

*На правах рукописи*

**Астапенко Татьяна Сергеевна**



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ ФОРМИРОВАНИЯ  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
И ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ОТРАБОТАННЫХ  
ШЛАМОХРАНИЛИЩ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ  
ОТВАЛЬНОЙ МАССЫ**

*Специальность 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика*

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

Санкт-Петербург – 2025

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

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, доцент

*Карасев Максим Анатольевич*

**Официальные оппоненты:**

*Бахаева Светлана Петровна*

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», кафедра маркшейдерского дела и геологии, профессор;

*Кашников Юрий Александрович*

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», кафедра маркшейдерского дела, геодезии и геоинформационных систем, заведующий кафедрой.

**Ведущая организация** – акционерное общество «Научно-исследовательский центр «Строительство», г. Москва.

Защита диссертации состоится **22 сентября 2025 г. в 13:00** на заседании диссертационного совета ГУ.7 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1163**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 22 июля 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



АФАНАСЬЕВ  
Павел Игоревич

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность темы исследования**

Увеличение объемов отходов горного производства, в частности калийной промышленности, обуславливает необходимость рационального использования существующих территорий, поскольку возможности отвода новых участков для их складирования ограничены. В этих условиях повторное использование площадей отработанных шламохранилищ становится приоритетной задачей, направленной на рациональное природопользование. Формирование новых геотехнических систем за счёт отсыпки сухих отходов на слабые, нестабилизированные основания из глинисто-солевых шламов сопряжено с целым рядом сложных геомеханических процессов.

Среди основных проблем при формировании отвальной массы на грунтах низкой прочности, представленными глинисто-солевыми шламами, стоит выделить следующие: склонность к существенному деформированию под весом отвальной массы; данный грунт является средой с переменной динамической вязкостью; консолидация может занять длительное время, что в дальнейшем способно привести к осадкам после окончания формирования геотехнических сооружений; нагрузка от формируемого отвала приводит к образованию избыточного порового давления, которое может явиться причиной развития негативных геомеханических процессов и существенно повлиять на устойчивость геотехнической системы; грунт низкой прочности не проявляет линейной зависимости между напряжением и деформацией, данная зависимость является нелинейной.

Отмечено, что при отсыпке пород на грунты низкой прочности наблюдается существенная деформация, вплоть до внедрения сухих пород в них. Понимание того, как данный грунт реагирует на нагрузки, имеет ключевое значение для обеспечения безопасности геотехнических систем.

Оценка устойчивости отвальной массы, формируемой на слабых основаниях, является неотъемлемой частью геотехнического проектирования. Для этого необходимо учесть особенности деформирования и влияние физического состояния на их механические характеристики.

Существующие методики расчета устойчивости таких сооружений не в полной мере отвечают геомеханическому состоянию, которое характерно для оснований таких сооружений. Ввиду этого, проблема формирования сооружений на слабых основаниях и их длительная устойчивость приобретают особую актуальность в связи с возникающими деформациями на объектах.

#### **Степень разработанности темы исследования**

Исследованиям в области научных знаний о механике грунтов, в том числе поведении грунтов низкой прочности и свойствах водонасыщенных глинистых грунтов уделяют внимание как отечественные, так и зарубежные ученые, среди них: М. Ю. Абелев, Л. С. Амарян, В. М. Гольдштейн, Р. Э. Дашко, Р. С. Зиангиров, Ю. Н. Малиушицкий, С. Р. Месчан, В. И. Осипов, Г. Б. Поспехов, А. Я. Рубинштейн, В. Н. Соколов, A. Casagrande, A. W. Skempton, H. F. Schweiger, W. F. Van Impe, R. D. Verastegui Flores.

Вопросами разработки нелинейных моделей деформирования геоматериалов посвящены исследования: С. Г. Ашихмина, А. А. Баряха, А. О. Ермашова, Ю. А. Кашникова, С. А. Константиновой и др.

Проблемам устойчивости геотехнических сооружений на грунтах различной природы, охватывающих механику глинистых грунтов, поведение вечномёрзлых, водонасыщенных и техногенных оснований, посвящены труды С. П. Бахаевой, А. М. Гальперина, Н. А. Кутеповой, Ю. И. Кутепова, И. И. Попова, Е. В. Федоренко, Г. Л. Фисенко, П. С. Шпакова, A. W. Bishop, J. M. Duncan, N. Janbu, N. Tamashkovich, E. Spenser, S. G. Wright.

Развитие хвостовых хозяйств калийных предприятий, в том числе при складировании отходов обогащения, описано в работах Б. А. Борзаковскового, А. А. Кологривко, М. И. Русакова, А. Д. Смычника и др.

Однако задачи, связанные с установлением механизма деформирования глинисто-солевых шламов, прогнозом изменения конфигурации слабых оснований при отсыпке на него сыпучих сред и оценкой устойчивости сформированной геотехнической системы изучены не в полной мере и остаются особо актуальными по сей день.

**Объект исследования** – геотехническая система «слабое основание - отвальная масса», формируемая при отсыпке сухих пород на глинисто-солевые шламы.

**Предмет исследования** – изменение напряженно-деформированного состояния геотехнической системы «слабое основание - отвальная масса».

**Цель работы** – повышение геомеханической безопасности отработанных шламохранилищ при формировании отвальной массы, за счет совершенствования прогнозирования напряженно-деформированного состояния и оценки устойчивости геотехнических систем с учетом внедрения сухих пород в глинисто-солевые шламы.

**Идея** заключается в том, что оценка устойчивости отвала, отсыпаемого на слабые водонасыщенные глинистые породы, должна выполняться с учетом изменений их конфигурации, а также напряженно-деформированного состояния, вызванных внедрением сухих пород, которые определяются на основании применения связной Лагранж-Эйлеровой постановки.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Изучение механических свойств глинисто-солевых шламов в лабораторных условиях и характера их деформирования на стендовом оборудовании.

2. Обобщение данных лабораторных исследований, выбор и обоснование модели деформирования глинисто-солевых шламов.

3. Разработка методики прогноза напряженно-деформированного состояния основания, сложенного слабыми глинистыми материалами, при отсыпке на них сухих пород.

4. Оценка влияния характера внедрения сухих пород в слабое основание на его напряженно-деформированное состояние и устойчивость системы «слабое основание-отвальная масса».

5. Разработка методики прогноза устойчивости системы «слабое основание – отвальная масса» с учетом ожидаемого характера внедрения сухих пород в основание.

### **Научная новизна работы:**

1. Установлена зависимость влияния характера внедрения пород в слабое основание на устойчивость системы «слабое основание-отвальная масса».

2. Установлено, что слабое основание на стадии внедрения в него отвальной массы необходимо рассматривать как вязко-пластическую среду с переменной вязкостью, а на стадии расчета устойчивости как упругопластическую среду, параметры которой определяются с учетом его фактического физического состояния.

### **Соответствие паспорту специальности**

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.8.6. Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика по пунктам 5 и 6.

### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

1. Разработаны теоретические положения расчета устойчивости отвалов, отсыпаемых на слабое основание, представленное глинисто-солевыми шламами, с учетом внедрения сухих пород и последующего изменения конфигурации слабого основания.

