокупностями – это может быть функциональная зависимость или же статистическая (случайная). При наличии функциональной связи каждому значению воздействующего фактора (аргумента) соответствует строго определенная величина другого показателя (функции), т.е. изменение результирующего признака всецело обусловлено действием факторного

признака связи показателей коммерческой деятельности с использованием программы Excel» [Бараз, Пегашкин, 2014]

«Коэффициент r - это безразмерная величина, которая может изменяться от 0 до ± 1 . Чем ближе значение коэффициента к единице, тем с большей уверенностью можно утверждать, что между двумя рассматриваемыми совокупностями переменных существует линейная связь» [Бараз, Пегашкин, 2014].

Зная коэффициент корреляции, можно дать качественно-количественную оценку тесноты связи. Используются, например, специальные табличные соотношения (так называемая шкала Чеддока)» [Бараз, Пегашкин, 2014].

Ее представление может иметь следующий вид (Таблица 2.8):

Таблица 2.8 Шкала Чеддока

Величина коэффициента парной корреляции	Характеристика силы связи
До 0,3	Практически отсутствует
0,3-0,5	Слабая
0,5-0,7	Заметная
0,7-0,9	Сильная
0,9-0,99	Очень сильная

Если окажется, что $r_{расч} \geq r_{крит}$, то с заданной степенью вероятности (обычно 95 %) можно утверждать, что между рассматриваемыми числовыми совокупностями существует значимая линейная связь. В случае же обратного соотношения, т.е. при $r_{расч} < r_{крит}$, делается заключение об отсутствии значимой связи» [Бараз, Пегашкин, 2014].

«В практике статистического исследования весьма часто возникает необходимость определить не только корреляционное соотношение между изучаемыми характеристиками, но и установить определенную обусловленность между ними, представив выявленную связь в строгой аналитической форме.

Регрессионный анализ четко распределяет роли между изучаемыми характеристиками - одна из них является аргументом, а вторая функцией. Переменная, которая прогнозируется (функция), обозначается как y , а переменная, которая используется для такого прогнозирования (аргумент или фактор), - это x » [Бараз, Пегашкин, 2014].

«Когда приходится иметь дело с экспериментальными данными, касающимися влияния более чем одного фактора. Прогнозирование единственной переменной y на основании нескольких переменных x_k называется множественной регрессией. В этом случае математическая модель процесса представляется в виде уравнения регрессии с несколькими переменными величинами» [Бараз, Пегашкин, 2014], т.е. $y = f(b_0, \dots, x_k)$.

«Общий вид уравнения множественной регрессии обычно стараются представить в форме линейной зависимости» [Лолаев, Бадоев, 2016]:

$$y = f(x) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_kx_k \quad (2.5)$$

где b_0 - свободный член (или сдвиг); $b_1, b_2, \dots, b_k$ - коэффициенты регрессии, которые подлежат вычислению методом наименьших квадратов.

При проверке значимости модели принято придерживаться следующей последовательности действий:

Сначала выполняется общая проверка полученного уравнения на пригодность.

Если результат оказался положительным (уравнение значимо), то проверяют на значимость уже каждый коэффициент уравнения регрессии b_i .

Дается сравнительная оценка степени влияния каждого из анализируемых факторов x_k .

«Статистическую оценку полученного уравнения (так называемый статистический вывод) принято начинать с проведения F-теста, целью которого является выяснение способности исследуемых факторов x_k объяснять значимую часть колебания функции y » [Бараз, Пегашкин, 2014].

«Для количественной проверки гипотезы об адекватности можно использовать так называемый F-критерий (критерий Фишера)» [Лолаев, Бадоев и др., 2016, 2017]:

$$F = \frac{S_{ад}^2}{S_{общ}^2} \quad (2.6)$$

«Здесь $S_{ад}^2$ - остаточная дисперсия или дисперсия адекватности. Она характеризует величину среднего разброса экспериментальных точек Δy относительно линии регрессии, т.е. $\Delta y = y_i - \hat{y}_i$ (Δy есть ошибка в прогнозировании экспериментального результата на основании математической модели).

Остаточная дисперсия, таким образом, позволяет оценить ошибку, с которой уравнение регрессии предсказывает фактический результат. Следовательно, минимальная величина остаточной дисперсии должна свидетельствовать о более удачном выборе линии регрессии.

Проверка адекватности модели по критерию Фишера дает возможность ответить на вопрос, во сколько раз модель предсказывает результат хуже по сравнению с опытом. Остаточная дисперсия $S_{ад}^2$ рассчитывается путем деления остаточной суммы квадратов на число степеней свободы f по следующей формуле» [Бараз, Пегашкин, 2014]:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \left(y_i - \hat{y}_i \right)^2}{f} \quad (2.7)$$

Здесь $f = n - (k + 1)$, где n – число опытов в эксперименте (т.е. может составлять объем случайной выборки); k – число изучаемых факторов.

«Вторая характеристика в формуле для расчета F-критерия (знаменатель) это так называемая усредненная или общая дисперсия. В качестве таковой принимается квадрат стандартной ошибки $S_{общ}$. Этот показатель фактически характеризует случайную ошибку для всей выборки, т.е. оценивает несоответствие между конкретными (текущими) значениями

результата эксперимента и средним арифметическим» [Бараз, Пегашкин, 2014]. Общая дисперсия рассчитывается как

$$S_{\text{общ}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{f_2} \quad (2.8)$$

Где $f_2 = k$, где k – число изучаемых факторов.

«Использование так называемой нулевой гипотезы для F-теста означает, что между переменными x_k и y значимая связь отсутствует. Следовательно, признается, что параметр y является чисто случайной величиной, поэтому значения переменных x_k не оказывают на него никакого систематического влияния. Применительно к уравнению регрессии, это утверждение можно трактовать как случай, когда все коэффициенты уравнения равны нулю.

С другой стороны, альтернативная гипотеза F-теста говорит о том, что между параметром y и переменными x_k существует определенная прогнозирующая взаимосвязь. Следовательно, параметр y уже не является чисто случайной величиной и должен зависеть хотя бы от одной из переменных x_k .

Тем самым альтернативная гипотеза настаивает на том, что, по крайней мере, один из коэффициентов регрессии отличен от нуля. Как видно, здесь принимается во внимание следующее обстоятельство: совершенно необязательно, чтобы каждая x -переменная влияла на параметр y , вполне достаточно, чтобы влияла хотя бы одна из них.

Для выполнения F-теста будут использоваться результаты компьютерного расчета, который выполнялся в Excel» [Бараз, Пегашкин, 2014; Лолаев, Бадоев и др., 2016; Lolaev, Badoev et al, ...Brazil, 2016].

Решение принимается на основе критерия Фишера.

Это способ, которым часто пользуются при статистических анализах, хотя существуют и другие методы.

«Обычно F-тест проводится путем сопоставления вычисленного значения F-критерия с эталонным (табличным) показателем $F_{\text{табл}}$ для соответствующего уровня значимости. Если выполняется неравенство $F_{\text{расч}} \leq F_{\text{табл}}$, то с уверенностью, например на 95 %, можно утверждать, что рассматриваемая зависимость $y = f(x) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k$ является статистически значимой. В противном случае наоборот» [Лолаев, Бадоев и др. 2016, 2017].

«Чтобы определить, велика или мала ошибка в предсказании эмпирических результатов, ее нужно сопоставить с некоторой *статистической величиной* (эталон), принимаемой в качестве *критической*. Вот почему используется расчетный *F-критерий*, который затем сравнивают с $F_{\text{крит}}$.

Если $F_{\text{расч}} \leq F_{\text{крит}}$, то модель принимается *адекватной*, т.е. с заданной степенью достоверности (надежности) она верно предсказывает реальный результат. Если же $F_{\text{расч}} > F_{\text{крит}}$, то вывод обратный – данное уравнение не может с заданной надежностью прогнозировать эмпирические данные. Проверка адекватности модели по критерию Фишера дает возможность ответить на вопрос, *во сколько раз модель предсказывает результат хуже по сравнению с опытом*.

В литературе по статистике обычно используются два подхода к оценке $F_{\text{расч}}$: либо как отношение $S_{\text{ад}}/S_{\text{общ}}$, либо как $S_{\text{общ}}/S_{\text{ад}}$. Соответственно и статистический вывод на основании сравнения вычисленного F-критерия и эталонного $F_{\text{крит}}$ дается с учетом принятого соотношения. Важно только помнить, какой прием для анализа используется и, следовательно, каким образом дается надлежащее заключение» [Бараз, Пегашкин, 2014]

В данном случае будет рассматриваться версия, когда $F_{\text{расч}} = S_{\text{общ}}/S_{\text{ад}}$, поскольку расчет ведется в программе Microsoft Excel и в ней используется именно это соотношение.

Выводы по главе 2

1. Установлены закономерности формирования физико-механических свойств техногенных грунтов - хвостов, основные виды микроструктур и типы контактов между структурными элементами, составлена их классификация.

2. Осуществлена постановка задачи определения параметров возведения намывного массива хвостохранилища «Лебяжье» ПАО ЗФ «ГМК «Норильский никель».

3. Обосновано применение подхода и разработана методика математического моделирования к решению задач оптимизации параметров намыва техногенного массива.

ГЛАВА 3 ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ НАМЫВА ОГРАЖДАЮЩЕЙ ДАМБЫ ХВОСТОХРАНИЛИЩА

3.1 Общие положения моделирования

Научный анализ в геокриологических исследованиях все больше опирается на физико-математическое моделирование, когда результаты физического моделирования физико-механических процессов сочетаются с результатами математического моделирования процессов. Под физической моделью понимается наше субъективное представление о процессе (объекте), основанные на фактах, полученных в эксперименте и выраженные в однозначных, четких формулировках, охарактеризованных такими параметрами, которые могут быть получены в опыте. Физическое моделирование - это метод исследования на моделях, которые имеют одинаковую физическую природу с объектом моделирования, т.е. представляют собой некоторый макет изучаемого объекта [Ершов, Гарагуля 1987].

Физическая модель должна быть научно обоснована, и в тоже время, представлять собой рациональное описание объекта:

- его строения, состава, состояния, свойств и протекающих в нем процессов;
- факторов воздействующих на объект;
- условий, определяющих воздействие факторов.

При физическом моделировании, как известно важную роль играет теория подобия. Ее основное положение: адекватность модели и объекта обеспечивается лишь при соответствии всех однотипных определяющих критериев подобия в сходных точках модели и объекта. Оценкой правомерности той или иной схематизации является подтверждение

результатов, полученных на модели, данными натурных наблюдений на объекте исследований.

3.1.1 Принципы и критерии физико-математического моделирования намыва ограждающей дамбы

В математической, знаковой модели течение пульпы при намыве ограждающей дамбы представляется в виде схем, графиков, формул. Все выкладки содержат некоторую схематизацию происходящих явлений, что приводит к соответствующей неопределенности или неточности результатов. Оценкой правомерности той или иной схематизации является подтверждение результатов, полученных на модели, данными натурных наблюдений на объекте исследований.

Устройство, на котором представлено явление того же рода, что и явление, характеристики которого требуется предсказать, называется физической, предметной моделью. Преимущественными областями использования физических моделей являются локальные пространственные задачи и задачи, относящиеся к относительно слабо изученным физическим явлениям.

В пределах изучаемого объекта можно выделить области, для исследования которых целесообразно применить разные способы моделирования. Такие сочетания принято называть **«гибридным моделированием»**.

Объектом моделирования являлась технология намыва хвостохранилища «Лебяжье» ОАО ЗФ ГМК «Норильский никель».

Анализ технологии намыва ограждающей дамбы показал, что в период до 2004 г., намыв проводился по самотечной системе гидротранспорта [Лолаев, Бутюгин, 2005].

При этой технологии намыв ограждающей дамбы производился с разгрузкой крупных хвостов на начальных пикетах дамбы и подачей шламов на конечные пикеты дамбы. При проведении натурных наблюдений на пляже

хвостохранилища особое внимание обращало на себя неоднородность складирования хвостов. По мере приближения к концевому выпуску, пляж выполаживался. На ближних пикетах его уклон достигал 10° - 12° , а в северной, наиболее удаленной части дамбы не превышал 1° - 2° . При движении пульпы по распределительному пульпопроводу происходило разделение хвостов по крупности по сечению трубы. В верхней трети сечения потока двигались пылеватые частицы ($d_{cp} \sim 0,04$ мм), в центральной части потока d_{cp} увеличивался до 0,07-0,1 мм, в нижней части $> 0,1$ («Разработка технологии опережающего...»). На первых выпусках отбирались более крупные хвосты, а на последних мелкие, при этом не происходило заиливания трубы даже при нулевых уклонах. Из крупных хвостов, по сути своей являющихся мелкозернистыми песками, дамба намывалась быстро, а мелкие хвосты – пески пылевато-глинистые и супеси, в силу низкой водоотдачи удерживают в себе большой объем воды и обладают малым углом естественного откоса. Поэтому на этих участках наращивание дамбы происходило медленнее («Разработка технологии опережающего...»).

В результате к концу 2002 года хвостохранилище имело вид наклонной усеченной пирамиды с разностью отметок в противоположных точках намыва от юго-запада на северо-восток равной 9 м [Лолаев, Бутюгин, 2005].

Ввод в эксплуатацию в 2004 году ПНС-3 и переход работы распределительных пульповодов на напорный режим обеспечил равномерную подачу хвостов по всему фронту намыва. По исполнительной съемке, выполненной ГС УНСОФ в октябре 2007 года, разность отметок в противоположных точках намыва уменьшилась до 3.3 м.

Эта особенность стала основополагающей при разработке принципа построения физико-математической или, более правильно, гибридной модели процесса намыва ограждающей дамбы хвостохранилища «Лебяжье».

Основным принципиальным положением при теоретическом обосновании данной модели стало: **«в первом выпуске наиболее крупной фракции хвостов содержится столько же, сколько и в последующих»**.

В общем виде, это положение будет выглядеть так:

«На i -том выпуске i -той фракции содержится столько же, сколько и на остальных».

Аналитически подобное утверждение описывается функцией [Шкода, 2000]:

$$y(x, i) = -|x - i| + n \quad (3.1)$$

где $y(x, i)$ – функция распределения i -той фракции по выпускам,

n – число выпусков, $x \in [1, n]$ – текущий выпуск.

После нормирования функции $y(x, i)$:

$$g(x, i) = \frac{y(x, i)}{\sum_{x=1}^n y(x, i)} \quad (3.2)$$

получим процентное распределение i -той фракции по выпускам, т.к.

$$\sum_{x=1}^n g(x, i) = 1. \quad (3.3)$$

Необходимо отметить, что приведенная функция в таком виде справедлива только для напорного гидротранспорта, так как предполагает равные расходы из всех выпусков [Шкода, 2000].

Окончательно задача формулируется так: по известной кривой гранулометрического состава хвостов и, предположительно, известной зависимости расхода пульпы через выпуск определить объем хвостов, поступающий на пляж на каждом из выпусков и установить закономерности намыва пляжа.

Решение подобной задачи значительно упростится, если максимально использовать конкретные данные наблюдений на исследуемом объекте. Такой подход обязательно предполагает построение физической модели, с заложением в нее свойств и особенностей, присущих только этому объекту.

При моделировании ставилась задача обоснования адекватности разработанной методики определения технологических параметров процесса намыва.

3.2 Обоснование физической модели для изучения параметров намыва

Условием подобия модели и натуры принято равенство чисел Фурье натуры (n – параметры объекта) и модели (m – параметры модели):

$$Fn = Fm \quad (3.4)$$

Согласно [Розовский, 1969] соотношения геометрических размеров и объёмов натуры и модели находятся в зависимостях:

$$Lm / Ln = Bm / Bn = Hm / Hn \quad (3.5)$$

А временные соотношения натуры и модели находятся в соотношениях:

$$\tau_m / \tau_n = (L_m / L_n)^2; \quad (3.6)$$

а объёмы складированных отходов:

$$V_m / V_n = (L_m / L_n)^3; \quad (3.7)$$

где L, B, H – геометрические размеры; V – объём; τ – время; индексы m и n – обозначения модели и системы прототипа.

При известном расходе пульпы в натуральных условиях (Q_n^H) и равенстве критериев Фруда (Fr) на модели и в натуре, расход на модели должен составлять (Чугаев, 1982):

$$Q_m^M = Q_n^H \cdot \left(\frac{1}{100} \right)^{\frac{5}{2}} = 1,0 \cdot 10^{-5} \cdot Q_n^H, \quad (3.8)$$

При моделировании процесса зимнего намыва количество тепла Q , поступающего на единицу поверхности F модели за период времени τ_m , определяют по уравнению Фурье:

$$\frac{dQ}{dT} = \lambda \cdot F \frac{dT}{dL} \quad (3.9)$$

где: λ – коэффициент теплопроводности, T – текущая температура деятельного слоя.

3.3 Оценка адекватности модели намыва

Из натурных наблюдений известно [Лолаев, Акопов и др., 2011], что намыв при фронте 900 м до уровня отложений в пляжной зоне 0,5 м ведется в

среднем около 14 дней. Тогда время на модели, исходя из формулы (3.10), составит:

$$\tau_m / \tau_n = (L_m / L_n)^2 = \tau_m / 14 * 24 * 3600 = (1 / 100)^2 \quad (3.10)$$

отсюда $\tau_m = 14 * 24 * 3600 / 100^2 = 120,96$ сек;

Намыв моделируется на фронт в 3 выпуска (75 метров в натуре). При такой ширине фронта намыва хвосты в натуре займут объем равный:

$$V_n = l * b * h = 100 * 75 * 0,5 = 3750 \text{ м}^3 \quad (3.11)$$

где l – длина пляжа; b - ширина пляжа; h – высота намываемого слоя.

Тогда, исходя из масштабного коэффициента и формулы (3.7) получаем:

$$V_m / V_n = (L_m / L_n)^3 = V_m / 3750 = (1 / 100)^3 \quad (3.12)$$

отсюда $V_m = 3750 / 100^3 = 0,00375 \text{ м}^3$;

Согласно [«Проверочный расчет ограждающей дамбы хвостохранилища «Лебяжье», 2008 «Механобр Инжиниринг», 2008], табл. 4.1 плотность супеси составляет $1,65 \text{ т/м}^3$.

Тогда вес эквивалентного материала, принимаемого для моделирования должен составить:

$$m = V * \rho = 0,00375 * 1,65 = 0,0061875 \text{ т} = 6,188 \text{ кг} \quad (3.13)$$

Согласно [«Проект зимнего намыва хвостохранилища «Лебяжье» на 2008 – 2010 гг., 2008], таблица 2, отношение твердой фазы к жидкой составляет: $1 / 3,08$ в 2009 году.

Тогда требуемое для опыта количество воды должно составить:

$$T / Ж = 1 / 3,08 \quad (3.14)$$

Следовательно, при количестве твердой фазы $6,075 \text{ кг}$ количество жидкой фазы составит:

$$6,075 * 3,08 = 18,711 \text{ кг} = 19,06 \text{ л.} \quad (3.15)$$

Исходя из этих расчетов, моделирование намыва в $0,5$ метра на натуре на модели должно соответствовать 121 секунде, причем за это время из трех выпусков должно было пройти $19,06$ литра воды и $6,188 \text{ кг}$ хвостов.

