На правах рукописи

Гурьев

Гурьев Дмитрий Витальевич

ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ НАСЫПНЫХ ДАМБ С УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ТЕХНОГЕННЫХ СУГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Специальность: 25.00.16 – "Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Кемерово 2017

Работа выполнена на кафедре Маркшейдерского дела и геологии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева"

Научный руководитель	Бахаева Светлана Петровна доктор технических наук, профессор кафедры МДиГ Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева", доцент
Официальные оппоненты:	Кутепов Юрий Иванович доктор технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией научного центра Геомеханики и проблем горного производства Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет", профессор
	Жабко Андрей Викторович кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Уральский государственный горный университет"
Ведущая организация	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

Защита состоится 21.04.2017 в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.102.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования "Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева" по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28, факс (384-2) 58-33-80, e-mail: rector@kuzstu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева" и на сайте организации по адресу http://science.kuzstu.ru/activities/gos-attestation/soresearchers/

Автореферат разослан " " _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Иванов В. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Постоянное увеличение темпов извлечения из недр полезных ископаемых ведет к интенсивному образованию и накоплению жидких отходов горнопромышленных предприятий. Хранение этих отходов предусмотрено в накопителях, ограждаемых грунтовыми дамбами, для которых существует риск разрушения и загрязнения природной среды (поверхностных и подземных вод, почв) токсичными веществами, повреждения волной прорыва зданий и сооружений, расположенных в нижнем бьефе накопителей, опасности нанесения вреда животному миру.

Надежность грунтовых дамб количественно оценивается коэффициентом устойчивости, зависящим от физико-механических свойств грунтов тела и основания, изменчивость которых даже в пределах одного сооружения может превышать 50 %. Вследствие этого обоснование расчетных прочностных характеристик грунтов и прогноз устойчивости с учетом их изменчивости является актуальной научной и важной практической задачей в части обеспечения безопасности накопителей жидких отходов и снижения риска негативного воздействия их на окружающую среду.

Основоположниками отечественной и зарубежной науки достаточно полно разработаны задачи по исследованию свойств грунтов и оценке устойчивости дамб. Вместе с тем, на этапе проектирования гидротехнических сооружений физико-механические характеристики грунтов выбирают по приложениям СП 11-105-97 или по результатам инженерно-геологических изысканий, включающих проходку горных выработок, полевые и лабораторные исследования грунтов, находящихся в условиях естественного залегания. Недостатком такого подхода является то, что характеристики грунтов, приведенные в Своде Правил, являются усредненными для всей территории бывшего Советского Союза. Характеристики грунтов естественного залегания после выемки, транспортировки и укладки в тело дамбы значительно изменяют свои значения. Возникает необходимость проведения дополнительных геофизических и гидрогеологических исследований, а также обобщения физико-механических характеристик техногенных грунтов, отобранных в реальных условиях эксплуатации откосных сооружений. Вследствие этого автором выполнен анализ и обобщение пространственной изменчивости физико-механических характеристик техногенных грунтов; установлены взаимосвязи физико-механических характеристик грунтов; разработан алгоритм аналитического метода прогноза устойчивости дамб с учетом изменчивости прочностных характеристик грунтов.

Полученные результаты представлены в научных положениях настоящей научной работы.

Исследования проводились в соответствии с планами хоздоговорных НИР КузГТУ и при поддержке гранта АО "СУЭК-Кузбасс" по проблеме

"Проведение научных исследований по приоритетным направлениям развития науки, техники и технологии в области рационального природопользования" на тему "Обобщение характеристик дисперсных грунтов техногенных массивов на примере Кузбасса".

Объект исследований: насыпные дамбы накопителей жидких отходов горнопромышленных предприятий, сложенные дисперсными связными техногенно перемещенными природными суглинистыми грунтами[1].

Предмет исследований: физико-механические свойства суглинистых грунтов.

Цель работы: разработка метода прогноза устойчивости насыпных дамб с учетом пространственной изменчивости прочностных свойств техногенных суглинистых грунтов, сочетающего надежность с рациональными затратами определения параметров дамбы на этапе проектирования и обеспечивающего экологическую безопасность при эксплуатации накопителей жидких отходов.