2. Разработана методика оценки устойчивости отвалов, отсыпаемых на слабое основание.

3. Результаты диссертационной работы отражены в свидетельстве о государственной регистрации базы данных № 2023621969 «База данных физико-механических свойств отходов калийного производства» от 16.06.2023.

4. Результаты диссертационной работы рекомендованы к внедрению при разработке проекта организации складирования соляных отходов обогащения руды, получаемых при разработке соляных месторождений и применены в проектной деятельности ООО «СПб - Гипрошахт», что подтверждается актом внедрения от 10.12.2024.

**Методология и методы исследования.** При выполнении исследования применялся комплексный подход, включающий лабораторные исследования по изучению физико-механических свойств глинисто-солевых шламов, стендовые испытания и численное моделирование напряженно-деформированного состояния.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Сопротивление недренированному сдвигу глинисто-солевых шламов, определяется особенностью сформированного напряженно-деформированного состояния, при этом величина прочности определяется через значения плотности по линейной зависимости, а сама плотность как функция от средних напряжений определяется по логарифмической зависимости с натуральным основанием.

2. Характер деформирования глинисто-солевых шламов при отсыпке на них отвальной массы определяется особенностью ее внедрения, связанной с вязко-пластическим поведением глинисто-солевых шламов, а также формированием необратимых объемных деформаций слабого основания в процессе его консолидации.

3. Устойчивость отвалов, отсыпаемых на слабое основание из глинисто-солевых шламов, зависит от интенсивности внедрения сухих пород, степень влияния которого на устойчивость зависит от конфигурации отвала, мощности слабого основания и прочностных характеристик отходов.

**Степень достоверности результатов исследования** обусловлена проведением экспериментальных исследований по утвержденным методикам, позволивших получить физико-механические характеристики глинисто-солевых шламов, и выполнением численного моделирования напряженно-деформированного состояния геотехнической системы с использованием экспериментально полученных параметров и с сопоставлением полученных данных с результатами работ других исследователей.

**Апробация результатов** диссертации проведена на 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 4 международных: XXI Международная научно-практическая конференция «Современные методы и технологии управления социально-экономическими и инженерными системами и процессами» (г. Минск, 2022 г.), XXXI Международный научный Симпозиум «Неделя Горняка-2023» (г. Москва, 2023 г.), XI Международная научно-практическая конференция «Инновационные направления в проектировании горнодобывающих предприятий» (г. СПб, 2024 г.), Международная научно-практическая конференция «Фундаментальные и прикладные аспекты развития современной науки» (г. Уфа, 2025 г.).

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач исследования; анализе зарубежных и отечественных литературных источников по оценке механического поведения грунтов низкой прочности и способам численного моделирования прогноза напряженно-деформированного состояния геотехнических сооружений, формируемых на грунтах низкой прочности; проведении лабораторных экспериментов, выполнении обработки и анализа полученных результатов в ходе испытаний; подборе параметров для численного моделирования и проведении численного моделирования; разработке рекомендаций для методики оценки устойчивости отвалов, формируемых на грунтах низкой прочности; апробации результатов исследований на научных конференциях; написании научных публикаций по теме диссертации.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях – в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus). Получено 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных.

**Структура работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения и библиографического списка. Содержит 142 страницы машинописного текста, 73 рисунка и 12 таблиц и список литературы из 123 наименований и 2 приложений.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н., доценту М. А. Карасеву за неоценимую помощь, всестороннюю поддержку и ценные советы; к.г.-м.н. Г. Б. Поспехову за помощь в ходе выполнения исследований. Особую признательность автор выражает преподавателям и сотрудникам кафедры строительства горных предприятий и подземных сооружений Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за советы и рекомендации; сотрудникам научного центра геомеханики и

проблем горного производства Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II за содействие в проведении экспериментов.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен анализ научных исследований, посвященный механическому поведению грунтов низкой прочности, развитию геомеханических процессов при формировании и эксплуатации отвалов на грунтах низкой прочности. Рассмотрены основные модели деформирования грунтов низкой прочности.

**Во второй главе** представлены результаты лабораторных исследований механических и деформационных характеристик глинисто-солевых шламов. Определены сопротивление недренированному сдвигу на образцах с различной влажностью и степенью уплотнения, угол внутреннего трения и коэффициент сцепления образцов под разными нормальными нагрузками, проанализированы механизмы совместного деформирования сыпучего материала и образцов глинисто-солевых шламов и перераспределения напряжений в сформированной геотехнической системе. Получены результаты деформирования отходов обогащения. Установлены математические зависимости сопротивления недренированному сдвигу от плотности глинисто-солевых шламов, а также закономерности изменения плотности глинисто-солевых шламов под воздействием прикладываемой нагрузки. Выявленные зависимости послужили основой для выбора моделей деформирования.

**В третьей главе** представлена методика прогноза напряженно-деформированного состояния с учетом внедрения сухих пород в глинисто-солевые шламы. Представлены расчетные схемы, позволяющие учесть влияние внедрения сухих пород в слабое основание. Выполнен выбор метода численного моделирования напряженно-деформированного состояния глинисто-солевых шламов при внешнем воздействии от складирования отвальной массы. Проведен комплекс расчетов для установления влияния параметров рассматриваемой

геотехнической системы «слабое основание – отвальная масса» на ее устойчивость, включая конфигурацию слабого основания, характеристик грунта низкой прочности, а также свойств нижележащего слоя основания, на котором располагались глинисто-солевые шламы. Получены результаты коэффициента запаса устойчивости на моделях, учитывающих внедрение сыпучей среды в слабое основание и без учета внедрения пород.

**В четвертой главе** представлена методика оценки устойчивости геотехнической системы «слабое основание – отвальная масса». Выполнен анализ результатов моделирования с целью идентификации поверхностей скольжения. Выведен поправочный коэффициент, позволяющий учесть влияние внедрения сухих пород на коэффициент запаса устойчивости системы «слабое основание – отвальная масса».

**В заключении** сформулированы основные научные и практические выводы по работе.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Сопротивление недренированному сдвигу глинисто-солевых шламов, определяется особенностью сформированного напряженно-деформированного состояния, при этом величина прочности определяется через значения плотности по линейной зависимости, а сама плотность как функция от средних напряжений определяется по логарифмической зависимости с натуральным основанием.**

Глинисто-солевые шламы представляют собой вязкую жидкость при малых величинах плотности с постепенным переходом к слабосвязанному дисперсному материалу при последующем увеличении плотности.

В связи с тем, что грунты низкой прочности в виде глинисто-солевых шламов не поддаются уплотнению в естественных условиях и склонны к накоплению избыточного порового давления, геотехническая система «слабое основание – отвальная масса» классифицируется как недренированная. Поэтому для оценки механических характеристик данных грунтов, используется сопротивление недрениро-

ванному сдвигу, которое в качестве начальной прочностной характеристики с наибольшей сходимостью отражает реальное поведение текучих и текучепластичных грунтов.