3.4 Описание лабораторной установки

В ходе лабораторных экспериментов моделируется процесс технологии опережающего намыва [Лолаев, Акопов и др, 2011], применяемый в настоящее время на хвостохранилище «Лебяжье» (рисунок 3.1).

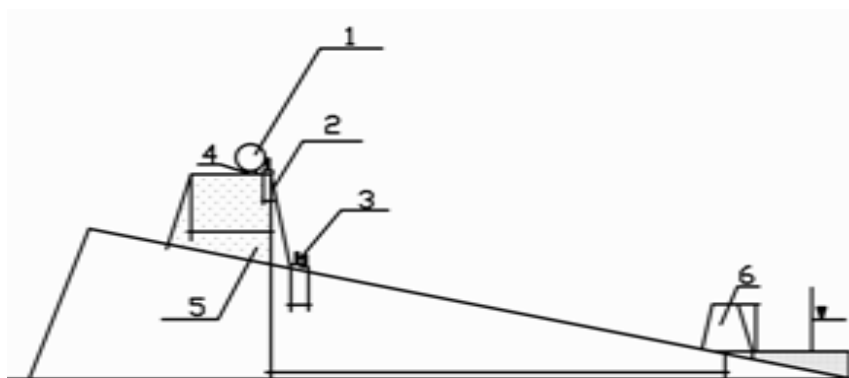


Рисунок 3.1 - Технология опережающего поярусного намыва

1 - распределительный пульпопровод; 2 - протифльтрационный экран; 3 - пригруз фильтрационного экрана; 4 - опорная часть распределительного пульпопровода; 5 - первичная дамба обвалования; 6 - дамба вторичного обвалования.

Для исследований процесса намыва дамбы была изготовлена лабораторная установка ЛАОС-1У, состоящая из: лотка из органического стекла, с возможностью изменения уклона; пульпораспределительного зумпфа (распределительный пульпопровод), распределительных выпусков ($\varnothing$ 25 мм), через которые осуществляется намыв. Конструкция стенда приведена на рисунке 3.2.

В пульпораспределительном зумпфе (9) пульпа создается путем механического смешивания хвостов и воды до заданной консистенции. Для моделирования турбулентности потока пульпы в зумпфе производится постоянное ее перемешивание. Управление объемами пульпы при намыве, на осуществляется шаровыми кранами (запорный - 10 и регулировочный -12), которые установлены на каждом из выпусков. С помощью регулировочного крана (12) изменяется расход, а запорный кран предназначен для остановки подачи пульпы в выпуск.

Исходя из критериев подобия, был разработана и изготовлена лабораторная установка (рисунок 3.2).

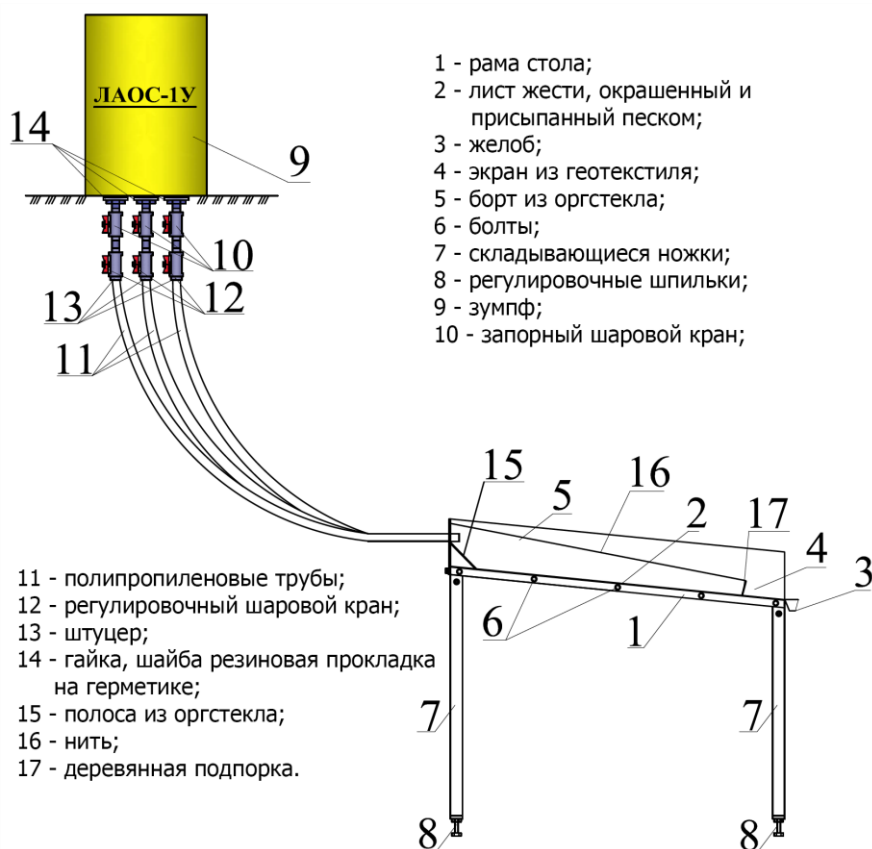


Рисунок 3.2 - Лабораторная установка для моделирования намыва ограждающей дамбы хвостохранилища.

Регулировочный кран через штуцер (13) соединен с распределительными выпусками (гибкими полипропиленовыми трубками, (11), по которым пульпа поступает на стенд. Дренажная призма выполнена из нетканого геотекстиля (4), который нитью (16) крепится к стенке стенда. Для придания экрану необходимого наклона устанавливаются деревянные подпорки (17).

Модель участка намыва изготовлена в масштабе 1:100. Рельеф пляжной зоны хвостохранилища выполнен из тонкой жести (2), окрашенного толстым слоем краски и покрытого слоем хвостов для придания поверхности пляжа неровностей, аналогичных натуре. В качестве дренажной призмы использовался экран из нетканого геотекстиля, который устанавливается на расстоянии 100 см от выпусков. Уклон пляжа при проведении эксперимента

составлял $1/50$, что соответствует уклонам действующих накопителей отходов.

Модель намывалась на основании разреза по хвостохранилищу: ширина пляжной зоны составляла 100 м в натуре (1 м на модели), расстояние между пульповыпусками 25 м в натуре, (0,25 м на модели) и т. д.



Рисунок 3.3 – Проведение намыва



Рисунок 3.4 – Общий вид поля

Для имитации годового цикла намыва хвостохранилища намыв модели производился послойно (рисунок 3.3, 3.4) (мощность намываемых слоев от 15 до 20 мм.), с временными интервалами между намывами последующих слоев 35-40 мин.

В соответствии с критериями в экспериментах задавалась продолжительность намыва и объем хвостов.

Возможности установки позволяют проводить моделирование процесса возведения ограждающих конструкций намывных гидротехнических сооружений при различных геокриологических условиях, геометрических параметрах сооружения, режимах намыва для разработки и обоснования программы проведения натурных экспериментов, что позволяет существенно снизить материальные затраты, трудоемкость и машиноемкость их проведения.

3.5 Оборудование и методика определения параметров консолидации намываемых хвостов

«Исходя из условий эксплуатации намывных накопителей в криолитозоне, следует учитывать, что увеличение мощности годового намывного слоя может не обеспечить завершение процесса его консолидации до начала промерзания в зимний период, и тем самым будет способствовать снижению устойчивости сооружения» [«Правила безопасности гидротехнических сооружений ...»].

Исходя из этого, целью настоящей работы является разработка методики расчета времени консолидации хвостов, являющейся важнейшим фактором оптимизации технологических параметров намыва хвостохранилища в условиях криолитозоны.

Как известно с учетом характера процессов, вызывающих уплотнение водонасыщенных грунтов в различные периоды времени, процесс консолидации условно разграничивают на две фазы; первичную или фильтрационную и вторичную, обусловленную ползучестью скелета грунта.

Время завершения этапа фильтрационной консолидации устанавливается по консолидационным кривым, построенным в координатах перемещение (s) – логарифм времени ($\lg t$), или экспериментально по моменту полного рассеивания порового давления. В зависимости от плотности, влажности, особенностей структуры грунтов и величины, действующей на них нагрузки соотношение фильтрационных и реологических явлений в процессе консолидации грунтов различно [ПНИИИС Госстроя СССР Рекомендации по определению параметров ползучести и консолидации грунтов ...1989 г.; Цытович, Тер-Мартirosян, 1981 г.].

На первом этапе испытаний были сформированы 15 серий образцов при диапазоне влажности от 4 до 32 % и соответствующей плотности [Лолаев, Бадоев, 2016, 2017].

Физико-механические свойства испытанных образцов представлены в таблице 3.1.

Следует отметить, что по результатам определения влажности хвостов на границе текучести равной 32,4% и влажности на границе раскатывания – 27,2% (индекс пластичности $I_p=5,2$) было установлено, что по своим свойствам они наиболее близки к супесям (таблица 3.1).

Таблица 3.1 Свойства хвостов с заданной влажностью и плотностью

Тип	№ опыта	Влажность W, %	Плотность ρ , г/см ³	Плотность частиц грунта ρ_s , г/см ³	Коэффициент пористости e	Пластичность			Тип грунта по числу пластичности	Показатель текучести I_L	Разновидность по показателю текучести
						Предел текучести	Предел раскатывания	Число пластичности			
Хвосты "Лебяжье"	1	4	1,05	2,63	1,60	32,4	27,2	5,2	Супесь	-4,46	Твердый
	2	6	1,01	2,63	1,76	32,4	27,2	5,2	Супесь	-4,08	Твердый
	3	8	1,09	2,63	1,61	32,4	27,2	5,2	Супесь	-3,69	Твердый
	4	10	1,12	2,63	1,58	32,4	27,2	5,2	Супесь	-3,31	Твердый
	5	12	1,16	2,63	1,54	32,4	27,2	5,2	Супесь	-2,92	Твердый
	6	14	1,18	2,63	1,54	32,4	27,2	5,2	Супесь	-2,54	Твердый
	7	16	1,12	2,63	1,72	32,4	27,2	5,2	Супесь	-2,15	Твердый
	8	18	1,15	2,63	1,70	32,4	27,2	5,2	Супесь	-1,77	Твердый
	9	20	1,34	2,63	1,36	32,4	27,2	5,2	Супесь	-1,38	Твердый
	10	22	1,3	2,63	1,47	32,4	27,2	5,2	Супесь	-1,00	Твердый
	11	24	1,44	2,63	1,26	32,4	27,2	5,2	Супесь	-0,62	Твердый
	12	26	1,51	2,63	1,19	32,4	27,2	5,2	Супесь	-0,23	Твердый
	13	28	1,94	2,63	0,74	32,4	27,2	5,2	Супесь	0,15	Пластичный
	14	30	1,87	2,63	0,83	32,4	27,2	5,2	Супесь	0,54	Пластичный
	15	32	1,87	2,63	0,86	32,4	27,2	5,2	Супесь	0,92	Пластичный

Метод определения критического значения влажности намытого слоя формируемого техногенного месторождения заключается в моделировании процесса консолидации в реальности и получении оптимальной влажности, при которой произошла консолидация и еще не начался процесс пыления или выветривания основного слоя.

Для этого был рассмотрен способ - метод стандартного уплотнения, который заключается в установлении зависимости плотности сухого грунта от его влажности при уплотнении образцов грунта и последовательным увеличением его влажности [ГОСТ 22733-2016] на стандартном приборе уплотнения грунтов (Рисунок 3.5)

Число последовательных испытаний грунта при увеличении его влажности равнялось шести. Этого количества испытаний достаточно для выявления максимального значения плотности (Таблица 3.2).

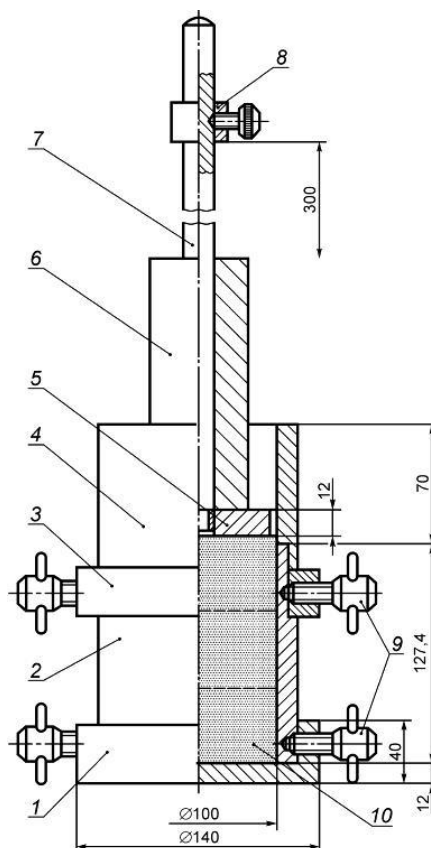


Рисунок 3.5 Принципиальная схема прибора СОЮЗДОРНИИ для стандартного уплотнения грунтов

1 - поддон; 2 - разъемная форма; 3 - зажимное кольцо; 4 - насадка; 5 - наковальня; 6 - груз массой 2,5 кг; 7 - направляющая штанга; 8 - ограничительное кольцо; 9 - зажимные винты; 10 - образец грунта

Метод предполагает, что в образце грунта при последовательном увеличении его влажности будет происходить переукладка частиц, а, следовательно, значения плотности после каждого испытания не будут иметь линейный характер и при нескольких параллельных испытаниях значения плотности при одной и той же влажности будут различны.

Таблица 3.2 Значения после 6-ти испытаний в приборе стандартного уплотнения.

№ испытания	Влажность, %																
	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
1	1,58	1,69	1,71	1,75	1,77	1,81	1,81	1,86	1,98	1,99	2,00	1,99	1,96	1,94	1,94	1,93	1,90
2	1,58	1,68	1,73	1,74	1,76	1,80	1,83	1,88	1,97	1,98	2,00	1,99	1,98	1,95	1,96	1,91	1,91
3	1,57	1,69	1,74	1,76	1,80	1,79	1,82	1,85	1,96	1,97	1,99	1,98	1,96	1,96	1,96	1,92	1,93
4	1,58	1,72	1,70	1,73	1,79	1,83	1,85	1,88	1,95	1,97	2,00	1,99	1,96	1,96	1,92	1,93	1,90
5	1,58	1,65	1,69	1,76	1,77	1,82	1,85	1,83	1,98	1,99	2,00	2,00	1,93	1,93	1,91	1,90	1,88
6	1,59	1,68	1,70	1,74	1,79	1,83	1,82	1,88	1,94	1,94	1,99	2,01	1,96	1,95	1,91	1,92	1,91
CP	1,58	1,69	1,71	1,75	1,78	1,81	1,83	1,86	1,96	1,97	2,00	1,99	1,96	1,95	1,93	1,92	1,90

Результаты испытаний представлены в виде графика (рисунок 3.6)

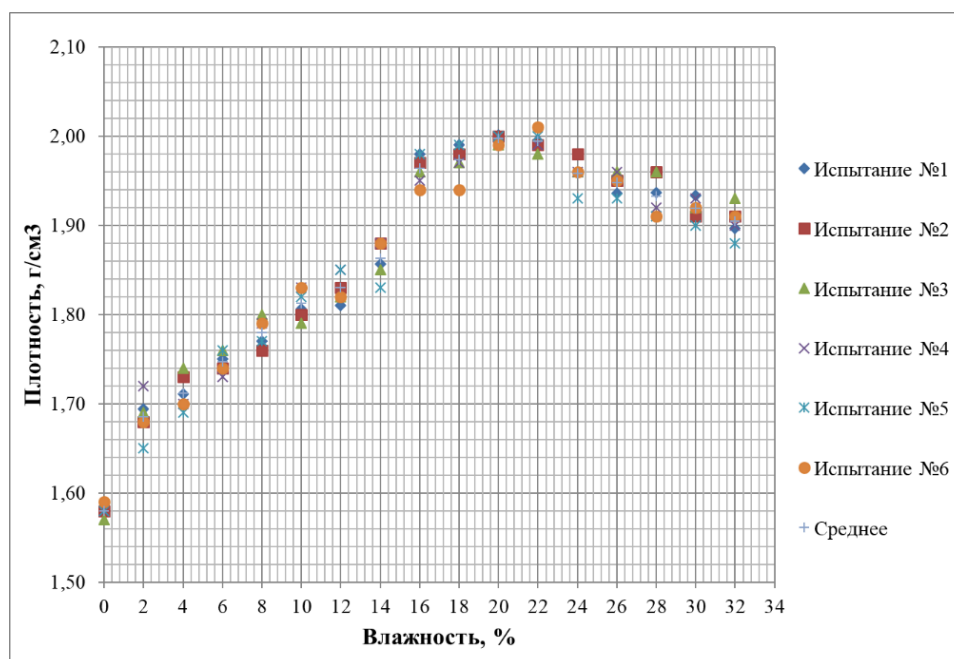


Рисунок 3.6 Значения максимальной плотности хвостов при параллельных испытаниях.

Значение оптимальной влажности здесь соответствует $w=20\%$, а максимальной плотности $\rho=2 \text{ г/см}^3$.

Однако в реальных процесс консолидации происходит иначе и следует учитывать, что во время намыва очередного слоя, вся лишняя вода проходит вниз и стекает в прудок и необходимо выявить момент, когда можно будет намывать верхний слой и не пропустить начало пыления.

Второй способ представляет собой моделирование процесса заполнения водой пор без нарушения структуры твердой фракции. Максимальная плотность твердой фракции в сухом состоянии практически не различается при переходе от одного параллельного испытания к другому. Это значение равно $\rho_0=1,58 \text{ г/см}^3$.

Поскольку вся вода стекает в прудок, то моделируется поведение слоя с сухого состояния, то есть не с уменьшения, а с увеличения влажности.

Испытания проводились на приборе для моделирования заполнения пор водой (Рисунок 3.7)

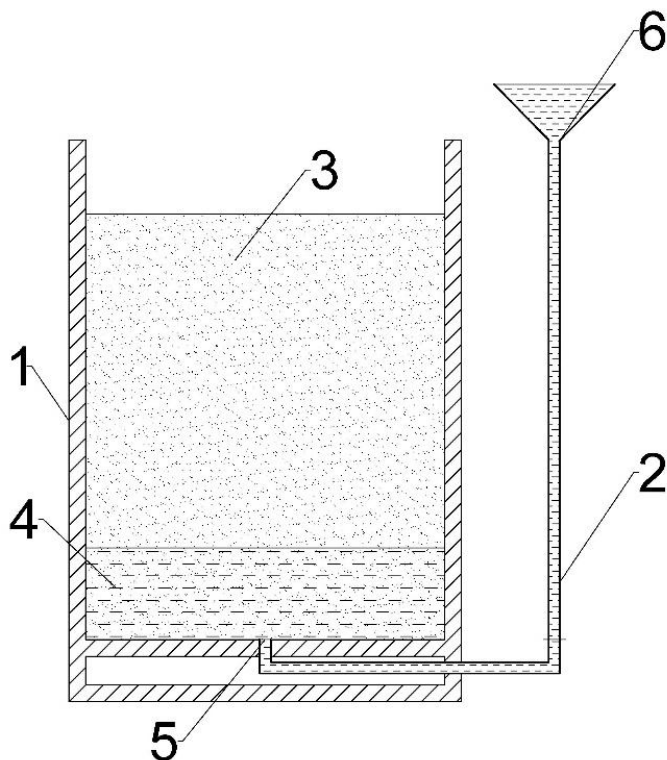


Рисунок 3.7 Прибор для моделирования заполнения пор водой:

1 – сосуд, 2 – стеклянная трубка с делениями, 3 – уплотненная твердая фракция до максимальной плотности в сухом состоянии, 4 – вода, 5 – бумажный фильтр, 6 – воронка.