Основная идея работы: Экспресс-метод определения параметров дамбы на стадии проектирования, основанный на использовании корреляционной связи коэффициента устойчивости с прочностными свойствами грунтов.

Основные задачи исследований:

– анализ и обобщение пространственной изменчивости физико-механических характеристик техногенных грунтов;

– установление взаимосвязи физико-механических характеристик грунтов, применяемых для строительства дамб;

– разработка алгоритма аналитического метода прогноза устойчивости грунтовых дамб с учетом пространственной изменчивости прочностных характеристик грунтов.

Научные положения, выносимые на защиту:

– значения плотности ρ и угла внутреннего трения φ грунтов подчиняются нормальному, сцепления C – логнормальному законам распределения, при этом диапазоны изменчивости характеристик техногенных грунтов для условий Кузбасса превышают рекомендуемые СП 11-105-97 в 1,8 – 5 раз, а различие обобщенных характеристик ρ, φ и C выше и ниже депрессионной кривой находятся в пределах точности вычислений;

– снижение сцепления C и угла внутреннего трения φ техногенных суглинистых грунтов выражаются тесной ($\eta_{xy} \geq 0{,}87$) параболической зависимостью от естественной влажности W (при $W = 20 - 30$ %);

– сокращение трудоемкости прогноза устойчивости дамбы на этапе проектирования обеспечивается аналитическим методом, реализованным в программе "Устойчивая насыпь"; определением характеристик грунтов по региональной таблице обобщенных значений; аппроксимацией уравнением первого порядка геометрических параметров дамбы прочностными характе-

[1] Далее по тексту – техногенные суглинистые грунты.

ристиками грунтов; отысканием наиболее напряженной поверхности скольжения путем формализации профиля дамбы, депрессионной кривой, действующих нагрузок и воздействий аналитическими уравнениями, при которой коэффициент устойчивости соответствует нормативному значению.

Методы научных исследований

Ретроспективный анализ существующих научно-методических разработок по изучению физико-механических свойств грунтов и прогнозу устойчивости грунтовых дамб; обработка результатов инженерно-геологических изысканий с использованием методов математической статистики и корреляции; аналитическое моделирование реальной дамбы и ее напряженного состояния; аппроксимация геометрических параметров прочностными характеристиками грунтов.

Научная новизна работы заключается в анализе и обобщении физико-механических характеристик техногенных суглинистых грунтов для условий Кузбасса; установлении статистической взаимосвязи между прочностными характеристиками (сцепление C, угол внутреннего трения φ) грунтов и их влажностью; обосновании аналитического метода прогноза устойчивости дамбы с учетом пространственной изменчивости прочностных характеристик грунтов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются:

– применением стандартных методик инженерно-геологических изысканий и исследований грунтов на приборах, проходящих ежегодные метрологические поверки;

– использованием классических методов статистической обработки экспериментальных данных, представительным объемом выборки (284 образца) и критериями тесноты связи (корреляционные отношения более 0,80) полученных корреляционных зависимостей;

– незначительным (до 10 %) расхождением коэффициента устойчивости, определенного по корреляционной зависимости и аналитическим методом.

Личный вклад автора:

– участие в экспериментальных исследованиях физико-механических свойств грунтов полевыми и лабораторными методами;

– сбор, анализ и обобщение материалов инженерно-геологических изысканий по грунтовым дамбам промышленных предприятий Кузбасса;

– разработка методических рекомендаций по обобщению физико-механических характеристик техногенных суглинистых грунтов;

– разработка алгоритма программы для ЭВМ по оценке устойчивости грунтовой дамбы.

Теоретическая значимость работы состоит в анализе и обобщении физико-механических характеристик дисперсных связных техногенно перемещенных природных суглинистых грунтов, установлении взаимосвязей между ними и разработке на этой основе аналитического метода прогноза

устойчивости грунтовой дамбы с учетом пространственной изменчивости свойств грунтов.