Для оценки прочностных и деформационных характеристик глинисто-солевых шламов при различном их физическом состоянии был разработан алгоритм исследования (рисунок 1) и выполнены специальные лабораторные эксперименты для установления связи между сдвиговой прочностью и плотностью образцов двух месторождений калийных солей (таблица 1).

Соппротивление недренированному сдвигу определялось с помощью метода вращательного среза. Плотность образцов глинисто-солевых шламов определялась методом режущего кольца. Перед измерением плотности каждый образец глинисто-солевых шламов двух месторождений калийных солей подвергался серии нагрузок в приборе предварительного уплотнения, которые моделировали естественные процессы уплотнения грунта под нагрузкой. Образцы уплотнялись поэтапно с нагрузками в 25, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 500 и 600 кПа. Для проведения уплотнения каждый образец помещался в кольцо, предназначенное для уплотнения, между фильтрующими прокладками для равномерного распределения давления; после чего задавалась необходимая нагрузка на каждую секцию. Приложение нагрузки осуществлялось ступенями, интервал между которыми устанавливался в 10 минут для стабилизации образца и сохранения его структуры; уплотнение образцов выполнялось в течение двух суток, после чего производились измерения их плотности.

По результатам проведенных исследований были построены графики зависимостей сопротивления недренированному сдвигу ( $C_u$ ) от плотности глинисто-солевых шламов ( $\rho$ ), представленных на рисунках 2а и 2б, и плотности глинисто-солевых шламов ( $\rho$ ) от прилагаемой нагрузки ( $P$ ) на рисунках 3а и 3б для образцов, полученных с двух месторождений калийных солей. По каждому графику были выведены уравнения зависимостей. Как видно из графиков, зависимость между показателями «Соппротивление недренированному сдвигу» и «Плотность грунта» хорошо коррелирует с прямой линейной зависимостью, так как значения экспериментальных точек распределены близко к линии тренда такого вида. Повышение показателя плотности

сопровождается увеличением структурных связей между частицами, что в свою очередь повышает сопротивление внешним нагрузкам. Полученные данные можно аппроксимировать математической зависимостью, которая выражается линейными уравнениями 1 и 2 между параметрами «Сопротивление недренированному сдвигу» и «Плотность грунта» месторождения №1 и месторождения №2 соответственно и имеют следующий вид:

$$C_u = 161,96 \cdot p - 202,32; \quad (1)$$

$$C_u = 344,04 \cdot p - 577,03, \quad (2)$$

где  $C_u$  – сопротивление недренированному сдвигу, кПа;  $p$  – плотность глинисто-солевых шламов, г/см<sup>3</sup>.

Для выведенных уравнений 1 и 2 справедливы следующие диапазоны  $C_u$ : для первого уравнения значения  $C_u$  варьируются от 2,2 кПа до 67,1 кПа, для второго уравнения – в диапазоне от 35,8 кПа до 124,1 кПа. Значения среднеквадратичного отклонения полученных регрессионных уравнений составляет 2,13 кПа и 2,56 кПа соответственно.

На рисунке 3 представлена зависимость параметров «Плотность грунта» от «Давление уплотнения». Данная зависимость может быть аппроксимирована логарифмической функцией с натуральным основанием, которая описывается уравнениями 3 и 4 для месторождений №1 и №2 соответственно:

$$p = 0,125 \cdot \ln(P) + 0,838; \quad (3)$$

$$p = 0,0802 \cdot \ln(P) + 1,527, \quad (4)$$

где  $p$  – плотность глинисто-солевых шламов, г/см<sup>3</sup>;  $P$  – приложенная нагрузка на образцы глинисто-солевых шламов, кПа.

Для выведенных уравнений 3 и 4 справедливы следующие диапазоны  $p$ : для первого уравнения значения  $p$  варьируются от 1,27 г/см<sup>3</sup> до 1,66 г/см<sup>3</sup> при нагрузках от 100 до 600 кПа, для второго уравнения при такой же изменчивости нагрузок – в диапазоне от 1,77 г/см<sup>3</sup> до 2,03 г/см<sup>3</sup>. Значения среднеквадратичного отклонения полученных регрессионных уравнений составляет 0,04 г/см<sup>3</sup> для двух уравнений.

Полученные уравнения имеют практическую значимость для количественного задания сопротивления недренированному сдвигу глинисто-солевых шламов и позволяют прогнозировать изменение структуры грунта под действием внешней нагрузки.

Для определения прочностных и деформационных характеристик глинисто-солевых шламов были проведены эксперименты с помощью методов компрессионного сжатия и одноплоскостного среза, представленные на рисунках 4 и 5, которые являются основой для численного моделирования напряженно-деформированного состояния геотехнической системы, а также понимания механического поведения глинисто-солевых шламов.

**2. Характер деформирования глинисто-солевых шламов при отсыпке на них отвальной массы определяется особенностью ее внедрения, связанной с вязко-пластическим поведением глинисто-солевых шламов, а также формированием необратимых объемных деформаций слабого основания в процессе его консолидации.**

На основании выполненных стендовых исследований деформирования глинисто-солевых шламов при отсыпке сухих пород выявлен эффект интенсивного их внедрения (рисунок 6), что существенно меняет конфигурацию основания, сложенного глинисто-солевыми шламами. Взаимодействие сухих пород отвальной массы и глинисто-солевых шламов развивается через два принципиально различных деформационных механизма. Где первый этап деформирования определялся процессом внедрения сухих пород за счет развития пластических деформаций формоизменения слабого основания, представленного глинисто-солевыми шламами, без изменения или с очень незначительным изменением их объема (рисунок 7). На втором этапе прогнозировалось деформирование шламового основания в результате развития консолидации. Вязкопластичность глинисто-солевых шламов проявляется в способности грунта одновременно воспринимать и упругие и длительно текущие пластические деформации под действием нагрузок, при этом скорость деформаций зависит не только от величины нагрузки, но и от времени её приложения. Под нагрузкой от отсыпаемых сухих пород происходит локальное перераспределение напряжений в толще глинисто-солевых шламов, которое сопровождается увеличением порового давления, рассеивание которого может продолжаться длительное время, и инициированием внутренних пластических деформаций, сопровождающихся выдавли-

ванием глинисто-солевых шламов. Численное моделирование выполнялось с помощью связного метода Лагранжа-Эйлера (метод CEL), который применяется для задач с нелинейным характером деформирования и при значительных деформациях (рисунок 8). Лагранжевыми телами задавались отсыпаемые породы, представленные жёстким, практически недеформируемым материалом, поведение которого описывалось упругопластической моделью с высокими модулями упругости. Эйлеровская область соответствовала шламовому основанию и была полностью заполнена исходным вязкопластичным материалом, описываемым в рамках модели Гершеля–Балкли. В ходе численного моделирования было установлено, что в начальный период отсыпки отмечается внедрение сухих пород в глинисто-солевые шламы, при этом граница между материалами не имеет четких границ (рисунки 9 и 10). Помимо вертикального внедрения сыпучего материала в глинисто-солевые шламы происходит выдавливание шламов из-под формируемой насыпи в зону, не подвергающуюся нагрузке. В этой фазе преобладают пластические деформации, обусловленные нарастанием пластических приращений. По мере накопления объёма отсыпаемых пород и нарастания порового давления система переходит в стадию, где необратимые объёмные деформации становятся определяющим фактором, превалируя над первоначальными вязкопластическими явлениями. После завершения стадии внедрения и достижения установившегося распределения деформаций и напряжений, выполнялся второй этап численного моделирования, целью которого было перераспределение напряжений в слабом основании за счёт фильтрационного оттока воды и консолидационного упрочнения. Для этого использовалась модель Soft Soil, основанная на эффективных напряжениях и логарифмической зависимости между деформациями и давлением. Под действием веса сухих пород происходит длительная диссипация избыточного порового давления в шламовом основании, сопровождаемая уменьшением пористости и укреплением межструктурных связей. Эти объёмные изменения носят необратимый характер и определяют окончательную геометрическую и механическую конфигурацию техногенного массива (рисунок 11).