При последовательном увеличении влажности w снизу-вверх происходит заполнение пор водой и, соответственно, увеличивается плотность (Таблица 3.3). Во время заполнения пор водой положение верхней границы хвостов в приборе не меняется. И при достижении значения $w=20\%$ на поверхности появляется вода, а твердая фракция в этот момент имеет максимальную плотность $\rho=1,99 \text{ г/см}^3$ так как все поры заполнены водой.

Таблица 3.3 Полученные значения плотности при моделировании (среднее по 6 испытаниям).

Вода, %	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32
Плотность ρ , г/см ³	1,58	1,61	1,65	1,68	1,72	1,76	1,80	1,84	1,89	1,94	1,99	1,94	1,89	1,85	1,81	1,77	1,73

При дальнейшем увеличении количества воды происходит уменьшение плотности за счет увеличения объема (Рисунок 3.8).

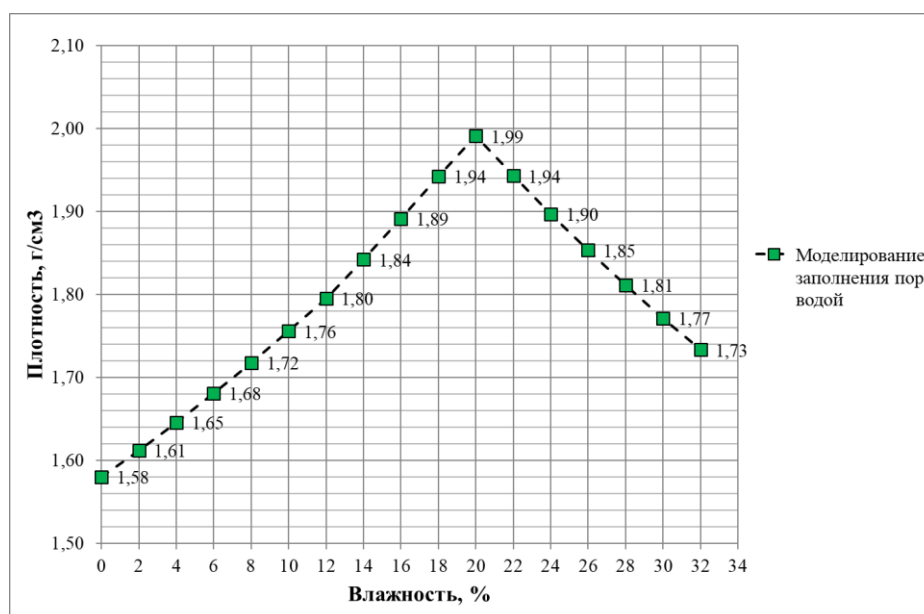


Рисунок 3.8 Моделирование процесса заполнения водой пор.

Прибором стандартного уплотнения грунтов такой реальный процесс невозможно смоделировать.

Третий способ (расчетный) предполагает, что твердая фракция имеет максимальную плотность в сухом состоянии $\rho_0=1,58 \text{ г/см}^3$. Истинная плотность по результатам лабораторных испытаний составляет $\rho_s=2,63 \text{ г/см}^3$.

Находим пористость по формуле:

$$n = 1 - \frac{\rho_0}{\rho_s} \quad (3.16)$$

Отсюда,

$$n = 1 - \frac{1,58}{2,63} = 0,399$$

Поры будет занимать воздух и вода.

Далее находим максимальную плотность, то есть состояние, при котором все поры будут заполнены водой:

$$\rho_{\max} = \rho_0 + n \cdot \rho_{\text{в}} \quad (3.17)$$

Где $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды равная 1 г/см^3

Отсюда,

$$\rho_{\max} = 1,58 + 0,399 \cdot 1 = 1,98 \text{ г/см}^3$$

Определяем оптимальную влажность при максимальной плотности:

$$w_{\text{opt}} = \frac{n \cdot \rho_{\text{в}}}{\rho_{\max}} \cdot 100\% \quad (3.18)$$

Отсюда,

$$w_{\text{opt}} = \frac{0,399 \cdot 1}{1,98} \cdot 100\% = 20,2\%$$

Экспериментальные, теоретические и практические данные показывают, что намыв заканчивается при достижении твердой фракцией оптимальной влажности 20% для хвостов с хвостохранилища «Лебяжье» (рисунок 3.9), после которой можно производить намыв следующего слоя, так как это состояние соответствует наиболее плотной укладке частиц примерно одного

размера, когда еще все поры заполнены жидкостью - они укладываются под действием собственного веса наиболее плотно.

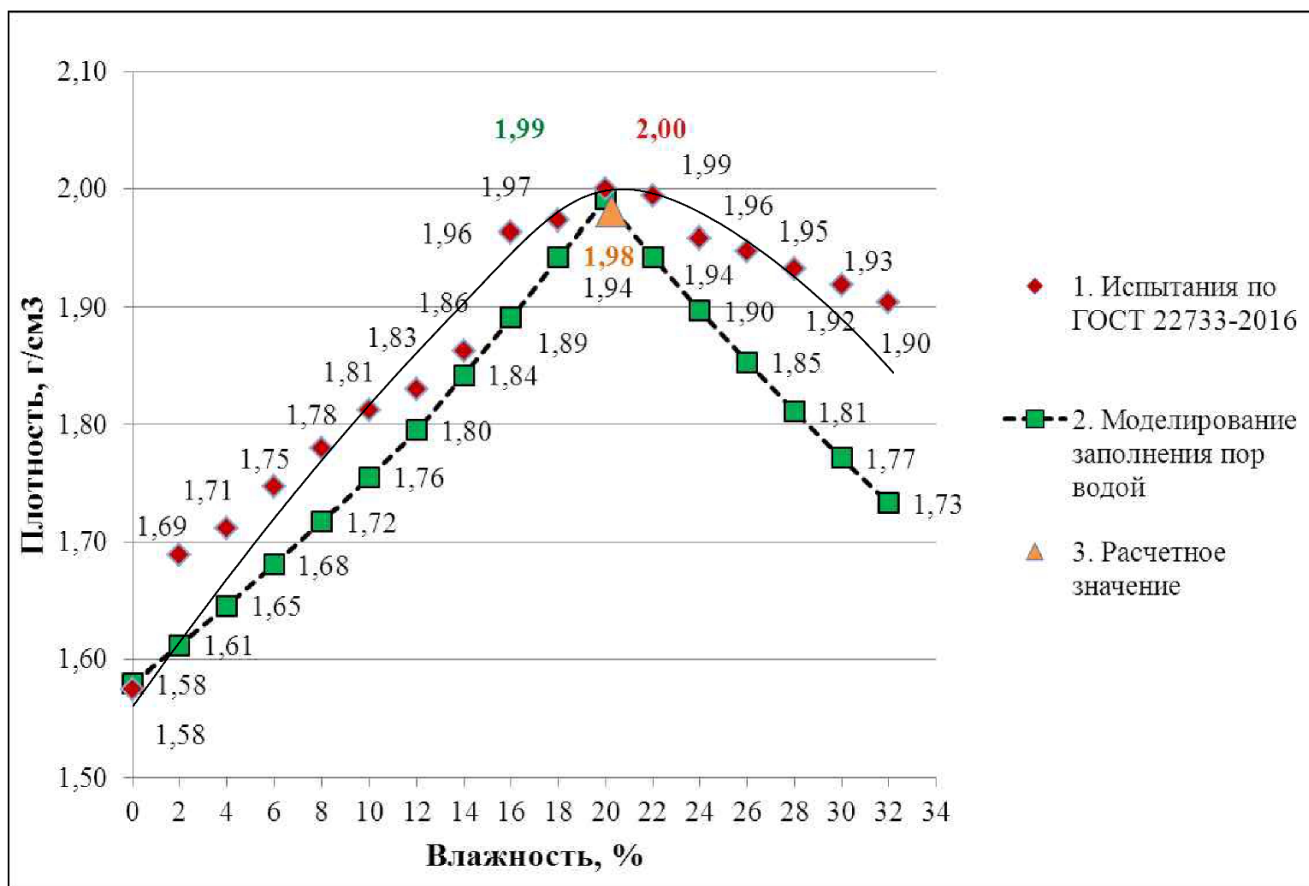


Рисунок 3.9 Результаты определения критической влажности хвостов тремя способами.

Далее были проведены компрессионные испытания с целью установления консолидационных характеристик хвостов [ГОСТ 12248-2010]

Вертикальное давление, возникающее в грунтовом массиве от собственного веса грунта, называется природным. Это давление характеризует напряженное состояние грунта до передачи на него нагрузки. Величина природного давления зависит от плотности ρ грунта и глубины h рассматриваемой горизонтальной плоскости.

Для того чтобы рассчитать величину прикладываемой нагрузки для обеспечения консолидации хвостов под собственным весом, был взят участок 1×1 м и высотой $h=0,5$ м (высота намываемого яруса).

Исходя из того, что плотность хвостов при достижении оптимальной влажности $W=20\%$ в естественных условиях составляет $\rho=1,65 \text{ г/см}^3=1,65 \text{ т/м}^3$, то давление в основании будет составлять:

$$P = 1,65 \frac{\text{т}}{\text{м}^3} \cdot 0,5 \text{ м} = 0,825 \frac{\text{т}}{\text{м}^2} = 0,0825 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} = 8,25 \text{ кПа} \quad (3.19)$$

Если учесть, что график изменения давления по высоте представляет собой прямоугольный треугольник (рисунок 3.10), а центр его тяжести, как известно, находится на высоте равной $1/3$ от основания, то отсюда следует, что давление в центре тяжести будет составлять:

$$P_{\text{ц.т.}} = 8,25 * \left(1 - \frac{1}{3}\right) = 5,5 \text{ кПа} \quad (3.20)$$

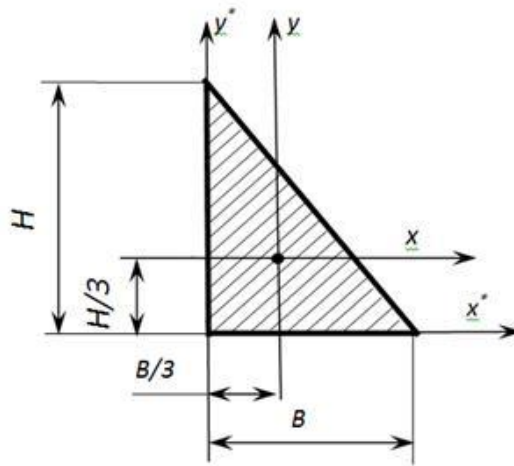


Рисунок 3.10 Изменение давления по высоте

Результаты компрессионных испытаний представлены на рисунке 3.11.

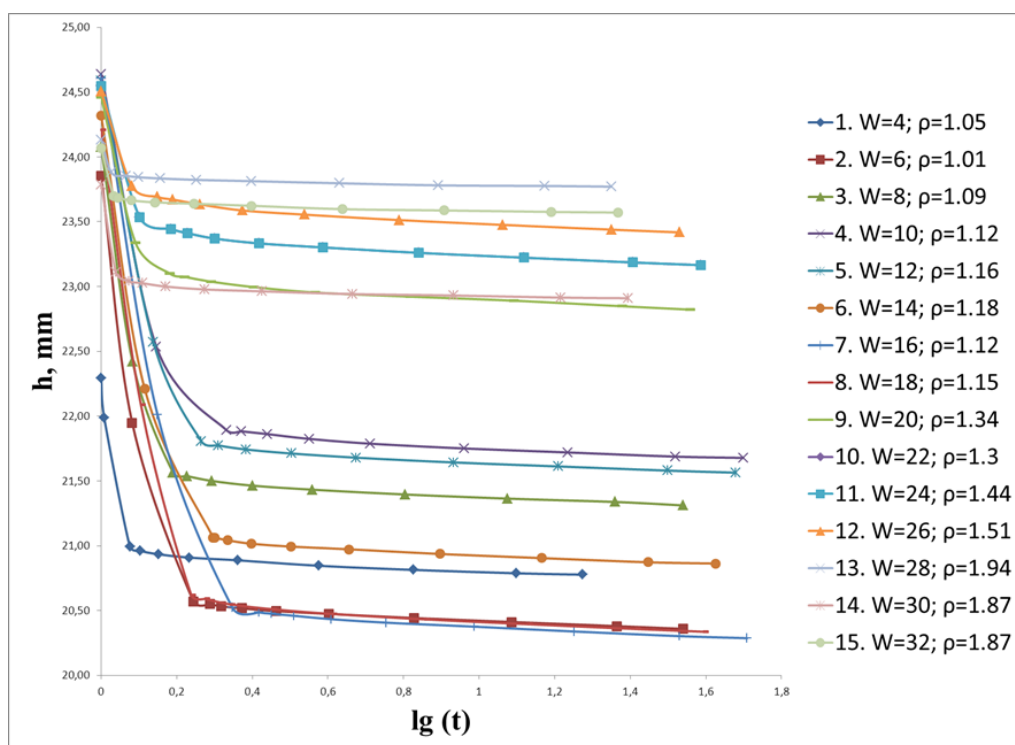


Рисунок 3.11 Компрессионные кривые образцов хвостов с заданной влажностью и плотностью

Каждый график представляет собой отдельную группу характеристик со своими свойствами, однако все они являются однородными [Lolaev A.B., Badoev A.S., ...Ho Chi Minh, 2018].

Для оценки различий между данными выборками был использован критерий Крускала-Уоллиса [Kruskal W.H., Wallis W.A., 1952, 1953].

Он позволяет установить изменяется ли уровень признака при переходе от группы к группе

«Критерий предназначен для оценки различий одновременно между тремя, четырьмя и т.д. выборками по уровню какого-либо признака. Он позволяет установить, что уровень признака изменяется при переходе от группы к группе, но не указывает на направление этих изменений.

Критерий H иногда рассматривается как непараметрический аналог метода дисперсионного однофакторного анализа для несвязных выборок. Иногда его называют критерием «суммы рангов [Носенко, 1981].

«Данный критерий является продолжением критерия U на большее, чем 2, количество сопоставляемых выборок. Все индивидуальные значения

ранжируются так, как если бы это была одна большая выборка. Затем все индивидуальные значения возвращаются в свои первоначальные выборки, и мы подсчитываем суммы полученных ими рангов отдельно по каждой выборке. Если различия между выборками случайны, суммы рангов не будут различаться сколько-нибудь существенно, так как высокие и низкие ранги равномерно распределятся между выборками. Но если в одной из выборок будут преобладать низкие значения рангов, в другой - высокие, а в третьей - средние, то критерий H позволит установить эти различия» [Сидоренко Е. В., 2000].

Гипотезы:

H_0 . Между выборками 1, 2, 3 и т. д. существуют лишь случайные различия по уровню исследуемого признака;

H_1 : Между выборками 1, 2, 3 и т. д. существуют неслучайные различия по уровню исследуемого признака.

Графическое представление критерия H :

«Критерий H оценивает общую сумму перекрывающихся зон при сопоставлении всех обследованных выборок. Если суммарная область наложения мала (рисунок 3.12 (а)), то различия достоверны; если она достигает определенной критической величины и превосходит ее (рисунок 3.12 (б)), то различия между выборками оказываются недостоверными» [Сидоренко Е. В., 2000].

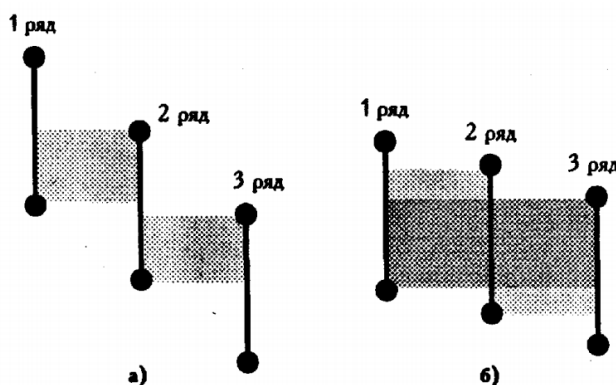


Рисунок 3.12 Два возможных варианта соотношения рядов значений в трех выборках; штриховкой отмечены зоны наложения

«При количестве выборок больше 3 и испытуемых в каждой выборке необходимо пользоваться таблицей критических значений критерия χ^2 поскольку критерий Крускала-Уоллиса асимптотически приближается к распределению χ^2 » [Носенко, 1981; J. Greene, M. D'Olivera, 1982].

Количество степеней свободы при этом определяется по формуле:

$$v=n-1 \quad (3.21)$$

где n - количество сопоставляемых выборок.

При множественном сопоставлении выборок достоверные различия между какой-либо конкретной парой (или парами) их могут оказаться стертыми. Это ограничение можно преодолеть, если провести все возможные попарные сопоставления, число которых будет равняться:

$$\frac{1}{2}(n \cdot (n - 1)) \quad (3.22)$$

Для таких попарных сопоставлений используется, естественно, критерий для двух выборок, например, U.-критерий.

При обработке консолидационных кривых, построенных в системе координат s_t (мм) - $\lg t$ (мин) определяем значения перемещения s для каждой кривой в зависимости от времени $\lg t$, соответствующее значениям 0; 0,4; 1,2; 1,6 (таблица 3.4).

Таблица 3.4 Исходные данные

№	W, %	lg t	0	0,4	1,2	1,6
1	4	s	22,295	20,881	20,781	
2	6	s	23,856	20,510	20,399	
3	8	s	24,078	21,464	21,353	
4	10	s	24,639	21,875	21,724	21,683
5	12	s	24,589	21,738	21,613	21,571
6	14	s	24,317	21,015	20,901	20,864
7	16	s	24,606	20,494	20,346	20,296
8	18	s	24,211	20,526	20,386	
9	20	s	24,461	22,997	22,876	
10	22	s	24,613	21,957	21,813	21,751
11	24	s	24,549	23,337	23,212	
12	26	s	24,506	23,580	23,458	
13	28	s	24,133	23,813	23,775	
14	30	s	23,787	22,965	22,916	
15	32	s	24,066	23,623	23,576	

Выдвигаем гипотезы:

H_0 . Между выборками 1, 2, 3 и т. д. существуют лишь случайные различия по уровню исследуемого признака.