Отличие от ранее выполненных работ заключается в следующем: впервые установлены нормативные характеристики прочности техногенных суглинистых грунтов для условий Кузбасса и их зависимость от естественной влажности; аппроксимацией уравнением первого порядка геометрических параметров дамбы прочностными характеристиками грунтов.

Практическая значимость работы заключается в:

– создании региональной базы данных физико-механических характеристик техногенных суглинистых грунтов для условий Кузбасса;

– разработке (в соавторстве) программы для ЭВМ "Устойчивая насыпь";

– составлении номограмм для оперативного определения угла откоса дамбы по прочностным характеристикам грунтов.

Реализация работы

Результаты исследований, методика анализа и обобщения характеристик грунтов использовались при разработке следующих документов:

1. Обобщение физико-механических характеристик техногенных глинистых грунтов: методические рекомендации / С. П. Бахаева, Т. В. Михайлова, Д. В. Гурьев [и др.] / КузГТУ, ОАО «Кузбассгигрошахт», ООО «Геотехника». – Кемерово, 2016. – 45 с.

2. Методическое руководство по геодезическому (маркшейдерскому) контролю при мониторинге безопасности грунтовых дамб накопителей жидких отходов промышленных предприятий / сост. С. П. Бахаева, Т. В. Михайлова, Т. Б. Рогова, Д. В. Гурьев / КузГТУ; Новационная фирма "КУЗБАССНИИОГР". – Кемерово, 2014. – 46 с.

Региональная таблица физико-механических характеристик техногенных суглинистых грунтов для условий Кузбасса, программа для ЭВМ "Устойчивая насыпь" используются проектными институтами ОАО "Кузбассгипрошахт", ООО "Сибгеопроект" при оценке устойчивости дамб IV класса на этапе их проектирования и реконструкции; КузГТУ при выполнении хоздоговорных работ по безопасности гидротехнических сооружений для промышленных предприятий Кузбасса, а также при чтении специальных дисциплин аспирантам и студентам специальности "Маркшейдерское дело" и "Прикладная геология".

Апробация работы

Основные положения работы доложены на: международном форуме-конкурсе молодых ученых "Проблемы недропользования" (Санкт-Петербург, 2013); Кузбасском международном угольном форуме "Энергетическая безопасность России: новые подходы к развитию угольной промышленности" (Кемерово, 2013 и 2014 гг.); международной научно-практической конференции "Вопросы безопасности гидротехнических сооружений и водохозяйственных объектов" (Новосибирск, 2014); международной научно-прак-

тической конференции "Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс 2014" (Кемерово, 2014); международном научном симпозиуме "Неделя горняка – 2015" (Москва, 2015); Инновационный конвент "Кузбасс: образование, наука, инновации" (Кемерово, 2015); международной научно-практической конференции "Инновация – 2015" (Ташкент, 2015); Всероссийской научно-технической конференции с международным участием "Современные проблемы в горном деле и методы моделирования горно-геологических условий при разработке месторождений полезных ископаемых" (Кемерово, 2015); VII Уральском горнопромышленном форуме "Горное дело: Технологии. Оборудование. Спецтехника" (Екатеринбург, 2015); на VIII российско-китайском симпозиуме «Уголь в XXI веке: добыча, переработка и безопасность» (Кемерово, 2016).

Публикации: по теме диссертации опубликовано 15 научных работ, в том числе 4 статьи в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК, получено 1 свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ.

Объем работы: диссертация содержит введение, 4 главы, заключение, изложена на 140 страницах машинописного текста, 38 рисунков, 46 таблиц, список литературных источников из 111 наименований.

Автор выражает искреннюю признательность коллективу Новационной фирмы "КУЗБАСС-НИИОГР" во главе с к. т. н. С. И. Протасовым, коллективу ООО "Геотехника" во главе с В. Н. Сахаровым за помощь в проведении исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен анализ методов исследования грунтовых массивов естественного и техногенного сложения, а также методов прогноза устойчивости откосных сооружений.