**3. Устойчивость отвалов, отсыпаемых на слабое основание из глинисто-солевых шламов, зависит от интенсивности**

**внедрения сухих пород, степень влияния которого на устойчивость зависит от конфигурации отвала, мощности слабого основания и прочностных характеристик отходов.**

Оценка устойчивости отвальной массы, формируемой на глинисто-солевых шламах, представляет собой комплексный инженерно-геологический анализ, при котором необходимо учитывать процесс накопления и перераспределения порового давления, вследствие чего классические методы расчёта устойчивости, не могут отразить реальную квазистатическую или переходную динамику в геотехнической системе «слабое основание – отвальная масса».

Задача оценки влияния глинисто-солевых шламов на устойчивость формируемой отвальной массы выполнялась в условиях плоской деформации. В качестве первоначальной модели среды для прогноза напряженно-деформированного состояния использовалась упругопластическая модель, основанная на условии пластичности Кулона-Мора. В дальнейшем численное моделирование выполнялось с помощью модели Soft Soil для более детального описания характера механического поведения глинисто-солевых шламов. Применение данных моделей обосновано тем, что в лабораторных исследованиях были получены следующие показатели: сопротивление недренированному сдвигу, модуль общей деформации, коэффициент поперечной деформации, а также угол внутреннего трения и сцепление.

Угол наклона боковой поверхности отвальной массы принимался равным  $35^\circ$ , высота отвальной массы изменялась в диапазоне от 6 до 36 м в зависимости от ожидаемых нагрузок на глинисто-солевые шламы, величина которых варьировалась от 100 до 600 кПа с шагом 100 кПа. Было принято, что слой грунта низкой прочности, огражденный дамбой и за которым следует слой основания, полностью водонасыщен. Оценка устойчивости отвальной массы выполнялась для нескольких вариантов конфигураций шламового основания, которое опиралось на горизонтальную или наклонную поверхности основания. Угол наклона поверхности основания принимался равным  $0^\circ$ ,  $5^\circ$  и  $10^\circ$ . Высота участка, заполненного грунтами низкой прочности, принималась равной 5 и 10 м. Высота дамбы варьировалась от

глубины участка с грунтами низкой прочности и также была равна 5 и 10 м.

Расчет напряженно-деформированного состояния грунтового массива и устойчивости рассматриваемой геотехнической системы выполнялся для двух вариантов: без учета внедрения сухих пород в основание и с учетом внедрения пород.

Формирование напряженно-деформированного состояния рассматриваемой геотехнической системы выполнялось с учетом этапности его формирования. На первом этапе инициализировалось начальное напряженное состояние грунтового основания, затем моделировалось изменение напряженно-деформированного состояния в результате формирования ограждающей дамбы. В дальнейшем выполнялась активация области, отвечающей за работу глинисто-солевых шламов. На заключительном этапе выполнялась активация области, отвечающей за отвальную массу, и изменялись прочностные характеристики глинисто-солевых шламов с учетом ожидаемой величины давления от отсыпаемых сверху пород.

Оценка устойчивости рассматриваемой геотехнической системы выполнялась согласно общепринятой процедуре для решения такого класса задач, поэтапного снижения прочностных характеристик материалов, слагающих рассматриваемую систему.

Основным из ключевых факторов по анализу устойчивости отвальной массы являлось определение критической поверхности скольжения, которая представляет собой границу, вдоль которой масса грунта или породы в отвале перемещается или сползает во время потери устойчивости. В ходе проведенного исследования выделено три типа формирования поверхностей скольжения для модели Кулона-Мора: поверхность скольжения проходит через тело отвала; поверхность скольжения проходит через отвальную массу и глинисто-солевые шламы; поверхность скольжения проходит через слабое основание и выходит через дамбу. В отдельных случаях наблюдается картина, когда поверхность скольжения проходит через отвальную массу и глинисто-солевые шламы и выходит за границу через дамбу. Данное условие выполняется при мощности шламов 10 м. Формирование первого типа поверхности скольжения выполняется если глубина залегания шламов 5 м в независимости от конфигурации, второе

условие соблюдается при глубине грунтов низкой прочности 5 и 10 м с пониженными характеристиками при горизонтальной и наклонной конфигурациях. Третий тип формирования выполняется при расположении геотехнической системы на слабом основании.

В результате численного моделирования, выполненного с применением модели Soft Soil, выделены два типа механизма образования поверхностей скольжения. Отсутствие внедрения сухих пород в слабое основание приводит к формированию поверхности скольжения, которая соответствует общепринятой схеме при наличии слабого слоя. Внедрение сухих пород в слабое водонасыщенное основание существенно изменяет механизм формирования поверхности скольжения, которая охватывает всю зону внедрения сухих пород и выходит через тело ограничивающей дамбы.

Значения коэффициента запаса устойчивости резко уменьшаются при воздействии нагрузок на глинисто-солевые шламы в случае, когда конфигурация имеет наклонную геометрию при угле наклона в  $5^\circ$  и  $10^\circ$  (рисунок 12). Для модели Кулона-Мора это особенно выражено если характеристики грунта низкой прочности понижены. Кроме того, внедрение пород оказывает непосредственное влияние на устойчивость геотехнической системы для двух расчетных моделей. В частности, для модели Soft Soil выявлено устойчивое повышение коэффициента запаса устойчивости при наличии внедрённой массы. В связи с полученным расхождением между расчетными оценками устойчивости с учётом и без учёта внедрения сухих пород, а также с целью обеспечения инженерной применимости полученных результатов был выведен поправочный коэффициент, учитывающий влияние внедрения на устойчивость системы. Для получения поправочного коэффициента, учитывающего влияние внедрения сухих пород в слабое основание, был выполнен комплекс расчётов перехода от линейной модели к мультипликативной форме, позволяющей выделить вклад каждого из параметров. В качестве факторов, оказывающих влияние на величину поправочного коэффициента, были приняты: глубина залегания слабого основания (5, 10 м), угол залегания геотехнической системы ( $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$ ), уровень оказываемой нагрузки (100-600 кПа с шагом в 100 кПа), а также характеристики глинисто-соле-

вых шламов и слой нижележащего основания (только для модели Кулона-Мора). Обобщенное уравнение 5 для расчета поправочного коэффициента:

$$K_n = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4, \quad (5)$$

где  $K_1 = a^a$ ,  $K_2 = P^b$ ,  $K_3 = h^c$ ,  $K_4 = e^d$ . Численные значения поправочного коэффициента приведены на рисунках 13 и 14.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлены результаты решения актуальной задачи повышения геомеханической безопасности отработанных шламохранилищ при формировании отвальной массы, за счет совершенствования прогнозирования напряженно-деформированного состояния и оценки устойчивости геотехнических систем с учетом внедрения сухих пород в глинисто-солевые шламы. Полученные решения позволяют повысить надёжность и безопасность эксплуатации объектов складирования отходов горной промышленности, а также обеспечить долгосрочную их эксплуатацию.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. На основании проведенных лабораторных исследований было установлено, что глинисто-солевые шламы обладают рядом особенностей, включая низкие значения прочности и сцепления, а также высокую сжимаемость, что предопределяет деформационное поведение геотехнических систем, основанием которых является исследуемый материал.