H_1 : Между выборками 1, 2, 3 и т. д. существуют неслучайные различия по уровню исследуемого признака.

Далее проранжируем все значения, приписывая меньшему значению меньший ранг (Таблица 3.5).

Таблица 3.5 Результаты ранжирования

Значение s, мм	Ранг	Значение s, мм	Ранг	Значение s, мм	Ранг	Значение s, мм	Ранг	Значение s, мм	Ранг
20,296	1	20,901	11	21,813	21	23,458	31	24,133	41
20,346	2	21,015	12	21,875	22	23,576	32	24,211	42
20,386	3	21,353	13	21,957	23	23,580	33	24,317	43
20,399	4	21,464	14	22,295	24	23,623	34	24,461	44
20,494	5	21,571	15	22,876	25	23,775	35	24,506	45
20,510	6	21,613	16	22,916	26	23,787	36	24,549	46
20,526	7	21,683	17	22,965	27	23,813	37	24,589	47
20,781	8	21,724	18	22,997	28	23,856	38	24,606	48
20,864	9	21,738	19	23,212	29	24,066	39	24,613	49
20,881	10	21,751	20	23,337	30	24,078	40	24,639	50

После этого вновь раскладываем значения по каждой группе.

Подсчитываем сумму рангов R отдельно по каждой группе и проверяем ее совпадение с расчетной (3.23).

$$R_i = \frac{N \cdot (N+1)}{2} \quad (3.23)$$

где N – сумма рангов

$$R_i = \frac{50 \cdot (50 + 1)}{2} = 1275$$

Равенство реальной и расчетной сумм соблюдено.

Несовпадение реальной и расчетной сумм рангов будет свидетельствовать об ошибке, допущенной при начислении рангов или их суммировании. Прежде чем продолжить работу, необходимо найти ошибку и устранить ее.

Подсчитываем значение критерия H по формуле:

$$H_{\text{эмп}} = \left(\frac{12}{N \cdot (N+1)} \cdot \frac{R_i^2}{n} \right) - 3(N+1) \quad (3.24)$$

Где N – общая сумма рангов

n – количество наблюдений в каждой группе

R – суммы рангов по каждой группе

Отсюда,

$$H = \left(\frac{12}{50 \cdot (50 + 1)} \cdot \frac{1275^2}{4} \right) - 3(50 + 1) = 14,97$$

«Различия между двумя распределениями могут считаться достоверными, если эмпирическое значение $\chi^2_{\text{эмп.}}$ достигает или превышает

$\chi^2_{0,05}$ и тем более достоверными, если достигает или превышает $\chi^2_{0,01}$ » [Сидоренко Е. В., 2000].

Таблица 3.6 Подсчет ранговых сумм по группам

№	W, %	lg t	0	0,4	1,2	1,6	n	R	R²/n	
1	4	s	22,295	20,881	20,781					
		Ранг	24	10	8		3	42	588,00	
2	6	s	23,856	20,510	20,399					
		Ранг	38	6	4		3	48	768,00	
3	8	s	24,078	21,464	21,353					
		Ранг	40	14	13		3	67	1496,33	
4	10	s	24,639	21,875	21,724	21,683				
		Ранг	50	22	18	17	4	107	2862,25	
5	12	s	24,589	21,738	21,613	21,571				
		Ранг	47	19	16	15	4	97	2352,25	
6	14	s	24,317	21,015	20,901	20,864				
		Ранг	43	12	11	9	4	75	1406,25	
7	16	s	24,606	20,494	20,346	20,296				
		Ранг	48	5	2	1	4	56	784,00	
8	18	s	24,211	20,526	20,386					
		Ранг	42	7	3		3	52	901,33	
9	20	s	24,461	22,997	22,876					
		Ранг	44	28	25		3	97	3136,33	
10	22	s	24,613	21,957	21,813	21,751				
		Ранг	49	23	21	20	4	113	3192,25	
11	24	s	24,549	23,337	23,212					
		Ранг	46	30	29		3	105	3675,00	
12	26	s	24,506	23,580	23,458					
		Ранг	45	33	31		3	109	3960,33	
13	28	s	24,133	23,813	23,775					
		Ранг	41	37	35		3	113	4256,33	
14	30	s	23,787	22,965	22,916					
		Ранг	36	27	26		3	89	2640,33	
15	32	s	24,066	23,623	23,576					
		Ранг	39	34	32		3	105	3675,00	
						Сумма	50	1275	35694,00	
						Н	14,97			
						χ² (0,05)	23,68			
						χ² (0,01)	29,14			

В данном случае у нас 15 групп, сопоставляем полученное эмпирическое значение H с критическими значениями χ^2 (таблица 3.6). Для этого вначале определим количество степеней свободы ν для $n=15$ (3.22)

$$V=15-1=14 \quad (3.25)$$

Сравним полученное эмпирическое значение H с критическим $H_{кр}$

Для этого воспользуемся таблицей критических значений критерия χ^2 для уровней статистической значимости $p < 0,05$ и $p < 0,01$:

$$\chi_{кр}^2 = \begin{cases} 23,68 (p = 0,05) \\ 29,14 (p = 0,01) \end{cases} \quad (3.26)$$

В результате расчетов было установлено, что эмпирическое значение меньше критического $H_{эмп} < H_{кр}$, и, следовательно, подтверждено, что данные группы не различаются между собой. Гипотеза H_0 принимается.

Далее с помощью критерия Манна-Уитни оценивались различия между парами выборок по уровню какого-либо признака, количественно измеренного.

Он позволяет выявлять различия между малыми выборками, когда $n_1, n_2 \geq 3$ или $n_1 = 2, n_2 \geq 5$. В каждой выборке должно быть не более 60 наблюдений; $n_1, n_2 \leq 60$.

«Существует несколько способов использования критерия и несколько вариантов таблиц критических значений, соответствующих этим способам» [Гублер, 1973, 1978; Рунион, 1982; Захаров, 1985; McCall R., 1970; Krauth J., 1988].

«Этот метод определяет, достаточно ли мала зона перекрещивающихся значений между двумя рядами. Известно, что 1-м рядом (выборкой, группой) мы называем тот ряд значений, в котором значения, по предварительной оценке, выше, а 2-м рядом - тот, где они предположительно ниже.

Чем меньше область перекрещивающихся значений, тем более вероятно, что различия достоверны. Иногда эти различия называют различиями в расположении двух выборок» [Welkowitz J. et al., 1982].

«Эмпирическое значение критерия U отражает то, насколько велика зона совпадения между рядами. Поэтому чем меньше $U_{эмп}$, тем более вероятно, что различия достоверны» [Сидоренко, 2000].

Гипотезы:

H_0 : Уровень признака в группе 2 не ниже уровня признака в группе 1;

H_1 : Уровень признака в группе 2 ниже уровня признака в группе 1.

Графическое представление критерия U :

«В варианте (а) второй ряд ниже первого, и ряды почти не перекрещиваются. Область наложения слишком мала, чтобы скрадывать различия между рядами. Есть шанс, что различия между ними достоверны. Точно определить это мы сможем с помощью критерия U . В варианте (б) второй ряд тоже ниже первого, но и область перекрещивающихся значений у двух рядов достаточно обширна (рисунок 3.13). Она может еще не достигать критической величины, когда различия придется признать несущественными. Но так ли это, можно определить только путем точного подсчета критерия U » [Сидоренко, 2000].

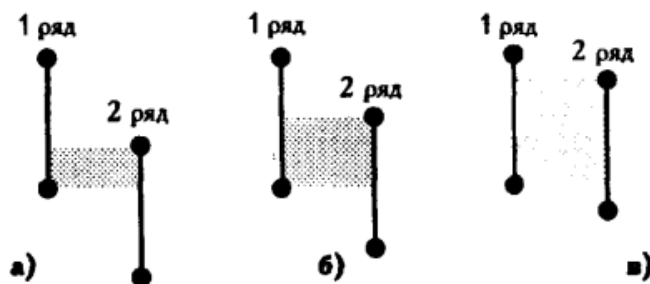


Рисунок 3.13. Возможные варианты соотношения рядов значений в двух выборках; штриховкой обозначены зоны наложения.

Подсчитываем сумму рангов R отдельно по каждой группе (№4 и №9) и проверяем ее совпадение с расчетной (3.27).

$$R_i = \frac{7 \cdot (7+1)}{2} = 28 \quad (3.27)$$

Равенство реальной и расчетной сумм соблюдено.

Далее определяем большую из двух ранговых сумм. В нашем случае это №9 (Таблица 3.5)

Определяем значение U по формуле:

$$U_{эм} = n_1 \cdot n_2 + \frac{n_x \cdot (n_x + 1)}{2} - T_x \quad (3.28)$$

где n_1 - количество испытуемых в выборке 1;

n_2 - количество испытуемых в выборке 2;

T_x - большая из двух ранговых сумм;

n_x - количество испытуемых в группе с большей суммой рангов.

Отсюда:

$$U = 4 \cdot 3 + \frac{3 \cdot (3 + 1)}{2} - 15 = 3$$

Таблица 3.7 Критические значения критерия Манна-Уитни для групп 4 и 9

№	W, %	lg t	0	0,4	1,2	1,6	n	R
4	10	s	24,639	21,875	21,724	21,683		
		Ранг	7	3	2	1	4	13
9	20	s	24,461	22,997	22,876			
		Ранг	6	5	4		3	15
						Сумма	7	28
						U	3,00	
						p (0,05)	0,00	
						p (0,01)	-	

Определяем критические значения критерия U Манна-Уитни для уровней статистической значимости $p < 0,05$ и $p < 0,01$ (таблица 3.7) [Гублер, Генкин, 1973]

$$U_{кр} = \begin{cases} 0(p = 0,05) \\ -(p = 0,01) \end{cases} \quad (3.29)$$

Аналогичные расчеты были проведены с еще двумя парами групп (таблица 3.8, 3.9)

Таблица 3.8 Критические значения критерия Манна-Уитни для групп 5 и 7

№	W, %	lg t	0	0,4	1,2	1,6	n	R
5	12	s	24,589	21,738	21,613	21,571		
		Ранг	7	6	5	4	4	22
7	16	s	24,606	20,494	20,346	20,296		
		Ранг	8	3	2	1	4	14
						Сумма	8	36
						H	12,00	
						p (0,05)	1,00	
						p (0,01)	-	

Таблица 3.9 Критические значения критерия Манна-Уитни для групп 6 и 14

№	W, %	lg t	0	0,4	1,2	1,6	n	R
6	14	s	24,317	21,015	20,901	20,864		
		Ранг	7	3	2	1	4	13
14	30	s	23,787	22,965	22,916			
		Ранг	6	5	4		3	15
						Сумма	7	28
						U	3,00	
						p (0,05)	0,00	
						p (0,01)	-	

Так как эмпирическое значение здесь выше критического $U_{эмп} > U_{кр}$, то из этого следует, что различия между данными парами групп статистически незначимы.

Консолидационные характеристики хвостов по результатам испытаний получены методом Казагранде.

При определении коэффициента консолидации по методу Казагранде необходимые для его расчета параметры находят при обработке консолидационной кривой, построенной в системе координат S_t (мм) - lgt (мин). По лабораторной кривой устанавливают время начала фильтрационного этапа, деформации уплотнения, соответствующие 100 и 50% первичной консолидации, а также время, соответствующее 50 % последней (Рисунок 3.14).

Начальная часть кривой зависимости деформации сжатия от логарифма времени представляет собой параболу. Поэтому для нахождения точки, соответствующей началу фильтрационной фазы уплотнения, на начальном участке кривой находят две точки, для которых время находится в соотношении 1:4 (например, 12" и 48").

Тогда разность в показаниях индикатора в этих двух точках (A_1 и A_2) равна разности между показанием первой точки и показанием, соответствующим приведенному 0 (A_0). Исходя из сказанного, начало фильтрационного этапа находят, откладывая вверх от ординаты точки A_1 разность ординат точек A_2 и A_1 .

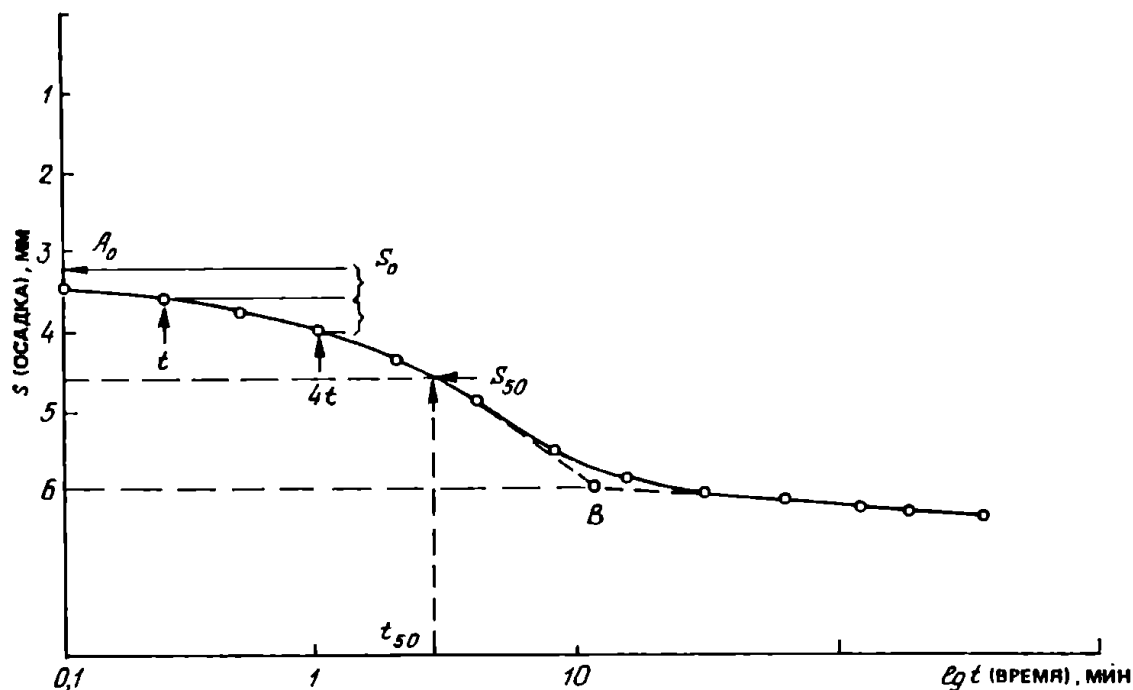


Рисунок.3.14 Консолидационная кривая в координатах $s - \lg t$

Деформацию при 100%-й фильтрационной консолидации устанавливают по ординате пересечения двух прямых, одна из которых является продолжением прямолинейного участка кривой консолидации, соответствующего фазе ползучести, другая — касательной к отрезку кривой на участке, соответствующему фильтрационному этапу уплотнения. По половине разности показаний индикатора в точках В и A_0 находят осадку образца при 50 %-й фильтрационной консолидации и устанавливают время, соответствующее этой осадке (t_{50}).

Коэффициент фильтрационной консолидации C_v , см²/мин (см²/год), вычисляют [ГОСТ 12248-2010; ПНИИИС Госстроя СССР Рекомендации по определению параметров ползучести и консолидации грунтов..., 1989 г.; Цытович, Тер-Мартirosян, 1981 г.] по формуле:

$$C_v = \frac{T_{50} h^2}{t_{50}} \quad (3.30)$$

где T_{50} - коэффициент (фактор времени), соответствующий степени консолидации 0,5, равный 0,197;

h – высота образца (средняя между начальной высотой и высотой после завершения опыта на консолидацию), см. При двухсторонней фильтрации принимается высота, равная $h/2$;

t_{50} – время, соответствующее 50 %-му первичному сжатию, мин

«Коэффициент вторичной консолидации (безразмерная величина) C_α определяют по тангенсу угла между линейным отрезком кривой на участке вторичной консолидации и прямой, параллельной оси абсцисс по формуле» [ГОСТ 12248-2010]:

$$C_\alpha = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)}{\lg(t_2) - \lg(t_1)} \quad (3.31)$$

где $\varepsilon(t_2)$ и $\varepsilon(t_1)$ – значения деформации образца на участке вторичной консолидации;

t_1 и t_2 – время, соответствующее деформациям $\varepsilon(t_1)$ и $\varepsilon(t_2)$, мин.

Для расчета времени консолидации по изменению геометрических характеристик образцов было получено уравнение [Лолаев, Бадоев, 2017-2019; Lolaev, Badoev, et. al., 2017-2019], которое можно использовать для расчетов с достаточной для практических целей точностью:

$$\begin{aligned} t &= \frac{F(h_k + s)}{h_k C_v} = \frac{Fh_k + Fs}{h_k C_v} = \frac{Fh_k}{h_k C_v} + \frac{Fs}{h_k C_v} = \frac{F}{C_v} \left(1 + \frac{s}{h_k} \right) = \frac{F}{C_v} \left(1 + \frac{s}{h - s} \right) \\ &= \frac{F}{C_v} \left(\frac{h - s}{h - s} + \frac{s}{h - s} \right) \end{aligned}$$

Отсюда получаем:

$$t = \frac{F}{C_v} \times \frac{h}{h - s} \quad (3.32)$$

где t - время консолидации, мин; F - площадь сечения кольца, см²;

C_v - коэффициент консолидации, см²/мин; h - начальная высота слоя, см;

h_k – конечная высота слоя, см; s - перемещение, см

В таблице 3.10 представлены полученные по результатам компрессионных испытаний средние значения коэффициентов консолидации и значения времени консолидации, полученные по уравнению (1).

Таблица 3.10 Результаты испытаний и расчетные значения времени фильтрационной и вторичной консолидации

Тип	№ опыта	Коэффициент фильтрационной консолидации c_v , см ² /мин	Время, мин	Коэффициент вторичной консолидации c_a , см ² /мин	Время, сут
Хвосты "Лебяжье"	1	6,8901	10,3768	0,0083	6,01
	2	3,9049	18,6857	0,0117	4,34
	3	5,7963	12,0254	0,0112	4,32
	4	2,8072	24,4108	0,0090	5,27
	5	5,3561	12,8616	0,0102	4,67
	6	5,2142	13,6556	0,0091	5,43
	7	5,2226	14,0208	0,0114	4,48
	8	5,1662	14,1390	0,0125	4,07
	9	5,9228	10,9898	0,0132	3,43
	10	5,4103	12,6280	0,0141	3,37
	11	5,5247	11,6072	0,0124	3,59
	12	6,5367	9,7044	0,0124	3,55
	13	17,1618	3,6414	0,0022	19,87
	14	12,3204	5,2629	0,0045	9,90
	15	15,2329	4,1372	0,0035	12,61

Консолидационные кривые (Рисунок 3.12) показывают, что поведение хвостов при разной влажности и плотности остается неизменным. Это свидетельствует о том, что консолидационные характеристики, возможно определять для любых сочетаний влажности и плотности хвостов в указанных пределах, что значительно сократит трудоемкость.