Фундаментальным исследованиям грунтов посвящены труды отечественного академика Ф. П. Саваренского, а также известного зарубежного ученого Карла Терцаги. Развитие и совершенствование методов по исследованию грунтов отражены в работах Н. В. Коломенского, В. Д. Ломтадзе, М. П. Лысенко, Г. П. Чебаторева и др. Методические подходы по обобщению результатов изысканий грунтов в условиях естественного залегания разработаны в лаборатории математических методов ПНИИИС под общим руководством доктора геолого-минералогических наук М. В. Раца.

Теоретическую базу для определения предельного состояния грунтовых сооружений заложил Шарль Огюстен де Кулон. На ее основе разработаны графоаналитические методы расчета устойчивости сооружений, отличающиеся способом построения поверхности скольжения и учета действующих нагрузок и воздействий на призму возможного обрушения, изложенные в трудах Н. Р. Моргенштерна, Е. Спенсера, Г. Л. Фисенко, Р. Р. Чугаева, Г. М. Шахунянца, Н. Янбу и др. С развитием компьютерных технологий получили раз-

витие аналитические методы расчета устойчивости, реализованные в известных программных комплексах: Geo 5, GeoStudio, RocScience и др.

Для исследования техногенных суглинистых грунтов дамб накопителей жидких отходов горнопромышленных предприятий Кузбасса активно используют инженерно-геологические изыскания, среди которых в зависимости от желаемого результата применяют следующие виды работ: проходка горных выработок (скважины, закопушки, расчистки, дудки, канавы, траншеи, шурфы, шахты), полевые исследования (методы статического зондирования), стационарные наблюдения (зондирование, геофизические и лабораторные методы), лабораторные исследования (определение физико-механических свойств грунтов).

Наряду с прямыми исследованиями грунтов в последнее время широкое распространение получают косвенные: геофизические методы (сейсмоакустический, термометрический, геомагнитный, электромагнитный) и гидрогеологические наблюдения (контроль фильтрации и работы дренажных устройств; определение фильтрационных свойств грунтов; положения депрессионной поверхности в массиве; изменения порового давления во времени).

Одно из основных предназначений исследований техногенных грунтов – определение надежности дамб накопителей жидких отходов горнопромышленных предприятий, характеризуемой коэффициентом устойчивости, предложенным Г.Л. Фисенко:

$$k_f = \frac{\sum(P_i \cos \alpha_i \, tg \, \varphi_i - \frac{\rho_w g h_i^{\text{В}} l_i^{\text{В}}}{\cos \alpha_i}) \; + \sum C_i l_i}{\sum P_i \sin \alpha_i}, \qquad (1)$$

где P_i – вес i-го элементарного блока, отнесенного к единичной ширине призмы обрушения, Н/м; α_i – угол наклона основания блока в его середине, градус; φ_i – угол внутреннего трения грунта i-го блока, градус; ρ_w – плотность воды, кг/м^3; g – ускорение свободного падения, м/с^2; $h_i^{\text{В}}$, $l_i^{\text{В}}$ – высота и длина обводненной части блока, м; C_i – сцепление грунта i-го блока, МПа; l_i – длина поверхности скольжения элементарного блока единичной ширины, м.

Ретроспективный анализ литературных источников по исследованию свойств грунтов, а также опыт инженерных изысканий показывают, что в основном исследования направлены на изучение свойств природных грунтов в условиях естественного залегания. По факту физико-механические свойства грунтов, уложенных в тело, в связи с неравномерностью уплотнения, попадания посторонних включений в пределах одной дамбы могут различаться в широком диапазоне по площади и глубине.