2. Полученные экспериментальные данные позволили установить прямую линейную зависимость между сопротивлением недренированному сдвигу и плотностью грунта, а также логарифмическую зависимость между плотностью грунта и уровнем нагружения. Установленные закономерности представлены в виде аналитических выражений, что обеспечивает возможность их практического применения в инженерных расчётах.

3. Разработана методика прогноза напряженно-деформированного состояния системы «слабое основание - отвальная масса» на основании численного моделирования. Обоснованы теоретические

положения прогноза численного моделирования прогноза напряженно-деформированного состояния рассматриваемой геотехнической системы при внедрении сухих пород в слабое основание с применением метода связный Лагранж-Эйлера (CEL).

4. Установлено, что численное моделирование прогноза деформирования слабого основания под нагрузкой от отсыпаемых сухих пород следует разделять на два этапа. Первый этап деформирования характеризуется внедрением сухих пород в слабое основание, деформирование которого определяется вязко-пластической моделью, при неизменном или незначительно изменяющемся объёме. Второй этап охватывает деформацию основания вследствие консолидационных процессов.

5. Устойчивость геотехнических систем на основаниях, представленных глинисто-солевыми шламами, зависит от их геометрической конфигурации, физико-механических характеристик, свойств подстилающего основания и величины приложенных внешних нагрузок. В частности, наклонная конфигурация слабого основания, наличие слабого подстилающего слоя и увеличение мощности глинисто-солевых шламов приводят к снижению коэффициента запаса устойчивости, усиливая действие касательных напряжений и способствуя образованию различных механизмов поверхностей скольжения. Внедрение сухих пород в слабое основание обеспечивает повышение устойчивости системы «слабое основание - отвальная масса».

6. Разработана методика расчета устойчивости, которая базируется на введении поправочного коэффициента, что позволяет использовать традиционные методы расчета с включением данной поправки.

Перспективным направлением дальнейших исследований, развивающих выполненные в диссертационной работе исследования, является углублённое изучение закономерностей взаимодействия сыпучих материалов с основанием, представленным глинисто-солевыми шламами, с акцентом на процессы внедрения пород и их влияние на напряженно-деформированное состояние геотехнической системы, а также влияния переменных нагрузок и циклического воздей-

ствия на поведение геотехнической системы, что имеет особую актуальность для условий эксплуатации объектов на слабых основаниях, подверженных динамическим нагрузкам.

### **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

*Публикации в изданиях из Перечня ВАК:*

1. Карасев, М. А. Лабораторные исследования механических характеристик грунтов низкой прочности как элемента объекта складирования отходов промышленного обогащения / М. А. Карасев, **Т. С. Астапенко** // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2024. – № 4. – С. 500-511.

2. Карасев, М. А. Лабораторные исследования развития деформаций при формировании насыпей на грунтах низкой прочности / М. А. Карасев, **Т. С. Астапенко** // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – № 29. – С. 104-109. – DOI 10.26160/2658-3305-2024-29-104-109.

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

3. Карасев, М. А. Анализ моделей прогноза напряженно-деформированного состояния техногенных грунтов низкой прочности / М. А. Карасев, Г. Б. Поспехов, **Т. С. Астапенко**, В. С. Шишкина // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 11. – С. 49-69. – DOI 10.25018/0236\_1493\_2023\_11\_0\_49.

4. Karasev, M. Assessment of the influence of formation conditions of embankments and spoil heaps on their stability when dumped on clay-salt slurries / M. Karasev, **T. Astapenka** // Eng. – 2024. – Vol. 6. – №. 1. – P. 2. DOI 10.3390/eng6010002.

*Свидетельство на объект интеллектуальной собственности:*

5. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023621969. База данных физико-механических свойств отходов калийного производства. Заявка № 2023621637: заявл. 05.06.2023; опубл. 16.06.2023 / **Астапенко Т. С.**, Карасев М. А., Бойков А. В.; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