С целью обоснования данной гипотезы необходимо описание математической зависимости изучаемого параметра y от факторов по экспериментальным данным, с построением регрессионной модели вида $y=F(x_1, x_2...x_k)$. Для этого использовано уравнение регрессии в виде многочленов:

$$y = f(x) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + ... + b_kx_k \quad (3.33)$$

где $b_0, b_1, b_2, ..., b_k$ – коэффициенты, подлежащие определению [Бараз, Пегашкин, 2014].

В итоге получено уравнение для определения времени консолидации при известных проектных величинах влажности и плотности:

$$t = -17,542 - 0,556 \cdot W + 25,141 \cdot \rho \quad (3.34)$$

Для количественной проверки гипотезы об адекватности регрессионной модели использовался F-критерий (критерий Фишера), который был рассчитан с помощью Microsoft Excel (пакет анализа данных).

Для этого на листе Excel заранее организуется таблица с данными, в которой указывается содержимое. Причем саму таблицу построим по столбцам и поместим ее в ячейках A1:D47. Итоговый результат показан в таблице 3.11.

Далее в главном меню запускаем *Сервис/Анализ данных/Регрессия* (Рисунок 3.15).

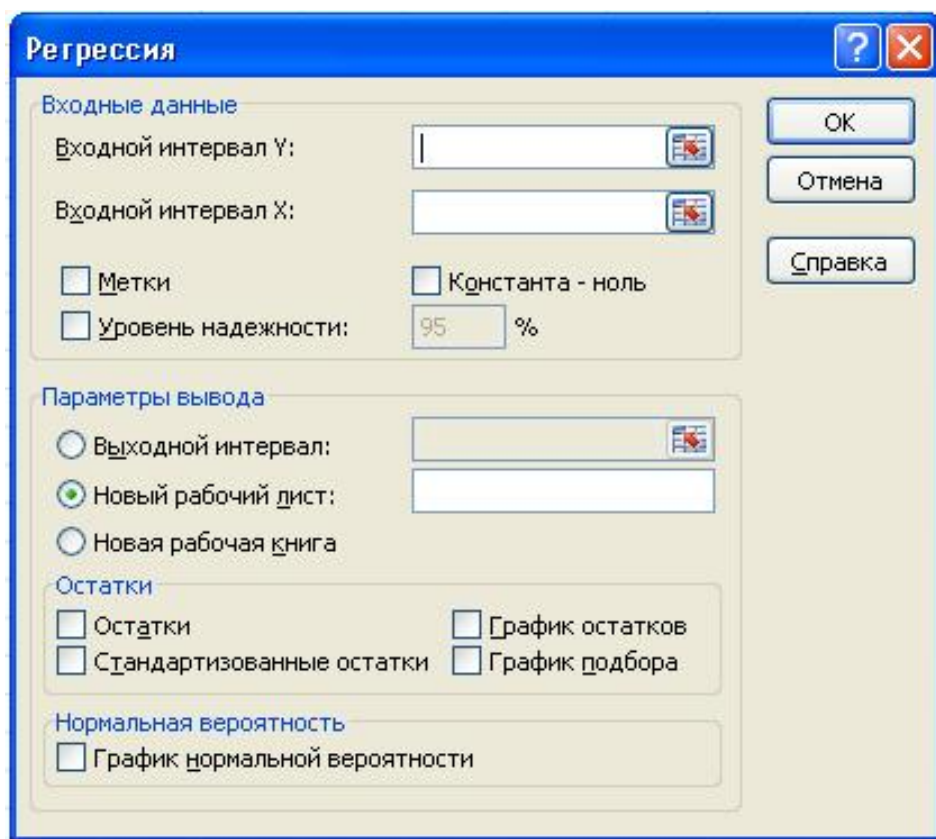


Рисунок 3.15 Диалоговое окно «Регрессия»

Таблица 3.11 Таблица с исходными данными.

№	А	В	С	Д
1	№ опыта	Влажность W, %	Плотность ρ , г/см ³	Время, сут
3	1	4	1,05	6,01
4	2	4	1,06	6,00
5	3	4	1,04	5,98
6	4	6	1,01	4,34
7	5	6	1,03	4,31
8	6	6	1,01	4,06
9	7	8	1,09	4,32
10	8	8	1,08	4,33
11	9	8	1,11	4,27
12	10	10	1,12	5,27
13	11	10	1,13	5,27
14	12	10	1,12	5,21
15	13	12	1,16	4,67
16	14	12	1,16	4,66
17	15	12	1,17	4,78
18	16	14	1,18	5,43
19	17	14	1,2	5,43
20	18	14	1,17	5,38
21	19	16	1,12	4,48
22	20	16	1,14	4,44
23	21	16	1,12	4,37
24	22	18	1,15	4,07
25	23	18	1,14	3,98
26	24	18	1,16	3,97
27	25	20	1,34	3,43
28	26	20	1,32	3,43
29	27	20	1,33	3,39
30	28	22	1,3	3,37
31	29	22	1,33	3,34
32	30	22	1,29	3,27
33	31	24	1,44	3,59
34	32	24	1,42	3,58
35	33	24	1,46	3,56
36	34	26	1,51	3,55
37	35	26	1,53	3,53
38	36	26	1,51	3,43
39	37	28	1,94	19,87
40	38	28	1,92	18,40
41	39	28	1,94	19,58
42	40	30	1,87	9,90
43	41	30	1,85	9,79
44	42	30	1,86	9,96
45	43	32	1,87	12,61
46	44	32	1,88	12,56
47	45	32	1,87	12,00

В окне заполняем поля ввода данных для обоих параметров y и x ; для этого в каждое окно (**Входной интервал Y** и **Входной интервал X**) помещаем данные, выделив их предварительно в соответствующих столбцах (для функции y данные находятся в четвертом столбце D3:D47, а для переменной x – во втором и третьем, т.е. B3:C47; при этом выделяются только те ячейки, которые содержат исключительно числовые показатели).

Отмечаем **Уровень надежности** (доверительную вероятность), равный 95%.

Указываем в окне вывода **Выходной интервал** ту ячейку, от которой будет формироваться весь блок получаемых статистических показателей (ячейка F5); после чего – кнопка **ОК**.

На рисунке 3.16 в собранном виде представлены все упомянутые элементы.

В таблице 3.12 представлены рассчитанные статистические показатели.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	№ опыта	Влажность W, %	Плотность ρ , г/см ³	Время, сут											
2															
3	1	4	1,05	6,01											
4	2	4	1,06	6,00											
5	3	4	1,04	5,98											
6	4	6	1,01	4,34											
7	5	6	1,03	4,31											
8	6	6	1,01	4,06											
9	7	8	1,09	4,32											
10	8	8	1,08	4,33											
11	9	8	1,11	4,27											
12	10	10	1,12	5,27											
13	11	10	1,13	5,27											
14	12	10	1,12	5,21											
15	13	12	1,16	4,67											
16	14	12	1,16	4,66											
17	15	12	1,17	4,78											
18	16	14	1,18	5,43											
19	17	14	1,2	5,43											
20	18	14	1,17	5,38											
21	19	16	1,12	4,48											
22	20	16	1,14	4,44											
23	21	16	1,12	4,37											
24	22	18	1,15	4,07											
25	23	18	1,14	3,98											
26	24	18	1,16	3,97											
27	25	20	1,34	3,43											
28	26	20	1,32	3,43											
29	27	20	1,33	3,39											
30	28	22	1,3	3,37											
31	29	22	1,33	3,34											
32	30	22	1,29	3,27											
33	31	24	1,44	3,59											
34	32	24	1,42	3,58											
35	33	24	1,46	3,56											
36	34	26	1,51	3,55											
37	35	26	1,53	3,53											
38	36	26	1,51	3,43											
39	37	28	1,94	19,87											
40	38	28	1,92	18,40											
41	39	28	1,94	19,58											
42	40	30	1,87	9,90											
43	41	30	1,85	9,79											
44	42	30	1,86	9,96											
45	43	32	1,87	12,61											
46	44	32	1,88	12,56											
47	45	32	1,87	12,00											

Вывод итогов				
Регрессионная статистика				
Множественный R	0,901024018			
R-квадрат	0,811844281			
Нормированный R-квадрат	0,802884485			
Стандартная ошибка	1,915462163			
Наблюдения	45			
Дисперсионный анализ				
	df	SS	MS	F
Регрессия	2	664,8929972	332,4464986	90,60968241
Остаток	42	154,0978025	3,668995297	
Итого	44	818,9907997		
Корреляционная таблица				
	Коэффициент	Стандартная ошибка	t-статистика	P-значение
У-пересечение	-17,5422301	1,848709378	-9,488926853	5,24578E-12
Переменная X 1	-0,556132491	0,078867822	-7,051462526	1,22711E-08
Переменная X 2	25,14106956	2,243276006	11,20730106	9,35284E-14

	Нижние 95%	Верхние 95%	Нижние 95,0%	Верхние 95,0%
У-пересечение	-21,2730686	-13,81139161	-21,2730686	-13,81139161
Переменная X 1	-0,7152952	-0,396971783	-0,7152952	-0,396971783
Переменная X 2	20,61395529	29,66818382	20,61395529	29,66818382

Регрессия

Входные данные

Входной интервал Y:

\$D\$3:\$D\$47

Входной интервал X:

\$B\$3:\$C\$47

☐ Метки

☐ Константа - ноль

☒ Уровень надежности:

95 %

Параметры вывода

☒ Выходной интервал:

\$F\$5

☐ Новый рабочий лист:

☐ Новая рабочая книга

Остатки

☐ Остатки

☐ График остатков

☐ Стандартизованные остатки

☐ График подбора

Нормальная вероятность

☐ График: нормальная вероятность

ОК

Отмена

Справка

Рисунок 3.16 Лист Excel с результатами расчета коэффициентов регрессии

Таблица 3.12 Расчет коэффициентов регрессии и критерия Фишера.

<i>Регрессионная статистика</i>	
Множественный R	0,901024018
R-квадрат	0,811844281
Нормированный R ²	0,802884485
Стандартная ошибка	1,915462163
Наблюдения	45

Дисперсионный анализ

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимость F</i>
Регрессия	2	664,8929972	332,4464986	90,60968241	5,81923E-16
Остаток	42	154,0978025	3,668995297		
Итого	44	818,9907997			

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>
У-пересечение	-17,5422301	1,848705378	-9,488926853	5,24578E-12	-21,2730686
Переменная X 1	-0,556133491	0,078867822	-7,051462526	1,22711E-08	-0,7152952
Переменная X 2	25,14106956	2,243276006	11,20730106	3,35284E-14	20,61395529

x_1 – переменная влажности (W) хвостов, %

x_2 – переменная плотности (ρ) хвостов, г/см³

По полученному значению коэффициента корреляции, была дана качественно-количественная оценка тесноты связи с использованием специальных табличных соотношений [Бараз, Пегашкин, 2014].

Так как множественный коэффициент корреляции $R=0,9012$, то можно утверждать, что связь между коэффициентами корреляции очень сильная.

В результате F -теста получена величина $F_{расч.}=90,61$ для времени консолидации хвостов при определенной влажности и плотности. Так как это значение больше табличного $F_{табл.}(0,05;2;42)=3,22$, то можно утверждать, что регрессионная модель значима и может быть использована для предсказания значений зависимой переменной y при всех значениях независимых переменных x_1 и x_2 в пределах, наблюдававшихся при эксперименте значений последней [Лолаев, Бадоев и др., 2018, 2019].

Выводы по главе 3

На основе исследований, выполненных в настоящей главе можно сделать следующие выводы:

1. Установлены принципы и критерии физико-математического моделирования намыва ограждающей дамбы.
2. Выявлено, что процесс консолидации твердой фракции при намыве заканчивается при достижении осадком максимальной плотности, а при намыве нового слоя необходимо обеспечить достижение твердой фракцией влажности 20%, что соответствует наиболее плотной укладке частиц примерно одного размера, когда все поры заполнены жидкостью, под действием собственного веса.
3. Впервые выполнено математическое описание зависимости параметров возведения техногенного массива (времени заполнения участка намыва, высоты годового намыва, времени заполнения яруса участка намыва) от геометрических характеристик объекта и участка складирования, физико-механических свойств хвостов и климатических условий.
4. Установлено, что группы консолидационных характеристик намываемой твердой фракции, определенные при различных значениях влажности и плотности, не различаются между собой на основе критерия Крускала-Уоллиса, а различия между парами групп статистически незначимы на основе критерия Манна-Уитни.
5. Определены параметры намыва техногенного массива по результатам испытаний в лабораторных условиях.

ГЛАВА 4. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВОЗВЕДЕНИЯ НАМЫВНОГО ХВОСТОХРАНИЛИЩА «ЛЕБЯЖЬЕ» ЗФ ГМК «НОРИЛЬСКИЙ НИКЕЛЬ»

4.1 Методика определения параметров намыва.

Выполненный комплекс теоретических и экспериментальных исследований позволил разработать методику-алгоритм определения параметров намыва хвостохранилища (Рисунок 4.1).

Основные этапы методики следующие:

1. Геометрические характеристики существующего хвостохранилища, диаметр магистрального пульпопровода и выпусков;
2. Формирование исходных данных намыва;
3. Установление технологических параметров намыва;
4. Выполнение полного намыв при температуре $> -5^{\circ}\text{C}$ и определение общего количества дней намыва;
5. Определение физико-механических свойств хвостов с расчетом времени консолидации;
6. Анализ параметров намыва;
7. Построение сетевого графика;
8. Анализ сроков намыва: Соответствует ли нормативным срокам?



Рисунок 4.1 Алгоритм определения технологических параметров намыва

1. Геометрические характеристики существующего хвостохранилища, диаметр магистрального пульпопровода и выпусков. Необходимо подготовить исходные данные о геометрических характеристиках существующего хвостохранилища с определением площадей, а также диаметры магистрального пульпопровода, количество выпусков и их диаметры для дальнейших расчетов.

2. Формирование исходных данных намыва. На этапе формирования исходных данных нужно определить объем поступающих хвостов при намыве и рассчитать высоту слоя годового намыва в соответствии с фактическими площадями намыва (П.1).

3. Установление параметров намыва. В зависимости от суточного объема хвостов и пропускной способности одного выпуска определяется необходимое количество выпусков и определяется ширина сектора намыва и, соответственно, общее количество секторов, на которые будет осуществляется складирование хвостов.

4. Выполнение полного намыв при температуре $> -5^{\circ}\text{C}$ и определение общего количества дней намыва. Выполняется намыв хвостохранилища и указывается общее время намыва на пляж (количество дней в году с температурой выше -5°C), которое определяется по данным метеостанций и из климатических условий региона. «Данный параметр предусмотрен для объектов, расположенных в климатических зонах с зимней температурой ниже -5°C , т. к. «Правилами безопасности ...» запрещается производить намыв на пляж при температуре ниже указанного значения» [Лолаев, Бутюгин, 2005].

Необходимо задать ограничение по высоте годового намыва. Данный параметр имеет важное значение для накопителей, расположенных в криолитозоне. Значение максимально допустимой высоты намыва за год должно обеспечивать условия промерзания намывного массива и зависит от климатических характеристик местности, химического состава и физико-механических свойств намывного массива. С целью определения значения

максимально допустимой высоты годового намыва должны проводиться отдельные исследования для каждого конкретного случая.

5. Определение физико-механических свойств хвостов с расчетом времени консолидации.

Определяются физико-механические свойства хвостов в соответствии с методиками и требованиями соответствующих ГОСТ.

«Для установления зависимости плотности скелета грунта от его влажности проводят серию отдельных испытаний грунта на уплотнение с последовательным увеличением его влажности. Результаты испытаний представляют в виде графика. Количество отдельных испытаний для построения графика должно быть не менее шести, а также достаточным для выявления максимального значения плотности скелета грунта» [Лолаев, Бадоев, 2016, 2017].

«Испытания по определению максимальной плотности скелета грунта следует считать законченными тогда, когда с повышением влажности пробы при последующих двух, трех испытаниях на уплотнение происходит последовательное уменьшение значений плотности уплотненных образцов грунта или, когда грунт перестает уплотняться и начинает при ударах груза выжиматься из прибора» [ГОСТ 22733-2016].

После проведения испытаний строится график зависимости плотности скелета от влажности.

Определяется также насыпная плотность хвостов на всех этапах увеличения влажности.

Были выявлено, что каждому значению влажности хвостов соответствует определенный диапазон изменения плотности.

Далее определяются границы пластичности хвостов.

Показатель влажности на границе текучести и диапазоны изменения плотностей хвостов служат основанием для определения интервала изменения исследуемых параметров.

При достижении намытыми хвостами найденного оптимального значения влажности, плотность хвостов будет максимальной, а, следовательно, будет пройден процесс консолидации. Для того, чтобы определить время, через которое данная консолидация произойдет, проводятся компрессионные испытания.

«В зависимости от плотности, влажности, особенностей структуры грунтов и величины, действующей на них нагрузки соотношение фильтрационных и реологических явлений в процессе консолидации грунтов различно» [ПНИИС Госстроя СССР Рекомендации...1989; Цытович, Тер-Мартirosян, 1981].

По имеющимся образцам хвостов формируются серии образцов заданной влажности и плотности. Причем верхним показателем влажности является влажность на границе текучести.

При планировании количества экспериментов следует использовать методы теории вероятностей и математической статистики. Наименьшее число параллельных экспериментов N определяется по формуле:

$$N = \frac{S}{P} \times Z_{\alpha}^2 \quad (4.1)$$

где Z_{α}^2 – квантиль нормального распределения, соответствующий значению надежности α и устанавливаемый по таблице значений функций Лапласа

S – стандарт распределения

P – принятая точность определения среднего.

«При надежности $\alpha=0,9$ и точности $P=0,05$ минимально необходимое количество параллельных экспериментов, при котором средняя квадратическая ошибка будет в пределах точности среднего арифметического, равно трем» [Пустыльник, 1968]. Данный вывод был положен в основу определения количества испытаний при заданных параметрах эксперимента.

Как известно с учетом характера процессов, вызывающих уплотнение водонасыщенных грунтов в различные периоды времени, процесс

консолидации условно разграничивают на две фазы; первичную или фильтрационную и вторичную, обусловленную ползучестью скелета грунта. Время завершения этапа фильтрационной консолидации устанавливается по консолидационным кривым, построенным в координатах перемещение (s) – логарифм времени ($\lg t$) по методу Казагранде.

Вычисляют коэффициент фильтрационной консолидации C_v , см²/мин (см²/год) по формуле (3.30).

Определяют коэффициент вторичной консолидации (безразмерная величина) C_α по тангенсу угла между линейным отрезком кривой на участке вторичной консолидации и прямой, параллельной оси абсцисс по формуле (3.31).

По формуле (3.32) рассчитывается время консолидации по изменению геометрических характеристик образцов в лабораторных условиях.

Составляется уравнение регрессии (3.33) в виде многочленов (полинома), расположенных по восходящим степеням изучаемого фактора и одновременно линейных ко всем коэффициентам и определяется время консолидации хвостов при известных проектных величинах влажности и плотности.