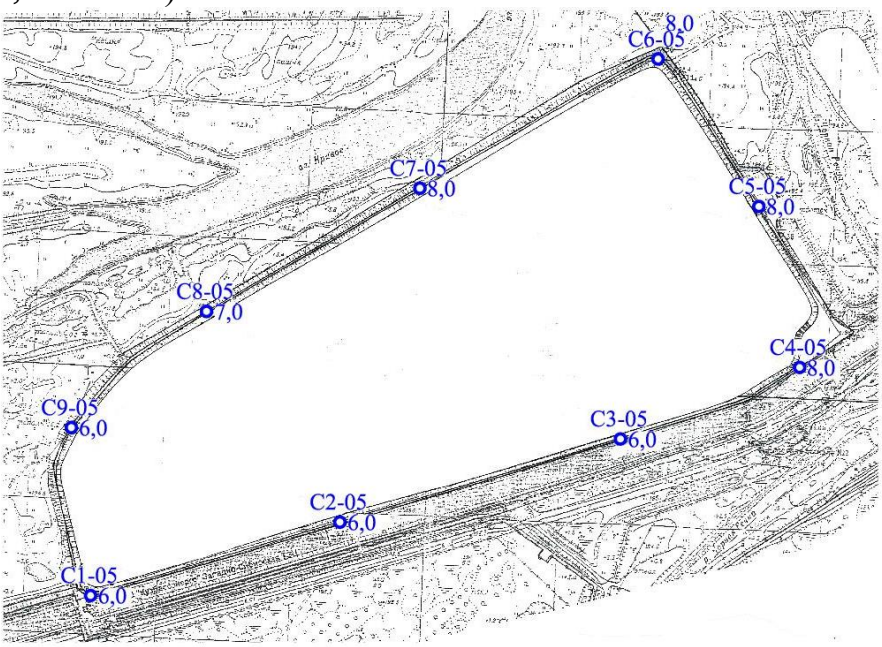
Во второй главе приведены результаты определения нормативных значений физико-механических характеристик техногенных суглинистых грунтов, применяемых при строительстве дамб, на основе их анализа и обобщения.

Исходные данные представлены материалами инженерно-геологических изысканий, проведенных ООО "Геотехника" (г. Кемерово) на дамбах накопителей жидких отходов горнопромышленных предприятий Кузбасса.

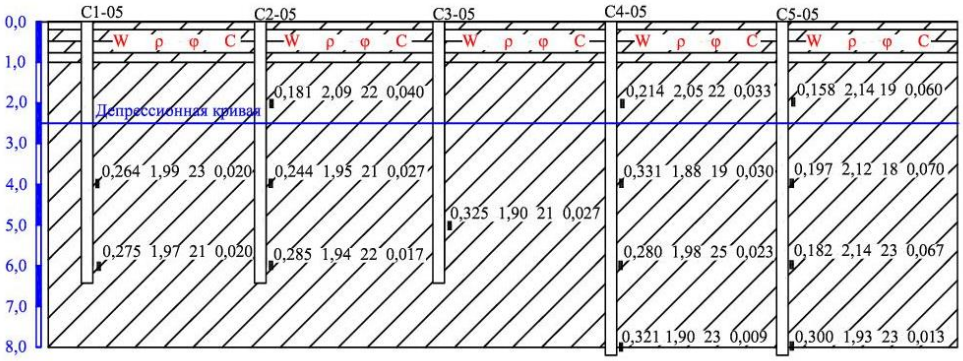
Результаты изысканий подвергнуты предварительной обработке, в ходе которой проанализированы свойства образцов грунтов, извлеченных однотипным буровым станком, прошедших испытания на приборах одной марки, определенного геолого-генетического комплекса, расположенные выше и ниже депрессионной кривой.

Анализ пространственных изменений свойств грунтов (рисунок 1) показал, что рассеяние характеристик грунтов по глубине и площади, характеризуемое коэффициентом вариации, отдельных и совокупности дамб Кузбасса носит небольшой (до 4 %) разброс значений по плотности (ρ=1,61–2,19 т/м^3), несколько больший (до 20 %) по углу внутреннего трения (φ=14°–35°) и весьма значимое (до 70 %) варьирование сцепления (С=0,004–0,140 МПа).