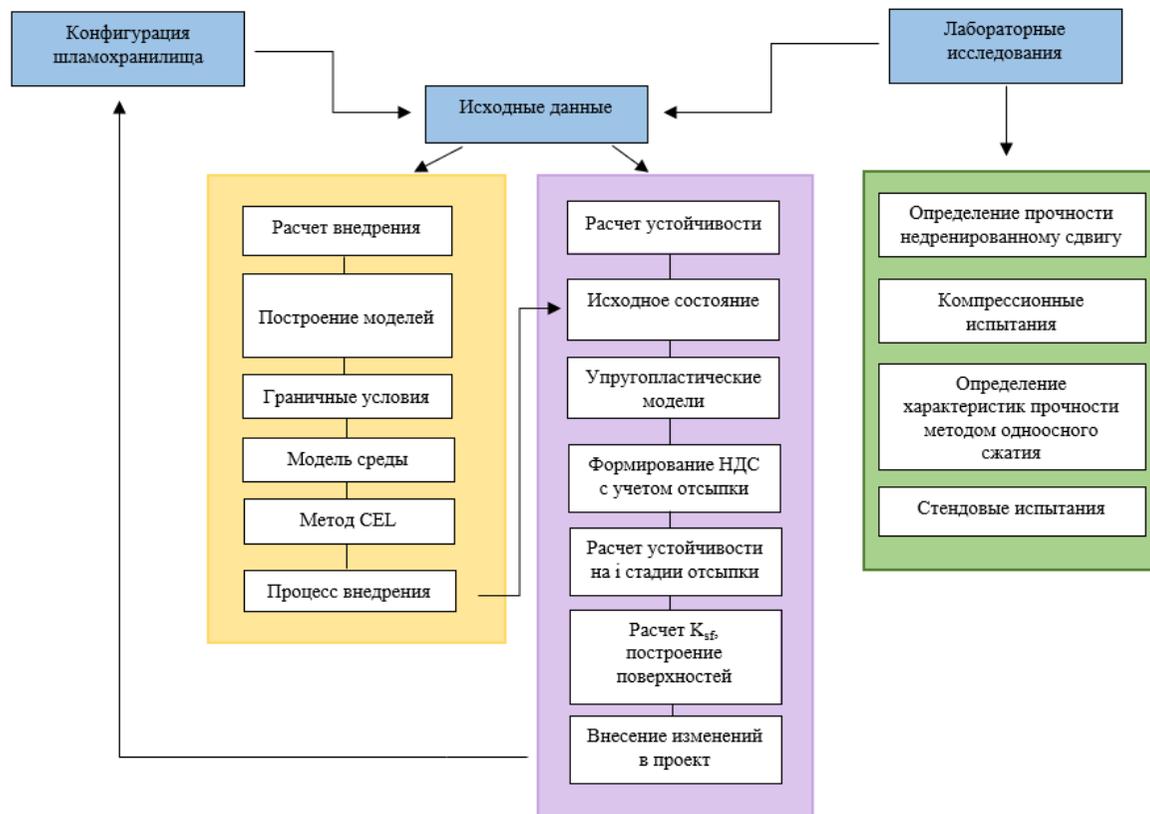


Рисунок 1 – Алгоритм диссертационного исследования

Таблица 1 – Характеристики физико-механических свойств глинисто-солевых шламов двух калийных месторождений, полученных экспериментальными способами

Давление уплотнения, кПа	Сопротивление недренированному сдвигу, кПа	Плотность грунта, г/см <sup>3</sup>
Образцы калийного месторождения №1		
25	2,2	1,27
50	7,8	1,31
100	25,7	1,38
200	42,5	1,52
300	46,4	1,55
400	50,3	1,57
500	58,7	1,6
600	67,1	1,66
Образцы калийного месторождения №2		
25	35,8	1,77
50	52,6	1,84
100	80,5	1,92
200	98,4	1,96
300	104,5	1,98
400	109,6	2
500	117,4	2,01
600	124,1	2,03

Примечание: модуль общей деформации – 0,8 МПа для образцов глинисто-солевых шламов месторождения №1; 7 МПа для образцов глинисто-солевых шламов месторождения №2.

Коэффициент поперечной деформации – 0,26 для образцов глинисто-солевых шламов месторождения №1; 0,495 для образцов глинисто-солевых шламов месторождения №2

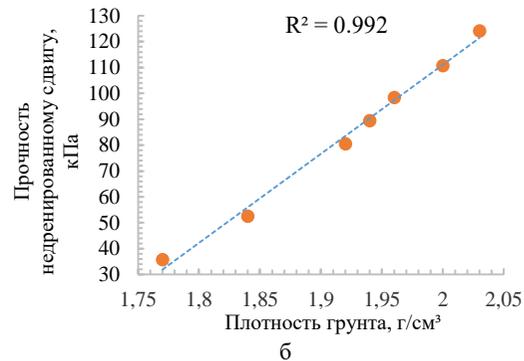
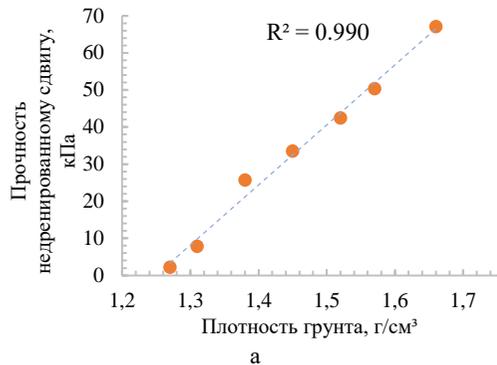


Рисунок 2 – Графики зависимостей сопротивления недренированному сдвигу от плотности грунта: а – калийное месторождение №1; б – калийное месторождение №2

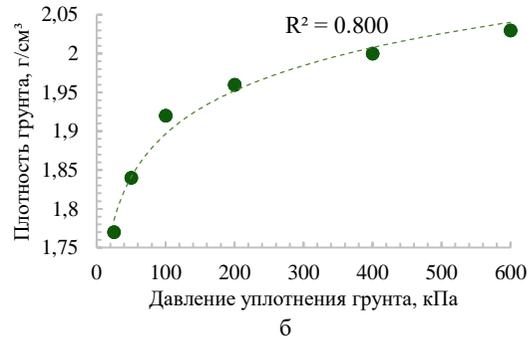
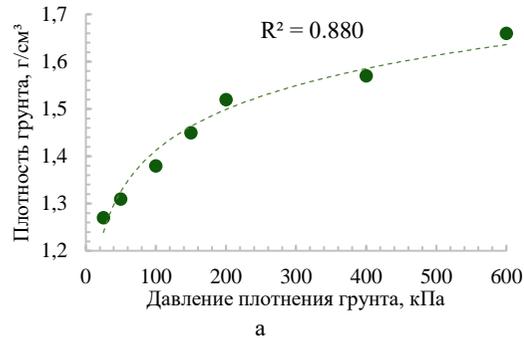


Рисунок 3 – Графики зависимостей плотности грунта от уплотнения: а – месторождение №1; б – месторождение №2

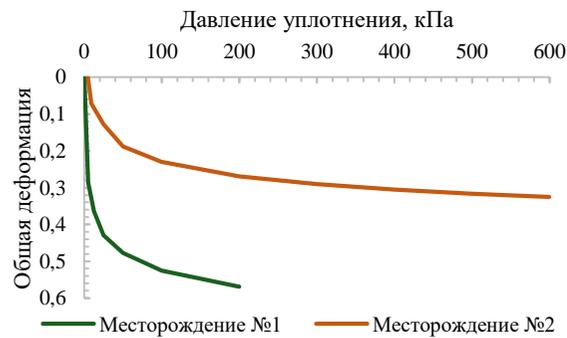


Рисунок 4 – Компрессионная кривая

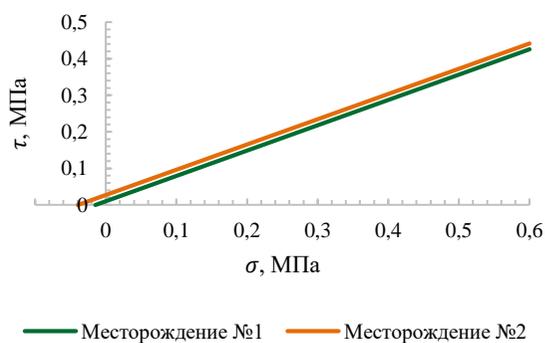


Рисунок 5 – Зависимость сопротивления грунта срезу от нормального напряжения

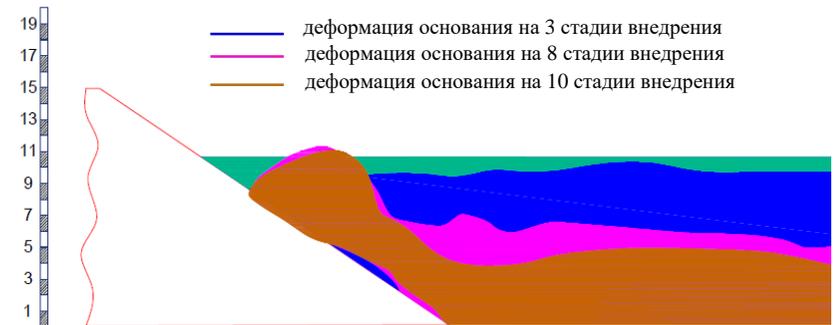


Рисунок 6 – Стеновые исследования развития совместных деформаций сыпучего материала и глинисто-солевых шламов