На основании этих данных устанавливается максимально допустимая высота единовременного намыва. Данный ограничитель вводится с целью повышения устойчивости сооружения. Таким образом, намыв на участке складирования осуществляется единовременно не на всю высоту намыва за год, а в несколько этапов. Причем между окончанием намыва нижнего яруса и началом намыва последующего яруса должен быть установлен технологический перерыв. Продолжительность технологического перерыва устанавливается с учетом требований к консолидации намывного массива нижнего яруса. Значение максимально допустимой высоты единовременного намыва и продолжительности технологического перерыва так же требует исследований для каждого отдельного объекта.

6. Анализ параметров намыва. «Исходя из условий эксплуатации намывных накопителей в криолитозоне, следует учитывать, что увеличение мощности годового намывного слоя может не обеспечить завершение процесса его консолидации до начала промерзания в зимний период, и тем самым будет способствовать снижению устойчивости сооружения» [Акопов А. П. Автореферат диссертации, 2013 г.].

В процессе проведения исследований оптимизации технологических параметров необходимо точно определить время консолидации хвостов, являющимся важнейшим фактором оптимизации технологии намыва хвостохранилища в условиях криолитозоны.

Для обеспечения достаточного количества времени при прохождении процесса консолидации хвостов определяется последовательность намыва секторов.

7. Построение сетевого графика. С целью выполнения нормативных требований оптимизации технологического процесса намыва применяем метод сетевого планирования.

Использование сетевого планирования повышает точность определения технологических параметров намыва хвостохранилища, что является основой уменьшения затрат на возведение и эксплуатацию данных объектов.

В результате построения и расчета сетевого графика определяется продолжительность критического пути в днях, что позволяет сделать вывод о том, будет ли весь объем намываемых хвостов уложен в требуемые сроки.

8. Анализ сроков намыва. Производится проверка соответствия полученного количества дней, требуемого на укладку хвостов с количеством дней в году со среднесуточной температурой выше -5°C (Правила безопасности ...), и в случае несоответствия необходимо вернуться на этап определения исходных данных.

Данная методика была применена для оптимизации параметров возведения намывного хвостохранилища «Лебяжье» ЗФ ГМК «Норильский никель».

4.2 Оптимизация параметров возведения намывного хвостохранилища «Лебяжье»

«В настоящее время хвостохранилище «Лебяжье» представлено двумя полями. Первое поле эксплуатируется с 1983 года и имеет абсолютные отметки гребня примерно 70 м. Второе поле хвостохранилища находится в стадии строительства. На конец эксплуатации хвостохранилище должно представлять собой единый накопитель с отметкой гребня 90. Таким образом, к настоящему времени хвостохранилище в целом представляет собой один из наиболее неблагоприятных видов накопителей – каскадный, с перепадом уровней воды в первом и втором отсеках более 20 м» [Лолаев, Оганесян и др., 2011, Lolaev, Butygin et al., 2011].

Процесс намыва хвостов в хвостохранилище может быть разделен на два этапа по времени:

1. Намыв хвостов;
2. Консолидация намытых хвостов.

На рисунке 4.1 представлена разбивка пляжа на секторы для определения объема намываемых хвостов. Каждый сектор представляет собой участок пляжа хвостохранилища, ширина которого равна фронту намыва, а длина – расстояния между ограждающей дамбой и дамбой вторичного обвалования.

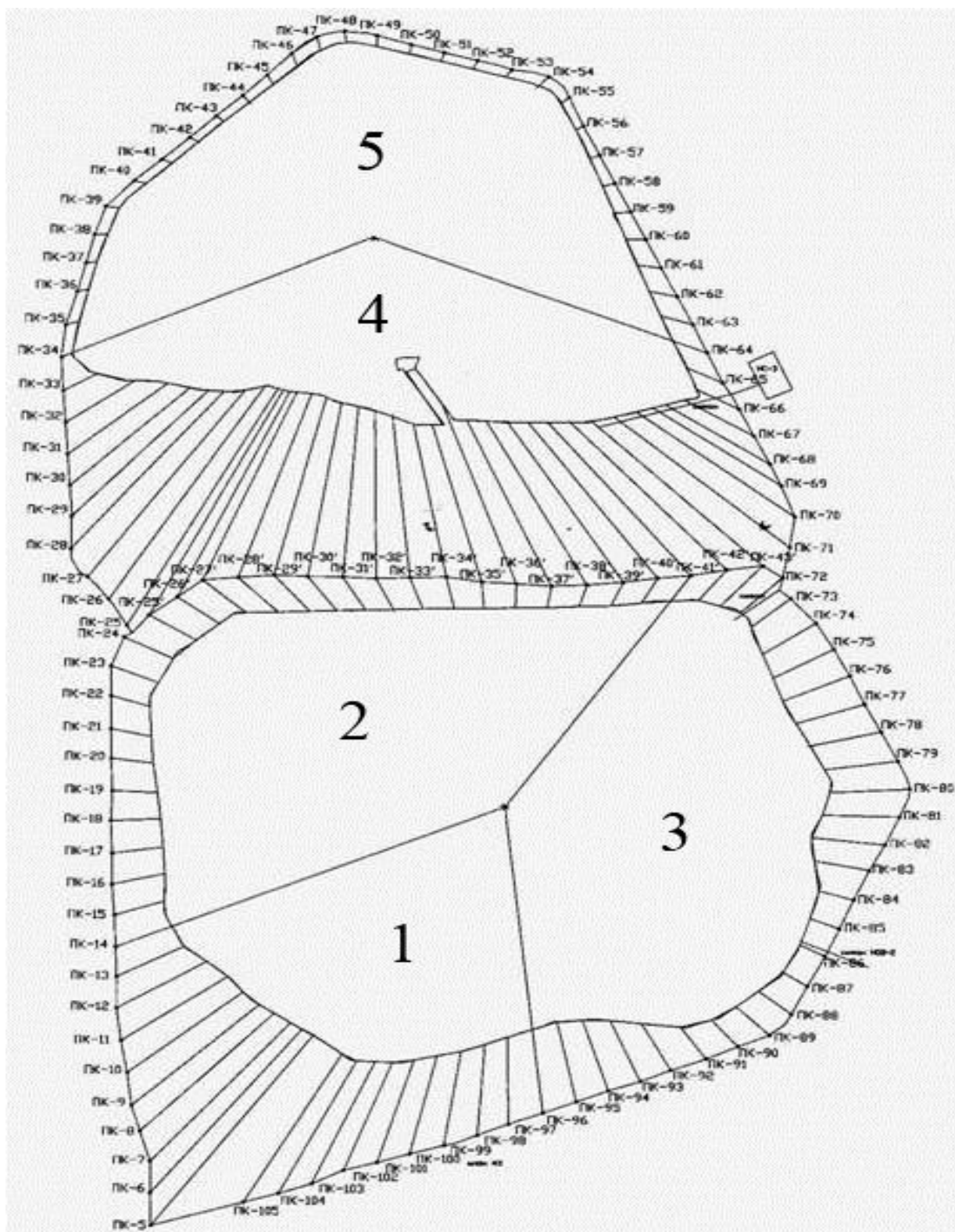


Рисунок 4.2. Разбивка пляжа на секторы

Далее определялись площади секторов по результатам тахеометрической съемки объекта (Согласно «Правилам безопасности ...» тахеометрическая съемка должна проводиться ежегодно).

Намыв пляжа производится перемещением распределительного пульповода, проложенным по гребню ограждающей дамбы.

После чего необходимо задать ограничение по высоте годового намыва. Данный параметр имеет особо важное значение для накопителей, расположенных в криолитозоне. Значение максимально допустимой высоты намыва за год должно обеспечивать условия промерзания намывного массива и зависит от климатических характеристик местности, химического состава и физико-механических свойств намывного массива. С целью определения значения максимально допустимой высоты годового намыва должны проводиться отдельные исследования для каждого конкретного случая.

Принятая высота намыва в год на первом поле составляет 1 метр, а на втором – 2 метра [Отчет о НИР по государственному контракту «Исследования и разработка...», 2011-2012].

Исходные параметры намыва представлены в Таблице 4.1.

Рассчитываются объемы, которые принимает каждый отдельный участок складирования (сектор) поля:

$$V_i = h_{\text{огр}} \cdot S_i \quad (4.2)$$

где $h_{\text{огр}}$ – максимальная допустимая высота годового намыва на поле.

S_i – площадь i -го сектора поля, м^2 .

Высота намыва одного яруса $h_{\text{яр}}$ составляет 0,5 м.

Данный ограничитель вводится с целью повышения устойчивости сооружения. Таким образом, намыв на участке складирования осуществляется одновременно не на всю высоту намыва за год, а в несколько этапов. Значение этого технологического параметра устанавливают, как правило, около 0,5 м и в случае необходимости складирования минерального сырья на высоту, превышающую значение данного показателя, намыв должен осуществляться поярусно.

Причем между окончанием намыва нижнего яруса и началом намыва последующего яруса должен быть установлен технологический перерыв.

Продолжительность технологического перерыва устанавливается с учетом требований к консолидации намывного массива нижнего яруса. Значение максимально допустимой высоты единовременного намыва и продолжительности технологического перерыва так же требует исследований для каждого отдельного объекта.

Затем рассчитывается объем намываемых хвостов за цикл в пределах одного яруса:

$$V_{\text{яр}} = \frac{V_i}{N_{\text{яр}}} \quad (4.3)$$

где $N_{\text{яр}}$ – количество ярусов намыва, определяемое отношением принятой высоты намыва в год к высоте яруса намыва $N_{\text{яр}} = h_{\text{огр}}/h_{\text{яр}}$

Далее определяется количество выпусков $N_{\text{вып}}$ в каждом секторе исходя из технических параметров хвостохранилища, расстояния между ними и их диаметр.

Так же определяется диаметр магистрального пульпопровода.

Затем рассчитываются площади поперечного сечения выпусков и магистрального пульпопровода по формуле:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} \quad (4.4)$$

Далее следует определить объем хвостов, который можно будет уложить за год:

$$V_{\text{г}} = \sum_{i=1}^n 2V_i \quad (4.5)$$

Объем пульпы за сутки намыва на один сектор будет равен:

$$V_{\text{сут}} = \frac{V_{1\text{в.сут}}}{N_{\text{вып}}} \quad (4.6)$$

Где $V_{1\text{в.сут}}$ - объем пульпы из одного выпуска в сутки;

$N_{\text{вып}}$ – количество выпусков в пределах одного сектора

Чтобы определить время, которое потребуется для намыва одного полного яруса в пределах одного сектора:

$$t_{\text{яр}} = \frac{V_{\text{яр}}}{V_{\text{сут}}} \quad (4.7)$$

Таблица 4.1 Исходные параметры намыва

№ поля	№ сектора	Площадь участков S, м ²	Принятая высота намыва h _{нр} , м	Объем участков V _i , м ³	Пикеты	Расстояние между пикетами, м	Принятая высота яруса намыва h _р , м	Принятое количество ярусов намыва N _{рр} , шт	Объем намыва одного яруса V _{яр} , м ³	Количество выпусков в каждом секторе N _{вып} , шт	Расстояние между выпусками L, м
I поле	1	634436,45	1	634436,45	5-14, 96-108	1800	0,5	2	317218,225	100	18
	2	305490,65	1	305490,65	14-23, 23-25, 25-32', 32'-41'	2700		2	152745,325	100	27
	3	426747,19	1	426747,188	41'-44', 72-78, 78-87, 87-96	2700		2	213373,594	100	27
II поле	4	728976,26	2	1457952,515	25-33', 33'-42', 42'-44', 72-64	3200		4	364488,129	100	32
	5	689924,71	2	1379849,415	64-54, 54-44, 44-34	3000		4	344962,354	100	30

«Так как уже известно по результатам проведенных экспериментов по намыву, что при достижении влажности 20%, плотность хвостов составляет 1,65 г/см³, то воспользуемся этими данными для дальнейших расчетов.

Время консолидации хвостов при известных проектных величинах влажности и плотности определялось по уравнению» [Лолаев., Бадоев и др. 2017-2019; Lolaev, Badoev. et al, 2018, 2019]

$$t = -17,542 - 0,556 \cdot W + 25,141 \cdot \rho$$

В таблице 4.2 представлены значения времени намыва одного полного яруса и консолидации хвостов.

Таблица 4.2 Время намыва и консолидации хвостов

Диаметр выпусков d, м	Площадь поперечного сечения выпусков, м ²	Площадь поперечного сечения магистрали d _м - Ø1 м, м ²	Объем хвостов за год V _г , м ³	Общий объем пульпы за сутки намыва, м ³	Объем пульпы из 1 выпуска за сутки намыва, м ³	Объем пульпы намываемой на участок за сутки V _{в.сут} , м ³	Время намыва одного полного яруса t _р , сут	Требуемая влажность W, %	Требуемая плотность ρ, г/см ³	Время консолидации одного полного яруса t _к , сут
0,1	0,00785	0,785	8408952,4	23972	239,72	23972	14	20	1,65	12
						23972	7			12
						23972	9			12
						23972	16			12
						23972	15			12

4.2.1 Применение сетевого планирования

На основе данных, полученных в таблице 4.2 при последовательном намыве секторов продолжительность намыва составит:

$$(H1+K1)*2+(H2+K2)*2+(H3+K3)*2+(H4+K4)*4+(H5+K5)*4 = \\ = (14+12)*2+(7+12)*2+(9+12)*2+(16+12)*4+(15+16)*4=368 \text{ дней} \quad (4.7)$$

где H – время намыва одного полного яруса, сут.; K – время консолидации одного полного яруса, сут.; *1-5 – номера секторов.

«В то время, как продолжительность намыва на пляж хвостохранилища составляет всего 195 дней, которая определяется из климатических условий региона, т.к. в соответствии с нормативными документами намыв может осуществляться при температуре не ниже -5°C » [Лолаев А.Б., Бадоев А.С., 2016, 2017].

С целью выполнения нормативных требований оптимизация технологического процесса намыва было применено сетевое планирование.

На основании результатов испытаний и значений времени консолидации (Таблица 4.2) был построен сетевой график намыва обеих полей хвостохранилища «Лебяжье» (Рисунок 4.4).

Рассмотрим последовательность намыва хвостохранилища с применением сетевого графика» [Лолаев, Бадоев и др. 2016, 2017; Lolaev, Badoev et. al., 2018, 2019]

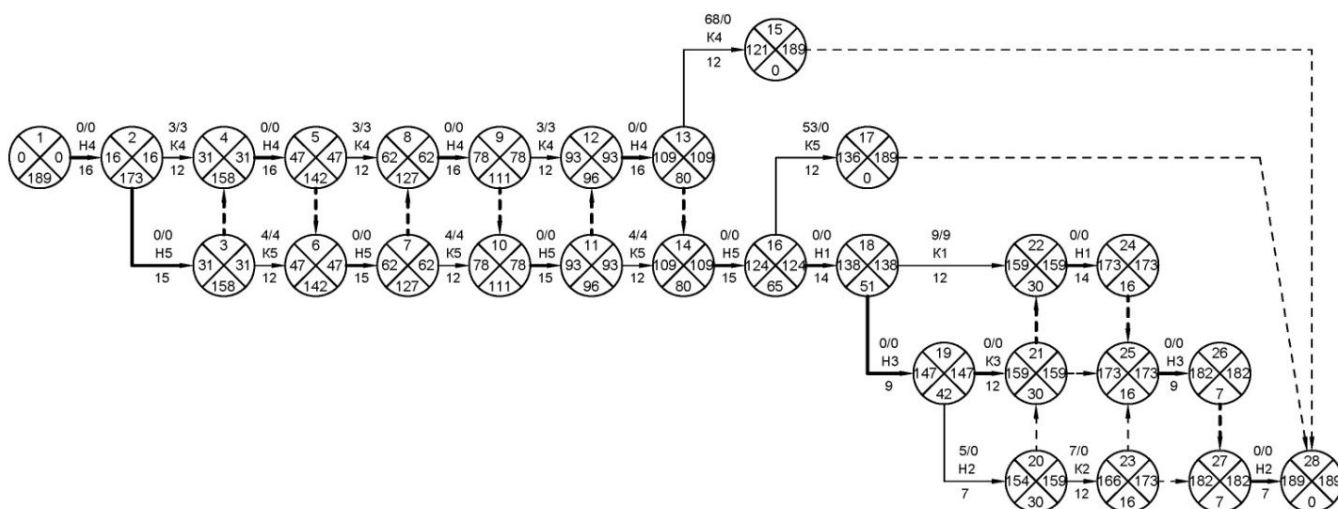


Рисунок 4.3 Сетевой график намыва хвостохранилища.

Намыв предлагается начать с 4-го сектора *H4* так как время, требующееся на его намыв, составляет 16 суток и является наибольшим по продолжительности. После окончания намыва *H4* начинается процесс консолидации *K4*, одновременно с которым намывается *H5* в течение 15 суток. Суть состоит в том, чтобы каждый намыв происходил во время процесса консолидации на том же поле.

Помимо этого, в случае двух полей, рекомендуется проходить все стадии намыва и консолидации на одном поле, а затем переходить на другое, так как в условиях больших расстояний это будет более рациональным и эргономичным.

В результате построения и расчета сетевого графика было определено, что продолжительность критического пути составляет 189 дней, что меньше 195 дней. Это позволяет сделать вывод о том, что весь объем намываемых хвостов будет уложен в требуемые сроки.

Выводы по главе 4

1. Обосновано, что оценка, прогноз и управление параметрами возведения намывных техногенных массивов на основе метода сетевого планирования с учетом консолидационных характеристик твердой фракции осуществляются методами корреляционно-регрессионного анализа при уровне надежности 95%.

2. Результаты натурных испытаний по определению параметров намыва хвостохранилища «Лебяжье» показали достаточно близкую корреляцию с результатами лабораторных испытаний.

3. По результатам физико-математического моделирования и произведена оптимизация параметров возведения техногенного массива с обеспечением устойчивости ограждающих конструкций.

4. Определенные по результатам исследований в лабораторных условиях параметры намыва ограждающей дамбы хвостохранилища

«Лебяжье» ОАО ЗФ «ГМК «Норильский никель» приняты к практической реализации.

5. Предлагаемая методика расчета параметров намыва повышает точность определения технологических параметров формирования намывных техногенных месторождений.

6. Методика обоснования технологических параметров формирования и эксплуатации техногенных месторождений может быть использована горнорудными предприятиями, научно-исследовательскими и проектными организациями, а также в ВУЗах.

Заключение

В диссертации, представляющей собой научно-квалификационную работу, решена актуальная научно-техническая задача инженерно-геологического обоснования параметров намыва геотехнических массивов с учетом консолидационных характеристик техногенных грунтов (хвостов) методом сетевого планирования, что имеет важное народнохозяйственное значение и позволяет обеспечить устойчивость массива, уменьшить затраты на возведение и эксплуатацию такого рода объектов.