а)



б)



Условные обозначения

▮ - место отбора монолитов;

W - естественная влажность, д.е.;

ρ - плотность, г/см³;

φ - угол внутреннего трения, градус;

C - сцепление, МПа;

Рисунок 1. План (а) и продольный профиль (б) дамбы объекта 13

Анализ экспериментальных данных, а также опыт эксплуатации дамб позволяет предположить, что для грунтов определенного геолого-генетического комплекса (суглинок) существует возможность определения их нормативных значений на основе обобщения и установление закономерностей их изменения статистическими методами.

Процедура обобщения физико-механических характеристик грунтов по материалам инженерно-геологических изысканий приведена на рисунке 2.

Рисунок 2. Структурно-логическая схема анализа и обобщения физико-механических характеристик грунтов

Массив экспериментальных данных для анализа и получения нормативных значений физико-механических характеристик техногенных грунтов представлен 284 образцами, из которых 167 – отобраны выше, 117 – ниже депрессионной кривой.

Для надежности исходный материал разбит на обучающую и экзаменационную выборки, каждая из которых обработана по идентичной процедуре. По результатам статистической обработки установлено следующее.

Распределения значений плотности, угла внутреннего трения грунта ниже депрессионной кривой соответствуют нормальному; значений сцепления – логнормальному законам. Эмпирическое распределение угла внутреннего трения грунта, расположенного выше депрессионной кривой, не получило подтверждения подчинения какому-либо закону.

Равенство средних значений физико-механических характеристик техногенных грунтов обучающей и экзаменационной выборок по всем рассматриваемым показателям, подтверждённое *t*-критерием Стьюдента, позволило выделить их для условий Кузбасса в качестве обобщенных. Одна-

ко анализ гистограмм эмпирического распределения значений сцепления показал целесообразность использования "модального" значения признака (таблица 1).

Таблица 1. Рекомендуемые нормативные значения физико-механических характеристик грунтов для условий Кузбасса

Свойства	Среднее значение для выборки			Мода
	обучающей	экзаменационной	общее	
Грунт, расположенный выше депрессионной кривой				
С, МПа	0,039	0,037	0,039	**0,024**
ρ, т/м^3	1,94	1,95	**1,95**	1,95
Грунт, расположенный ниже депрессионной кривой				
С, МПа	0,043	0,038	0,041	**0,025**
φ, градус	21	20	**20**	19
ρ, т/м^3	1,98	1,97	**1,98**	1,98

По результатам оценки различий средних значений физико-механических характеристик техногенных суглинистых грунтов дамб, отобранных в отдельных районах Кузбасса, методом однофакторного дисперсионного анализа установлено, что средние значения плотности и угла внутреннего трения грунта ниже депрессионной кривой можно считать постоянными. В выборках сцепления и плотности грунта выше депрессионной кривой методом множественного сравнения по критерию Б. Дункана выявлены неоднородные элементы и произведено их районирование (таблица 2, столбцы 3–7).

Анализ результатов статистической обработки экспериментальных данных показал следующее:

– диапазон фактических значений характеристик обширнее рекомендуемых СП 11-105-97 (часть III, таблица Ж.1) для сцепления – в 5,2; угла внутреннего трения в 3,5; плотности – в 1,8 раза;

– расхождения обобщенных характеристик грунтов выше и ниже депрессионной кривой находятся в пределах погрешности вычислений (сцепление – 0,001 МПа, плотность – 0,03 т/м^3), следовательно, при оценках устойчивости проектируемых дамб из суглинка следует руководствоваться нормативными для условий Кузбасса характеристиками грунта ниже депрессионной кривой (таблица 2, столбец 2).

В третьей главе изложены результаты исследований взаимосвязи физико-механических (сцепление C, угол внутреннего трения φ, естественная влажность W, влажность на границе текучести W_l, влажность на границе раскатывания W_p, плотность ρ, коэффициент водонасыщения S_r, коэффициент пористости e, показатель текучести I_p, число пластичности I_l) характеристик грунтов.

Алгоритм прогноза прочностных характеристик грунта по материалам инженерно-геологических изысканий приведен на рисунке 3.