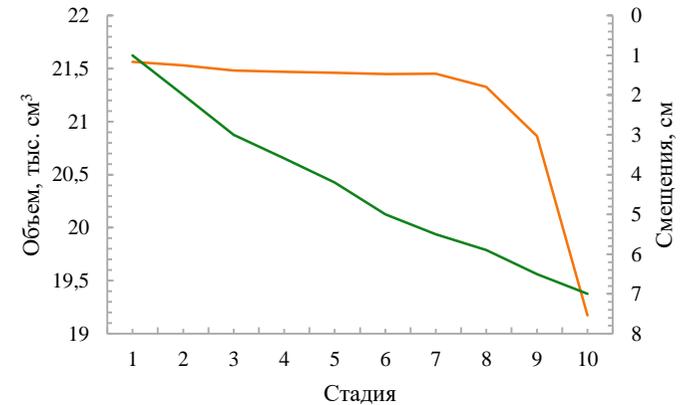


Рисунок 7 – График зависимости изменения объема и деформации от стадийности нагружения

Примечание: согласно рисунку 5 эффективный угол внутреннего трения для образцов глинисто-солевых шламов двух месторождений равен  $34,8^\circ$ , а удельное сцепление  $\approx 12,36$  кПа для образцов глинисто-солевых шламов месторождения №1 и  $\approx 27,4$  кПа для месторождения №2

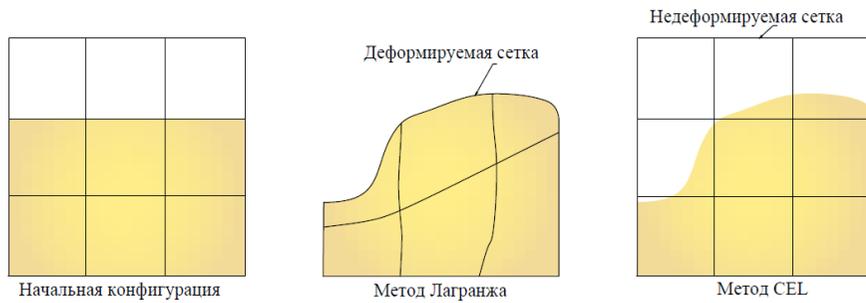


Рисунок 8 – Расчет деформирования материала методом CEL

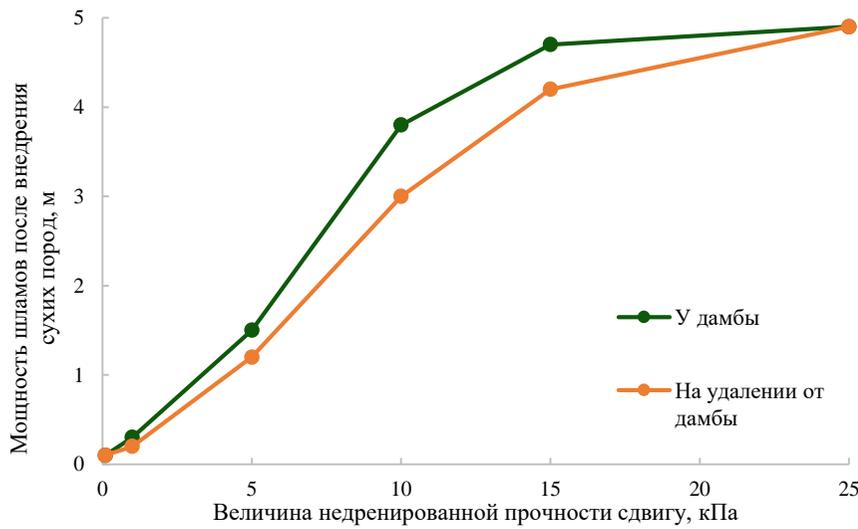


Рисунок 9 – Зависимости изменения мощности шламового основания при отсыпке сухих пород от величины недренированной прочности сдвигу (мощность шламового основания 5 м, мощность отсыпаемых сухих пород 6 м)

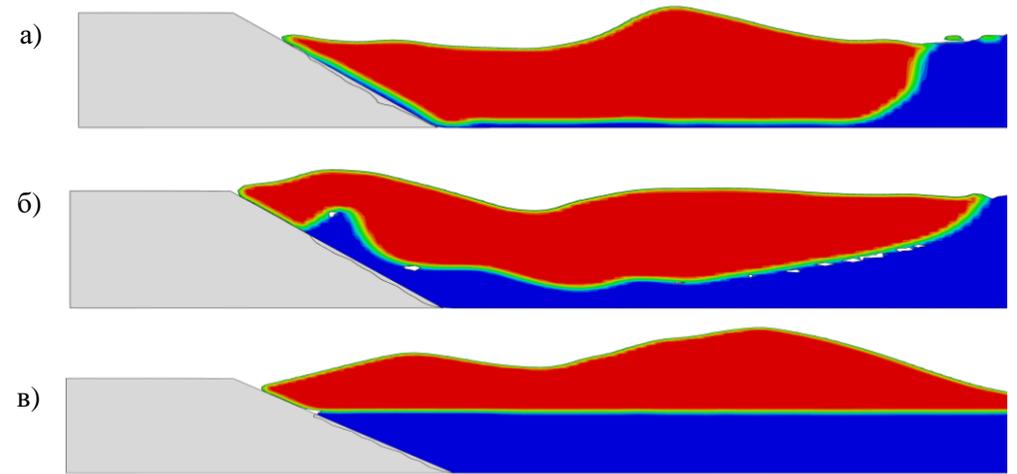


Рисунок 10 – Картина внедрения сухих пород при их отсыпке на шламовое основание (мощность отсыпаемой массы 6 м, мощность шламового основания 5 м): а – в – соответственно при недренированной прочности сдвигу 0.1, 5.0 и 25 кПа

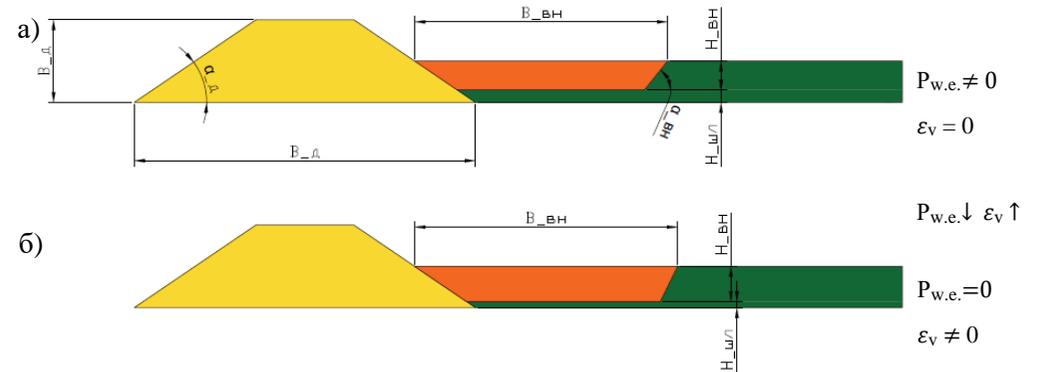


Рисунок 11 – Картина внедрения сухих пород в глинисто-солевые шламы (а – с учетом максимального избыточного порового давления в пределах зоны контакта внедренных сухих пород с основанием; б – при рассеянном избыточном поровом давлении в пределах зоны контакта внедренных сухих пород с основанием), где  $B_{д}$  – параметры ограждающей дамбы, м;  $B_{вн}$  – ширина отсыпки сухих пород, м;  $\alpha_{вн}$  – угол внедрения сухих пород, град;  $H_{шл}$  – мощность глинисто-солевых шламов, м.  $P_{w.e.}$  – поровое давление, Па;  $\epsilon_v$  – объемные деформации