Основные научные и практические результаты, выводы и рекомендации:

1. Установлено, что специфика содержания хвостохранилищ на Крайнем Севере определяется сложными природно-климатическими условиями, что в свою очередь вызывает необходимость разработки оригинальных технологий их эксплуатации и методов исследований, обеспечивающих промышленную и экологическую безопасность накопителей и окружающей природной среды.

2. Установлены закономерности формирования физико-механических свойств хвостов в намывных массивах, основные виды микроструктур и типы контактов между структурными элементами, составлена классификация намывных грунтов, которая используется для прогноза технологической и экологической безопасности хвостохранилища

3. Доказано, что физическая модель процесса консолидации твердой фракции при намыве геотехнического массива в условиях криолитозоны регламентирует формирование массива при оптимальном значении влажности 20%.

4. Обосновано, что группы консолидационных характеристик намываемой твердой фракции, определенные при различных значениях влажности и плотности однородны между собой, а различия между парами

групп статистически незначимы, что определяет технологический регламент формирования массива.

5. Доказано, что, намыв геотехнического массива при отрицательных температурах необходимо прекращать за период, равный времени консолидации до наступления температуры -5°C .

6. Предлагаемая методика оптимизации параметров формирования намывных геотехнических массивов является основой уменьшения затрат на возведение и эксплуатацию данных объектов, что и было подтверждено по результатам исследований намыва ограждающей дамбы хвостохранилища «Лебяжье» ПАО ЗФ «ГМК «Норильский никель».

7. Установленные закономерности физико-механических свойств хвостов и методика формирования намывных геотехнических массивов могут быть использованы на горных предприятиях России и других стран, научно-исследовательскими и проектными организациями, а также в ВУЗах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Акопов А. П., Оганесян А. Х., Сумин М. Н. // Технологические пути увеличения емкости хвостохранилища в режиме его эксплуатации. Труды молодых ученых ВНЦ РАН. – 2010. – №3. – с. 88 – 92.
2. Аксенов С.Г. Основные принципиальные положения конструирования ограждающих сооружений хвосто- и шламоохранилищ. // Четвертый международный симпозиум «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях», ВНИИ ВИОГЕМ. Белгород, 1997. – С.144-150.
3. Бадоев А.С., Хадонов З.М. Логистический подход в строительном производстве / Сб. материалов Республиканской научно-техн. конференции СКГМИ (ГТУ) «Пути совершенствования качества строительства промышленных и гражданских зданий и инженерных сооружений». – Изд-во «Терек». – Владикавказ, 2012. – С.32 – 36.
4. Бараз В. Р., Пегашкин В. Ф. Использование MS Excel для анализа статистических данных: учеб. пособие / М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Нижнетагил. техн. ин-т (филиал). – 2-е изд., перераб. и доп. – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2014. – 181 с.
5. Безопасность гидротехнических сооружений на объектах промышленности и энергетики: Сборник документов. Серия 03. Выпуск 1. - 4-е изд., испр. и доп. - М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2010. — 456 с.
6. Биянов Г.Ф., Когадовский О.А., Макаров В.И. Грунтовые плотины на вечной мерзлоте / Якутск, Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН, 1989. - 152 с.

7. Близняк Е.Б. О проектировании и постройке плотин в условиях вечной мерзлоты // Гидротехническое строительство, 1937, №9. С.14-16.
8. Бондарик Г.К., Ярг Л.А. Инженерно-геологические изыскания: Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Поиск и разведка подземных вод и инженерно-геологические изыскания» направления подготовки «Прикладная геология» / Российский гос. геологоразведочный ун-т им. С. Орджоникидзе (РГГРУ). Москва, 2011. (3-е изд.)
9. Бондарик Г.К., Ярг Л.А. Природно-технические системы и их мониторинг // Инженерная геология. 1990. - № 10. - С. 3-9.
10. Бутюгина Л.В. Оценка и прогнозирование экологических аспектов эксплуатации хранилищ хвостов обогащения в криолитовой зоне (на примере норильского промышленного района): Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 25.00.36 / Бутюгина Лариса Витальевна. – Северо-кавказский горно-металлургический институт. – Норильск, 2004. – 127 с.
11. Гальперин А. М. Геомеханика открытых горных работ / М.: Изд. Московского Государственного горного университета. 2003. - 473 с.
12. Гальперин А.М., Дьячков Ю.Н. Природоохранные гидромеханизированные технологии / М.: Недра. 1993. –165 с.
13. Гальперин А.М., Семенова Е.А. Прогноз геомеханических процессов на горных предприятиях на основе теории консолидации породных массивов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2016. – №2. – с. 111 – 120
14. Гальперин А.М., Фёрстер В., Шеф Х. Техногенные массивы и охрана природных ресурсов: Учебное пособие для вузов в двух томах / Москва, 2006.
15. Геотехнические и фильтрационные исследования хвостохранилища на оз. Лебяжьем. Отчет. //ВНИИ «ВОДГЕО», Том 1, М., 1978. – 135 с.

16. Гидротехнические сооружения. Справочник проектировщика. / Под ред. Недриги В. П. – М.: Стройиздат, 1983. -543 с.
17. Головишников В.И., Щетинина А.П. Инженерно-геологический контроль за состоянием массивов хвостохранилищ. // Четвертый международный симпозиум «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях» / ВНИИ ВИОГЕМ. – Белгород, 1998. - С.135-139
18. Гольдин А.Л., Рассказов Л.Н. Проектирование грунтовых плотин / М.: 1987. – 132 с.
19. ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
20. ГОСТ 22733-2016 Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности.
21. ГОСТ 30416-96. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения.
22. Государственный доклад «О состоянии окружающей природной среды Российской Федерации в 1998 году». / М, Государственный центр экологических программ. 1999.
23. Гришин М. М. Гидротехнические сооружения / Т. 2.-М.: Высшая школа, 1979.
24. Гублер Е.В. Вычислительные методы анализа и распознавания патологических последствий / Л.: Медицина, 1978. 296 с
25. Гублер Е.В., Генкин АА. Применение непараметрических критериев статистики в медико-биологических исследованиях / Л.: Медицина, 1973. 142 с.
26. Гулан Е.А. Принципы обеспечения промышленной и экологической безопасности гидротехнических сооружений в криолитозоне (на примере хвостохранилища "Лебяжье")// Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2007. № 2. С. 118-123.

27. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Российской Федерации / НИА-Природа. – Москва, 2006. - 277 с.
28. Дунаева Е.В., Карамушка В.П., Сизова А.О., Иванов В.Г., Кузьмин Е.В. Совершенствование технологии проведения инженерных изысканий на хвостохранилищах переработки урановых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2014. - № 5. - С. 370-376.
29. Ершов Э.Д., Гарагуля Л.С. Основные направления геокриологических исследований на современном этапе. / В кн.: Геокриологические исследования. Под редакцией Ершова Э.Д. –М.: Изд-во МГУ, 1987, с.3-17.
30. Зарецкий Ю. К., Ломбардо В. Н. Статика и динамика грунтовых плотин / Высш. шк., 1991. - 455 с.
31. Захаров В.П. Применение математических методов в социально-психологических исследованиях / Учебное пособие. Л.: ЛГУ, 1985. 64с.
32. Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений.- М: Высш. шк., 1991. - 447 с.
33. Инструкция о порядке ведения мониторинга безопасности гидротехнических сооружений предприятий, организаций, подконтрольных органам Госгортехнадзора России (утв. постановлением Госгортехнадзора РФ от 12 января 1998 г. N 2). - 5 с.
34. Исследование устойчивости ограждающей дамбы в примыкании к участку расширения хвостохранилища Норильского горно-металлургического комбината им А. П. Завенягина. Отчет. /ВНИИ ВОДГЕО. М.: 1976. 144 с.
35. Исследования и разработка инновационных технологий комбинированной переработки и утилизации отходов предприятий цветной металлургии: Отчет о НИР по государственному контракту №16.515.11.5027 от 12.05.2011 г., шифр: «2011-1.5-029-019» (Этап №2) / Лолаев А.Б., Габараев О.З., Воропанова Л.А. – СКГМИ (ГТУ). – Владикавказ. – 2011 г.

36. Исследования и разработка инновационных технологий комбинированной переработки и утилизации отходов предприятий цветной металлургии: Отчет о НИР по государственному контракту №16.515.11.5027 от 12.05.2011 г., шифр: «2011-1.5-029-019» (Этап №3) / Лолаев А.Б., Габараев О.З., Воропанова Л.А. – СКГМИ (ГТУ). – Владикавказ. – 2012 г.

37. Исследования и разработка инновационных технологий комбинированной переработки и утилизации отходов предприятий цветной металлургии: Отчет о НИР по государственному контракту №16.515.11.5027 от 12.05.2011 г., шифр: «2011-1.5-029-019» (Этап №4) / Лолаев А.Б., Габараев О.З., Воропанова Л.А. – СКГМИ (ГТУ). – Владикавказ. – 2012 г.

38. Калишевский В. Н. Намывное гидротехническое сооружение / Патент СССР, а.с.1772312, Е 02 В 9/06, Е 02 D 29/02, заяв.18.01.91г., №4903199/15.

39. Кириченко Ю. В. Геоэкологические аспекты формирования техногенных массивов // Геология и разведка. – 1999. № 6.

40. Кириченко Ю. В., Федорова Ю. Е. // Возведение намывных массивов овражно-балочного типа. Горный журнал, 2002, № 11-12, с. 49.

41. Кроник Я. А. Надежность плотин в районах Крайнего Севера и вечномёрзлых грунтов. В кн. Проблемы механики грунтов и инженерного мерзлотоведения. – М: Стройиздат, 1990. – С. 131-143

42. Кроник Я.А. Анализ аварий и надежности плотин и водохранилищ в криолитозоне // Материалы Первой конференции геокриологов России. Кн. 3. инженерная геокриология. – М., 1996.- С. 246-255.

43. Кроник. Я.А. Аварийность и безопасность природно-техногенных систем в криолитозоне. Материалы Второй конференции геокриологов России. МГУ им. М.В. Ломоносова. 6-8 июня 2001 г. Т. 4. Инженерная геокриология. - М.: изд-во МГУ, 2001.- С. 138-147.

44. КузнеКрасильников Н. А., Иванников В. М., Ефимова Т. А. Способ намыва грунтового сооружения. СССР, а. с. 1368373, Е 02 В 7/06, заяв.11.06.86 г., № 4106212/29-15.

45. Лаушкин Б. А., Дудышкин В. В. Способ возведения хвостохранилища. СССР а.с.855117, Е 02 В 7/06, заяв.11.02.80г., №3880313/29-15.

46. Лолаев А. Б., Акопов А. П., Оганесян А. Х., Сумин М. Н. // Использование геоинформационных систем при разработке технологии намыва дамбы хвостохранилища. // Сборник материалов Международной научной конференции «Информационные технологии и системы». Владикавказ, 2009.

47. Лолаев А. Б., Акопов А. П., Оганесян А. Х., Сумин М. Н. // Моделирование процессов возведения намывных гидротехнических сооружений. Сборник трудов Северо-Кавказского горно-металлургического института (государственного технологического университета), вып. 17, Владикавказ 2010.

48. Лолаев А. Б., Акопов А. П., Оганесян А. Х., Сумин М. Н. // Моделирование процесса намывных гидротехнических сооружений. Труды молодых ученых ВНЦ РАН и Правительства РСО-Алания, № 3, Владикавказ 2011.

49. Лолаев А. Б., Акопов А. П., Оганесян А. Х., Сумин М. Н. // Оптимизация технологии намыва ограждающей дамбы каскадного хвостохранилища. Сборник материалов 5-ой международной научно-практической конференции «Составляющие научно-технического прогресса», Тамбов, 2009, стр. 148-150.

50. Лолаев А. Б., Акопов А. П., Оганесян А. Х., Сумин М. Н. // Прогноз устойчивости ограждающей дамбы хвостохранилища в криолитозоне. Сборник материалов 5-ой международной научно-практической конференции «Глобальный научный потенциал», Тамбов, 2009, стр. 83-86.

51. Лолаев А. Б., Акопов А. П., Оганесян А. Х., Сумин М. Н. // Технология намыва накопителей каскадного типа для отходов горнодобывающей промышленности. Устойчивое развитие горных территорий № 1 (7), 2011, Владикавказ, – с 77-83.

52. Лолаев А. Б., Бутюгин В. В. Геоэкологические проблемы промышленной гидротехники в криолитозоне. / Москва. - Изд-во Недра, 2003 – 282 с.

53. Лолаев А.Б., Акопов А.П., Бадоев А.С. Алгоритм решения задачи по определению параметров возведения намывных накопителей отходов горнодобывающей промышленности/Тезисы Всероссийской конференции «Геодинамика, вулканизм, сейсмичность и экзогенные геологические процессы природного и техногенного характера на Кавказе» – ВНИЦ РАН – Владикавказ, 2014. – С.31 – 32

54. Лолаев А.Б., Акопов А.П., Бадоев А.С. Алгоритм решения задачи по определению параметров возведения намывных накопителей отходов горнодобывающей промышленности/Материалы Всероссийской конференции «Геодинамика, вулканизм, сейсмичность и экзогенные геологические процессы природного и техногенного характера на Кавказе» – ВНИЦ РАН. – Владикавказ, 2015. – С. 271 – 278.

55. Лолаев А.Б., Акопов А.П., Бадоев А.С. Программа расчета технологических параметров намывных сооружений с использованием стандартного пакета Microsoft Office Excel на примере хвостохранилища «Лебяжье» ЗФ ОАО ГМК «Норильский никель»/Сборник статей научно-технической конференции обучающихся и молодых ученых СКГМИ (ГТУ) "НТК-2016". – Владикавказ, 2016. – С. 31 – 33.

56. Лолаев А.Б., Арутюнова А.В., Бадоев А.С., Дзедоев С.О. Изучение физико-химических свойств лежалых хвостов Тырныаузского горно-металлургического комбината (Кабардино-Балкарская республика) методами выделения мономинеральных фракций//Труды СКГМИ (ГТУ) №22. – Владикавказ, 2015. – С. 64 – 71.

57. Лолаев А.Б., Арутюнова А.В., Бадоев А.С., Дзедоев С.О., Илаев В.Э. Изучение физико-химических свойств лежалых хвостов методами выделения мономинеральных фракций/Материалы Всероссийской научной конференции «Геодинамика, вулканизм, сейсмичность и экзогенные геологические процессы природного и техногенного характера на Кавказе» – ВНЦ РАН. – Владикавказ, 2014. – С. 33 – 34.

58. Лолаев А.Б., Арутюнова А.В., Бадоев А.С., Дзедоев С.О., Илаев В.Э. Изучение физико-химических свойств лежалых хвостов методами выделения мономинеральных фракций/Материалы Всероссийской научной конференции "Геодинамика, вулканизм, сейсмичность и экзогенные геологические процессы природного и техногенного характера на Кавказе» – ВНЦ РАН. – Владикавказ, 2015. – С. 311 – 317.

59. Лолаев А.Б., Бадоев А.С., Арутюнова А.В., Айларова В.Г. Технологическое решение устройства дамбы гидротехнического сооружения / Сборник публикаций научного журнала "Chronos" по материалам XXXVI международной научно-практической конференции: «Вопросы современной науки: проблемы, тенденции и перспективы» сборник со статьями (уровень стандарта, академический уровень). – М.: Научный журнал "Chronos ", 2019. – С. 47-51.

60. Лолаев А.Б., Бадоев А.С., Арутюнова А.В., Оганесян Э.Х. Определение времени консолидации хвостов намывных накопителей отходов предприятий горно-металлургической промышленности/Сборник статей научно-технической конференции обучающихся и молодых ученых СКГМИ (ГТУ) "НТК-2016". – Владикавказ, 2016. – С. 33 – 36.

61. Лолаев А.Б., Бадоев А.С., Оганесян А.Х. Алгоритм формирования геотехнического массива с учетом времени консолидации и метода сетевого планирования / Сборник статей 1-ой Всероссийской научно-практической конференции «Современные научно-технические и социально-гуманитарные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации». – Владикавказ, 2019;

62. Лолаев А.Б., Бадоев А.С., Оганесян А.Х., Оганесян Э.Х., Арутюнова А.В., Айларова В.Г., Саргсян М.М., Тваури И.В. Технологическое решение устройства дамбы гидротехнического сооружения / Сборник статей 1-ой Всероссийской научно-практической конференции «Современные научно-технические и социально-гуманитарные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации». – Владикавказ, 2019;

63. Лолаев А.Б., Бадоев А.С., Оганесян Э.Х. Определение времени консолидации хвостов намывных хвостохранилищ//Успехи современной науки – № 1, Том 7. – Белгород. – 2017. – С. 153 – 158.

64. Лолаев А.Б., Бадоев А.С., Оганесян Э.Х. Применение сетевых графиков для оптимизации намыва хвостохранилищ//Успехи современной науки и образования – № 3, Том 6. – Белгород. – 2017. – С. 220 – 224.

65. Лолаев А.Б., Бадоев А.С., Оганесян Э.Х., Кацанов А.З. Повышение устойчивости ограждающей дамбы хвостохранилища при ее эксплуатации / Сборник публикаций научного журнала "Chronos" по материалам XXXVI международной научно-практической конференции: «Вопросы современной науки: проблемы, тенденции и перспективы» сборник со статьями (уровень стандарта, академический уровень). – М.: Научный журнал "Chronos ", 2019. – С. 47-61.

66. Лолаев А.Б., Бадтиев А.Б., Бутюгин В.В., Бадоев А.С. Определение консолидационных характеристик хвостов намывных техногенных месторождений//Устойчивое развитие горных территорий – Том 9, №4 (34). – Владикавказ – 2017. – С. 355 – 361.

67. Лолаев А.Б., Бутюгин В.В. Геоэкологические проблемы промышленной гидротехники в криолитозоне / М Недра 2005 г. 240с.

68. Лолаев А.Б., Бутюгин В.В., Рященко Т.В., Акулова В.В. и др. Оценка и прогноз устойчивости техногенных намывных грунтов в массивах гидротехнических сооружений на базе микроструктурного анализа и моделирования. Отчет о НИР, МАНЭБ. - Норильск, 2000. – 114 с.

69. Лолаев А.Б., Бутюгин В.В., Савченко В.А, Гришаева Л.В, Галишевская В.В. и др. Геоэкологический анализ и оценка состояния гидротехнических сооружений НПП с выдачей рекомендаций по снижению негативного воздействия при их строительстве и эксплуатации. Отчет о НИР, МАНЭБ. - Норильск, 2001, 308 с.

70. Лолаев А.Б., Оганесян А.Х., Бадоев А.С., Оганесян Э.Х. К вопросу установления оптимальных технологических параметров ограждающей дамбы при формировании техногенных месторождений//Сборник научных работ преподавателей и аспирантов СКГМИ (ГТУ): Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – №6 (специальный выпуск 25). – М.: Изд-во Горная книга, 2018 – С. 50 – 58.