Исходные данные представлены в виде интервального ряда в координатной плоскости, где ось абсцисс – интервалы факторного (естественная влажность W, влажность на границе текучести W_l, влажность на границе

Таблица 2. Физико-механические характеристики техногенных суглинистых грунтов для условий Кузбасса

Показатель	Обобщенные по Кузбассу[2]	по районам					СП 11-105-97 часть III, таблица Ж.1	
		Кемеровский	Ленинск-Кузнецкий	Новокузнецкий	Прокопьевский	Гурьевский	Свежеобразованные	Слежавшиеся
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Грунт, расположенный выше депрессионной кривой								
φ, градус	$\frac{-}{14-35}$ [3]	$\frac{-}{14-32}$	$\frac{-}{14-29}$	$\frac{-}{18-33}$	$\frac{-}{17-25}$	$\frac{-}{15-35}$	15 – 20	18 – 26
С, МПа	$\frac{0{,}024}{0{,}005-0{,}140}$	$\frac{0{,}021}{0{,}005-0{,}090}$	$\frac{0{,}027}{0{,}005-0{,}140}$	$\frac{0{,}028}{0{,}013-0{,}078}$	$\frac{0{,}033}{0{,}024-0{,}041}$	$\frac{0{,}027}{0{,}010-0{,}050}$	0,030 – 0,050	0,039 – 0,065
ρ, т/м^3	$\frac{1{,}95}{1{,}61-2{,}19}$	$\frac{1{,}93}{1{,}76-2{,}11}$	$\frac{1{,}95}{1{,}62-2{,}11}$	$\frac{1{,}98}{1{,}61-2{,}14}$	$\frac{1{,}90}{1{,}83-2{,}09}$	$\frac{1{,}99}{1{,}63-2{,}19}$	1,50 – 1,80	1,95 – 2,30
Грунт, расположенный ниже депрессионной кривой								
φ, градус	$\frac{20}{11-32}$	$\frac{20}{14-32}$	$\frac{18}{16-24}$	$\frac{21}{18-26}$	$\frac{20}{18-26}$	$\frac{22}{19-23}$	-	-
С, МПа	$\frac{0{,}025}{0{,}005-0{,}117}$	$\frac{0{,}026}{0{,}008-0{,}083}$	$\frac{0{,}024}{0{,}010-0{,}057}$	$\frac{0{,}029}{0{,}005-0{,}083}$	$\frac{0{,}023}{0{,}005-0{,}114}$	$\frac{0{,}028}{0{,}012-0{,}067}$	-	-
ρ, т/м^3	$\frac{1{,}98}{1{,}77-2{,}14}$	$\frac{1{,}97}{1{,}77-2{,}08}$	$\frac{1{,}95}{1{,}89-2{,}99}$	$\frac{1{,}98}{1{,}84-2{,}14}$	$\frac{2{,}12}{1{,}85-2{,}13}$	$\frac{1{,}99}{1{,}93-2{,}04}$	-	-

[2] В числителе указаны обобщенные характеристики (для угла внутреннего трения и плотности – средние; сцепления – модальные), в знаменателе – диапазон изменения характеристик грунтов.

[3] Обобщенное значения угла внутреннего трения не приводится, так как его распределение не получило подтверждения нормальному закону.