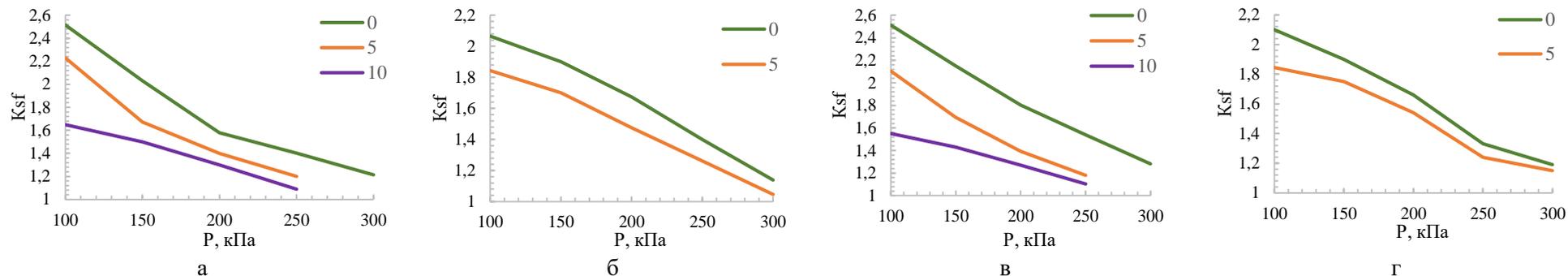


Рисунок 12 – Зависимость коэффициента запаса устойчивости от внешней нагрузки для моделей с внедрением сухих пород в слабое основание (а и б - образцы глинисто-солевых шламов месторождения №1 с глубиной залегания 5 и 10 м, в и г - образцы глинисто-солевых шламов месторождения №2 с глубиной залегания 5 и 10 м)

Примечание:  $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$  – угол залегания геотехнической системы. Картина внедрения сухих пород в слабое основание получена методом CEL, определение коэффициента запаса устойчивости было выполнено с помощью численного моделирования с помощью модели Soft Soil.

$K_n = e^{-0.818} \cdot \alpha^{-0.026} \cdot P^{0.178} \cdot h^{0.061}$ , где  $K_n$  - поправочный коэффициент для модели Soft Soil;  $\alpha$  - угол залегания системы;  $P$  - оказываемая нагрузка;  $h$  - мощность глинисто-солевых шламов

$K_n = e^{-0.020} \cdot \alpha^{-0.012} \cdot P^{0.008} \cdot h^{-0.012}$ , где  $K_n$  - поправочный коэффициент для модели Кулона-Мора

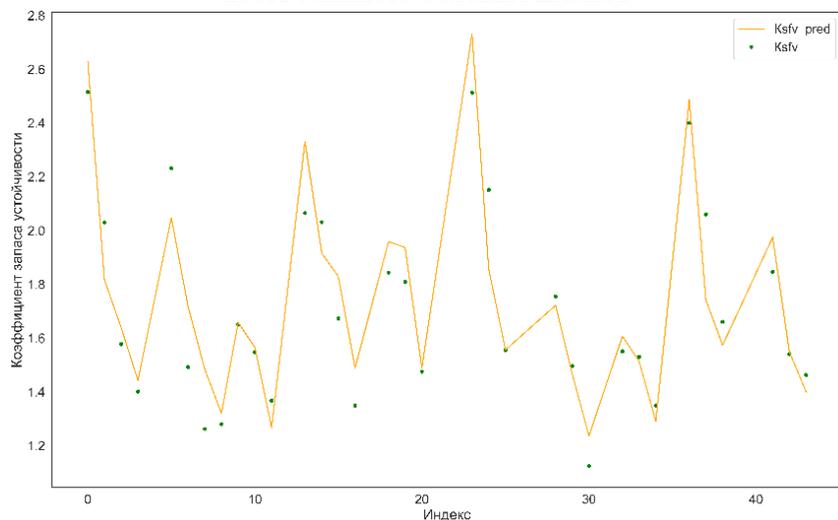


Рисунок 13 – Сравнительный график отображения фактических и предсказанных значений коэффициента запаса устойчивости для модели Soft Soil, где  $K_{sfv}$  – коэффициент запаса устойчивости, полученный с помощью численного моделирования;  $K_{sfv\_pred}$  – коэффициент запаса устойчивости, полученный с помощью поправочного коэффициента

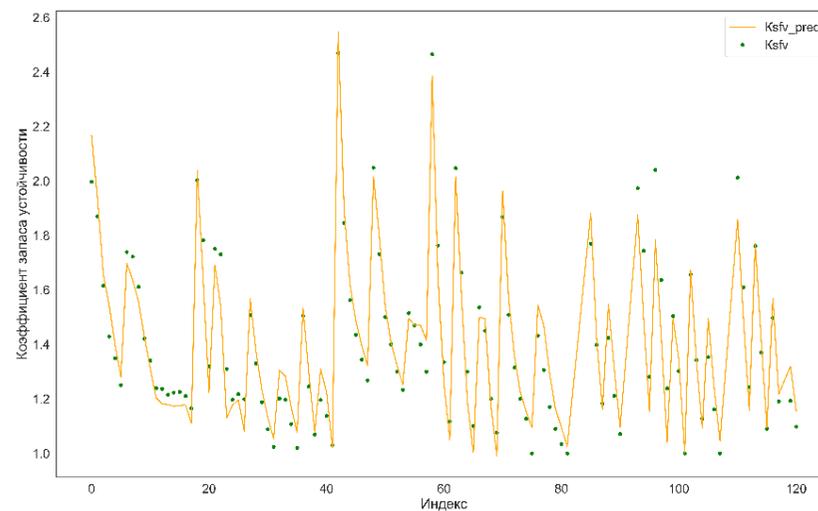


Рисунок 14 – Сравнительный график отображения фактических и предсказанных значений коэффициента запаса устойчивости для модели Кулона-Мора, где  $K_{sfv}$  – коэффициент запаса устойчивости, полученный с помощью численного моделирования;  $K_{sfv\_pred}$  – коэффициент запаса устойчивости, полученный с помощью поправочного коэффициента