71. Лолаев А.Б., Оганесян А.Х., Бадоев А.С., Оганесян Э.Х. Сетевое планирование при оптимизации технологических параметров намыва хвостохранилищ в криолитозоне//Сборник научных работ преподавателей и аспирантов СКГМИ (ГТУ): Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – №6 (специальный выпуск 25). – М.: Изд-во Горная книга, 2018. – С. 125 – 133.

72. Лолаев А.Б., Оганесян А.Х., Бадоев А.С., Оганесян Э.Х. Способ возведения намывной ограждающей дамбы//Патент РФ №2654718. – 2017.

73. Лолаев А.Б., Хулелидзе К.К., Бутюгин В.В., Бадоев А.С. Сетевое планирование для оптимизации технологических параметров процесса намыва хвостохранилищ//Устойчивое развитие горных территорий – Том 9, №3 (33). – Владикавказ. – 2017. – С. 281 – 286.

74. Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований. – Л.: Недра, 1990. – 327 с

75. Маслов Н.Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии / М.: Высшая школа, 1968.

76. Мельник В. Г., Лычагин Е. В., Жабовский В. П., Гришаев А. В. Способ намыва сооружений // Патент СССР, а. с.1583524, Е 02 В 7/06, заяв.11.05.88г., №4422238/23-15.

77. Месяц С.П., Волкова Е.Ю. Обоснование способов сохранения техногенного минерального сырья, складированного в отвалы отходов рудообогащения. // Вестник МГТУ, том 12, №4, 2009. – с.735-741.

78. Мешков В. А. Способ наращивания хвостохранилища // Патент СССР а. с. 1240822, Е 02 В 7/06, заяв.08.01.85г., №3838124/29-15.

79. Микунис В. М., Горюнов С. М., Сагдиев Т. Г., Ткаченко Ю. И., Тригубов Л. Я. Многоярусное намывное шламоохранилище // Патент СССР а. с. 116114, Е 02 В 7/06, заяв.28.03.83г., №3599278/29-15.

80. Мырзахметов М. К., Балтабаев М. Ш., Маслов А. Л. Способ намыва гидротехнического сооружения // Патент СССР, а. с. 1427029, Е 02 В 7/06, заяв.06.03.87 г., №4225365/29-15.

81. Ничипорович А.А. Плотины из местных материалов / М.: Стройиздат, - 1973. – 342 с.

82. Носенко И.А. Начала статистики для лингвистов / М.: Высшая школа, 1981. - 157 с.

83. Огарков А. А., Пантелеев В. Г. Способ возведения намывного сооружения // Патент СССР, а.с.1771498, Е 02 В 7/06, заяв.12.03.91г., №4919234/15.

84. Определение физико-механических свойств отсыпных хвостов ограждающей дамбы хвостохранилища «Лебяжье»: Технический отчет / ОКИЗ «Норильскпроект». Норильск, 1997. - 5 с.

85. Осипов В. И., Соколов В. Н., Румянцева Н. А. Микроструктура глинистых пород/Под ред. академика Е. М. Сергеева.— М.: Недра, 1989.— 211 с.: ил.

86. Отчет о комплексных инженерных изысканиях, выполненных на объекте: хвостохранилище № 2 Норильского горно-металлургического комбината им. А.П.Завенягина / КрасТИСИЗ. – Красноярск, 1991. – 113 с.

87. Паспорт хвостохранилища № 2 на оз. "Лебяжье"./ ЦГТС и ГГ ПООФ. – Норильск, 1999. – 42 с.
88. Перльштейн Г.З. Павленков Д.А. и др. Естественное промораживание отходов рудообогащения // Материалы Второй конференции геокриологов России. МГУ им. М.В. Ломоносова. 6-8 июня 2001 г. Т. 4. / Инженерная геокриология.- М.: изд-во МГУ. 2001.- С. 215-221.
89. Пихтельков Н. В., Шевченко В. Н. Способ возведения хвостохранилища. СССР а.с.1271928, Е 02 В 7/06, заяв. 08.04.85 г., №3880538/29-15.
90. ПНИИИС Госстроя СССР Рекомендации по определению параметров ползучести и консолидации грунтов лабораторными методами, Москва, Стройиздат, 1989 г.
91. Под общ. ред. Недриги В. П.. Г. Железняков, Ю. Ибадзаде, П. Иванов, и др. Справочник проектировщика. Гидротехнические сооружения / М., Стройиздат, 1983.
92. Правила безопасности гидротехнических сооружений накопителей жидких промышленных отходов (ПБ 03-438-02). Серия 03. Выпуск 14/ Колл.авт - М.: ГУП «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России». – 2002.- 128 с..
93. Правила безопасности при эксплуатации хвостовых, шламовых и гидроотвальных хозяйств. ПБ-06-123-96.1997.- 99 с.
94. Проверочный расчет ограждающей дамбы хвостохранилища «Лебяжье» шифр 33016-21 / ЗАО «МЕХАНОБР ИНЖИНИРИНГ», 2008.
95. Проект зимнего намыва хвостохранилища «Лебяжье» на 2008 – 2010 гг.» шифр 33016 – 17 / ЗАО «МЕХАНОБР ИНЖИНИРИНГ», 2008.
96. Проект эксплуатации хвостохранилища "Лебяжье" на 2008-2010 г.г. / ЗАО "Механобр инжиниринг" г. С.- Петербург, 2007.
97. Проект эксплуатации хвостохранилища "Лебяжье" на 1998-2000 гг./ АОЗТ "Механобр инжиниринг". С.-П., 1998. – 108 с.

98. Производство металлов за полярным кругом. Технологическое пособие. / Под общ. редакцией Кайтмазова Н. Г., изд. «Антей лимитед», Норильск, 2007. - 296 с.
99. Прохоров Н. Н., Вагин В. Б., Чуров В. А., Невельсон И. С. // Оценка состояния земляных дамб по результатам геофизических исследований. Горный журнал, 2003, № 7, с. 86.
100. Пустыльник Е.М. «Статистические методы анализа обработки наблюдений», Москва, Наука, 1968 г.
101. Разработка оптимальной технологии намыва ограждающей дамбы хвостохранилища «Лебяжье». Научно-технический отчет, СКГМИ (ГТУ). Том I. Владикавказ, 2010.
102. Разработка оптимальной технологии намыва ограждающей дамбы хвостохранилища «Лебяжье». Научно-технический отчет, СКГМИ (ГТУ). Том II. «Отчет о патентных исследованиях», Владикавказ, 2010.
103. Разработка оптимальной технологии намыва ограждающей дамбы хвостохранилища "Лебяжье" Научно-технический отчет. СКГМИ (ГТУ) Том I. 2010
104. Разработка оптимальной технологии намыва ограждающей дамбы хвостохранилища "Лебяжье" Научно-технический отчет. СКГМИ (ГТУ) Том II. 2010
105. Разработка постоянно действующей математической модели хвостохранилища «Лебяжье», с накопительной базой данных о фактическом состоянии и контролем устойчивости и безопасности хвостохранилища. / Норильский индустриальный институт. Норильск, 2003. 107 с.
106. Разработка технологии опережающего наращивания ограждающей дамбы хвостохранилища «Лебяжье» / Норильский индустриальный институт, Норильск, 2000. – 193 с.
107. Результаты гидрогеологических и инженерно-геологических работ на хвостохранилище «Лебяжье». Отчет. /ПГП "Норильскгеология". Талнах. 1999. 17 с.

108. Рекомендации по проектированию и строительству шламонакопителей и хвостохранилищ металлургической промышленности / ВНИИ ВОДГЕО. - М.: Стройиздат, 1986.-128 с.
109. Розанов Н.Н. Плотины из грунтовых материалов. - М.: 1983. – 367 с.
110. Рошупкин А. В. Способ намыва грунтового сооружения. СССР, а. с. 1479567, Е 02 В 7/06, заяв.26.06.87г., №4268508/29-15.
111. Рошупкин А. В., Кузнецов Ю. М., Пименов В. Т., Пеняскин Т. И., Степанов Г. П., Будько И. П., Адрианов Г. Ф. Способ намыва грунтового сооружения. СССР а.с.1523640, Е 02 D 17/18, заяв.11.06.78г., №4278504/23-03.
112. Рунион Р. Справочник по непараметрической статистике / М.: Финансы и статистика, 1982. 198 с
113. Рященко Т.Г. и Акулова В.В. Грунты юга Восточной Сибири и Монголии. Новосибирск: СО РАН, 1998. – 156 с.
114. Рященко Т.Г. Региональное грунтоведение (Восточная Сибирь). Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2010. – 287 с.
115. Рященко Т.Г., Акулова В.В. Проблемы лессоведения юга Восточной Сибири и сопредельных территорий (опыт регионального анализа) // Лессовые просадочные грунты: исследования, проектирование и строительство. Докл. плен. заседания Международной научн.-практ. конф. – Барнаул, 1997. – С. 26-45.
116. Рященко Т.Г., Вашестюк Ю.В. Сравнительный анализ параметров микроструктуры глинистых и лессовых грунтов (программа «стандартная статистика»)// ВЕСТНИК ИрГТУ №9 (56), 2011. – С.64-72.
117. Саратов И. Е., Камышник С. С., Осадчий К. Ф., Фрадлин З. М. Способ возведения хвостохранилища // Патент СССР, а. с.15503032, Е 02 В 7/06, заяв.15.04.88 г., №15503032.
118. Семенова Е. А. Совершенствование методов оценки уплотняемости и несущей способности отвальных массивов

тонкодисперсных отложений: автореферат диссертации к.т.н.: 25.00.22 / Семенова Евгения Анатольевна. – Москва, 2016. – 24 с.

119. Сидоренко Е. В. Методы математической обработки в психологии / СПб.: ООО «Речь», 2000. — 350 с.

120. СНиП 2.02.02.85. Основания гидротехнических сооружений. / Госстрой СССР, 1986.- 48 с.

121. СНиП 2.02.02.85.* Основания гидротехнических сооружений. /Москва, 2011.- 114 с.

122. СНиП II-50-74. ч.II. Гидротехнические сооружения речные. Основные положения проектирования. / Госстрой СССР, 1986.- 48 с.

123. Типовая инструкция по эксплуатации хвостовых хозяйств обогатительных фабрик / Минчермет СССР, Минцветмет СССР, Минхимпром СССР, 1976.

124. Ухов С. Б., Семенов В. В., Знаменский В. В., Тер-Мартirosян З. Г., Чернышев С. Н. Механика грунтов. Основания и фундаменты / Изд. АСВ Москва, 1994.

125. Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений» (в ред. Федеральных законов от 10.01.2003 N 15-ФЗ, от 22.08.2004 N 122-ФЗ, от 09.05.2005 N 45-ФЗ, от 18.12.2006 N 232-ФЗ, от 14.07.2008 N 118-ФЗ, от 30.12.2008 N 309-ФЗ, от 27.12.2009 N 374-ФЗ, от 27.07.2010 N 226-ФЗ, от 18.07.2011 N 243-ФЗ, от 18.07.2011 N 242-ФЗ, с изм., внесенными Федеральными законами от 27.12.2000 N 150-ФЗ, от 30.12.2001 N 194-ФЗ, от 24.12.2002 N 176-ФЗ, от 23.12.2003 N 186-ФЗ).

126. Хадонов З. М. Математические методы управления строительством. Монография / Владикавказ, Терек, 2010. – 286 с.

127. Хадонов З. М. Организация, планирование и управление строительным производством: Учебник / Москва. – Издательство АСВ, 2010. – 560 с.

128. Хадонов З.М., Хадонова Т.К., Бадоев А.С. Управление материальными потоками в строительстве на основе логистического подхода

// Сборник научных трудов СОО АН ВШ РФ. – Владикавказ, 2011. – С. 125 – 128.

129. Цытович Н. А. Механика грунтов (краткий курс): учебник для вузов. - 3-е изд., доп.- М.: Высш. школа, 1979.- 245 с.

130. Цытович Н.А. К вопросу расчета фундаментов сооружений, возводимых на вечной мерзлоте // Научно-исследовательские работы Гиромеза. – Л., 1928, вып. 2. - 67 с.

131. Цытович Н.А. Лекция по расчету фундаментов в условиях вечной мерзлоты / Л., Изд-во Ленинградского института сооружений, 1933, 54 с.

132. Цытович Н.А., Тер-Мартirosян З.Г. Основы прикладной геомеханики в строительстве / Высшая школа, Москва, 1981 г.

133. Цытович Н.А., Ухова Н.Б., Ухов С.Б. Прогноз температурной устойчивости плотин из местных материалов на вечномерзлых грунтах / Л., Стройиздат, 1972. – 142 с.

134. Чугаев Р.Р. Земляные гидротехнические сооружения. – Л.: "Энергия", 1967. – 365 с.

135. Чуянов Г.Г. Хвостохранилища и очистка сточных вод: Екатеринбург: Изд. УГГГА, 1998. - 246 с.

136. Шкода В.С. Применение математического аппарата при решении технологических проблем гидронамыва // Дни науки 2000. Сборник тезисов докладов научно-технической конференции. / Норильский индустр. ин-т. Норильск, 2000.

137. Щёкина М.В. Оценка долговременной устойчивости отсечной дамбы хвостохранилища Михайловского гока // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2006. - Т. 8. - № 1. - С. 332-335.

138. Щекина М.В., Салтанова Е.А., Ермолов А.В. Совершенствование методики и технических средств натурных исследований техногенных массивов / доклад на симпозиуме «Неделя горняка -2001». – МОСКВА. МГГУ - 29 января - 2 февраля, 2001 г.

139. Яковлев А.О. Геоморфологические условия промплощадки и города Норильского промышленного района и учет геоморфологических особенностей площадок при инженерно-геологических изысканиях. Отчет. /Инст. «Норильскпроект». - Норильск, 1989. – 133 с.

140. Яковлев А.О., Маркович Р.Я., Королева С.В. Гидрогеологические исследования на Талнахском и Ергалахском месторождениях подземных вод с переоценкой запасов на участках действующих водозаборов (по состоянию на 1.01.97) Заключительный отчет./ РАО "Норильский никель", АО "Норильский комбинат", Управление геологических работ, Норильская комплексная ГРЭ. Пояснительная записка. Норильск. 1997.- 234 с.

141. Akopov A.P., Tuskaeva Z.R., Badoev A.S. “Logistic Approach to the Optimization of the Inwash Technology of the Cascade Tailing Dump Levee in Permafrost Region” Proceedings of 2-nd International Conference "Geotechnics for Sustainable Development", Hanoi, VIETNAM. 2013. Pp.773 – 777.

142. Dzeboev S.O., Lolaev A.B., Badoev A.S., Arutiunova A.V., Ilaev V.E. Determination of the Tails Consolidation Parameters of Alluvial Tailings Dump in Permafrost Region Proceedings of 1st International Conference on Natural hazards & Infrastructure Chania, GREECE 2016.

143. Ford L. R. Network flow theory / Rand corp., 1956

144. Ford L. R., Fulkerson D. R., Maximal flow through a network. / Canadian J. of Math., VIII, 1956

145. Greene J., D'Olivera M. Learning to Use Statistical Tests in Psychology: a Student's Guide. Milton Keynes Philadelphia, Open University Press, 1989.180 p.

146. <http://npp-geotek.ru/catalog/products/131/9>

147. Krauth J. Distribution - Free Statistics: An Application-Oriented Approach. Amsterdam, 1988.381 p.

148. Kruskal W.H., Wallis W.A. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. Journal of the American Statistical Association, 47 (1952), P. 583-621, and 48 (1953), P. 907-911.

149. Lolaev A. B., Butiugin V. V., Akopov A. P., Oganessian A. Kh., Sumin M. N. Forecasting of the stability of the tailing dam in permafrost region on the basis numerical methods. Proceedings of 7 th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering. «Numge – 2010», Trondheim, Norway 2010.

150. Lolaev A. B., Butiugin V. V., Akopov A. P., Oganessian A. Kh., Sumin M. N. Geoecological problems and technological ways of the tailing dump capacity increasing in permafrost region. Extended abstracts of 11th International Association for Geology and the Environment, New Zealand, 2010, - p. 533.

151. Lolaev A. B., Butiugin V. V., Akopov A. P., Oganessian A. Kh., Sumin M. N. Geoecological problems and technological ways of the tailing dump capacity increasing in permafrost region. Proceedings of 11th International Association for Geology and the Environment, New Zealand, 2010, (CD edition).

152. Lolaev A. B., Butiugin V. V., Akopov A. P., Oganessian A. Kh., Sumin M. N. Optimization of the inwash technology of the cascade tailing dump levee in permafrost region. Proceedings of 7 th International Congress on Environmental Geotechnics. New Delhi, India, 2010, - pp. 509 - 517.

153. Lolaev A. B., Butiugin V. V., Akopov A. P., Oganessian A. Kh., Sumin M. N. The tailing dump capacity increasing in a mode of operation in permafrost region. Extended abstracts of 11th Asian Regional Congress, Hong Kong, China, 2011.

154. Lolaev A. B., Butiugin V. V., Akopov A. P., Oganessian A. Kh., Sumin M. N. The tailing dump capacity increasing in a mode of operation in permafrost region. Proceeding of 11th Asian Regional Congress, Hong Kong, China, 2011, (CD edition).

155. Lolaev A.B., Badoev A.S., Arutiunova A.V., Dzeboev S.O., Ilaev V.E., Georgetti G.B. Definition of tailings consolidation parameters to optimize the inwash technology of the tailing dump levee/Proceedings of XVIII Brazilian Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering "The Sustainable Future of Brazil goes through our Minas" COBRAMSEG 2016, Belo Horizonte, BRAZIL, 2016.

156. Lolaev A.B., Badoev A.S., Oganessian A.Kh. Application of numerical methods for the optimization of the technological parameters of the tailing dam alluvium in permafrost region/Proceedings of 2-nd International Seminar “Numerical Analysis in Geotechnics” NAG2018, Ho Chi Minh City, Vietnam, 2018. (CD-edition).

157. Lolaev A.B., Oganessian A.Kh., Badoev A.S., Oganessian E.Kh. Geotechnical modelling of technological parameters of the tailing dam alluvium Proceedings of 4-th International Conference on “Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development” GEOTEC (Hanoi, Vietnam, 2019).

158. Lolaev A.B., Oganessian A.Kh., Badoev A.S., Oganessian E.Kh. Methodology of the estimated monitoring for the tailings dam stability. Proceedings of 3-rd International Conference on Information Technology in Geo-Engineering (ICITG2019). Guimaraes, Portugal, 2019. Pp. 644-653;

159. Lolaev A.B., Oganessian A.Kh., Badoev A.S., Oganessian E.Kh. The Algorithm of Geotechnical Massif Forming Considering the Consolidation Time and Network Planning Method. Proceedings of 2-nd Conference of the Arabian Journal of Geosciences (CAJG). Sousse, Tunisia, 2019;

160. McCall R. Fundamental Statistics for Psychology. N.Y., Harcont, Brace E. World. 1970., 418p.

161. Welkowitz J., Ewen R.B., Cohen J. Introductory Statistics for the Behavioral Sciences. - 3-d Ed. - N.Y. etc., Academic Press, 1982. 372 p.