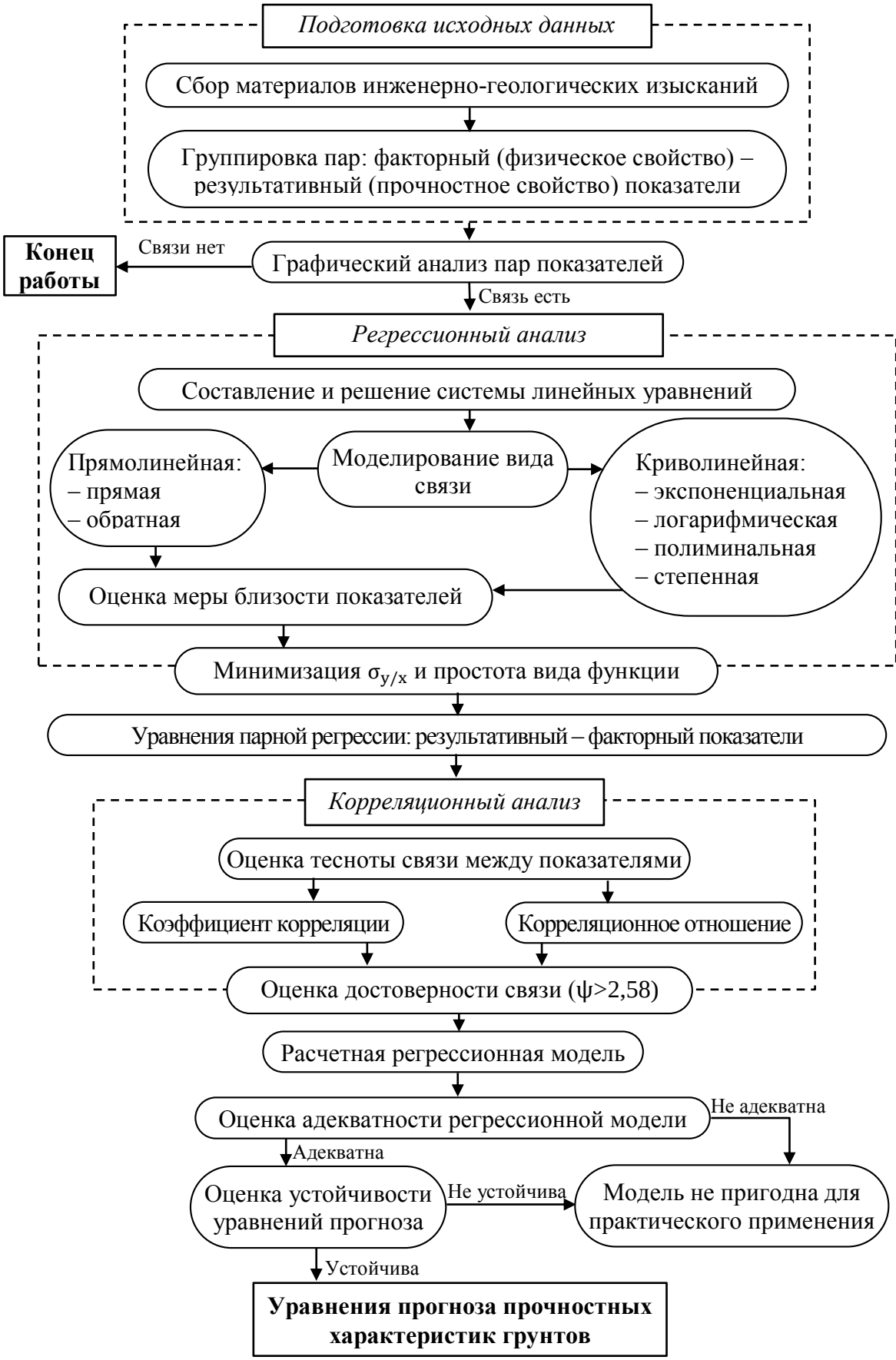


Рисунок 3. Алгоритм прогноза прочностных характеристик грунта

раскатывания W_p, плотность ρ, коэффициент водонасыщения S_r, коэффициент пористости e, показатель текучести I_p, число пластичности I_l) признака, ось ординат – средние значения результативного (сцепление C, угол внутреннего трения φ) признака.

Визуальной оценкой полученных графических моделей отобраны пары с прослеживаемой статистической связью между характеристиками грунта. Регрессионные уравнения, наиболее адекватно описывающие зависимости между факторным и результативным показателями, получены минимизацией суммы квадратов отклонений эмпирических от прогнозируемых значений результативного признака и решения 152 систем линейных уравнений. Исходя из условий простоты функции и минимизации степени рассеяния результативного признака, выбраны оптимальные уравнения парной регрессии.

Парный регрессионный анализ показал, что прочностные характеристики грунта уменьшаются с увеличением его влажности. Сцепление и угол внутреннего трения связаны значимой параболической зависимостью с естественной влажностью W (рисунок 4).

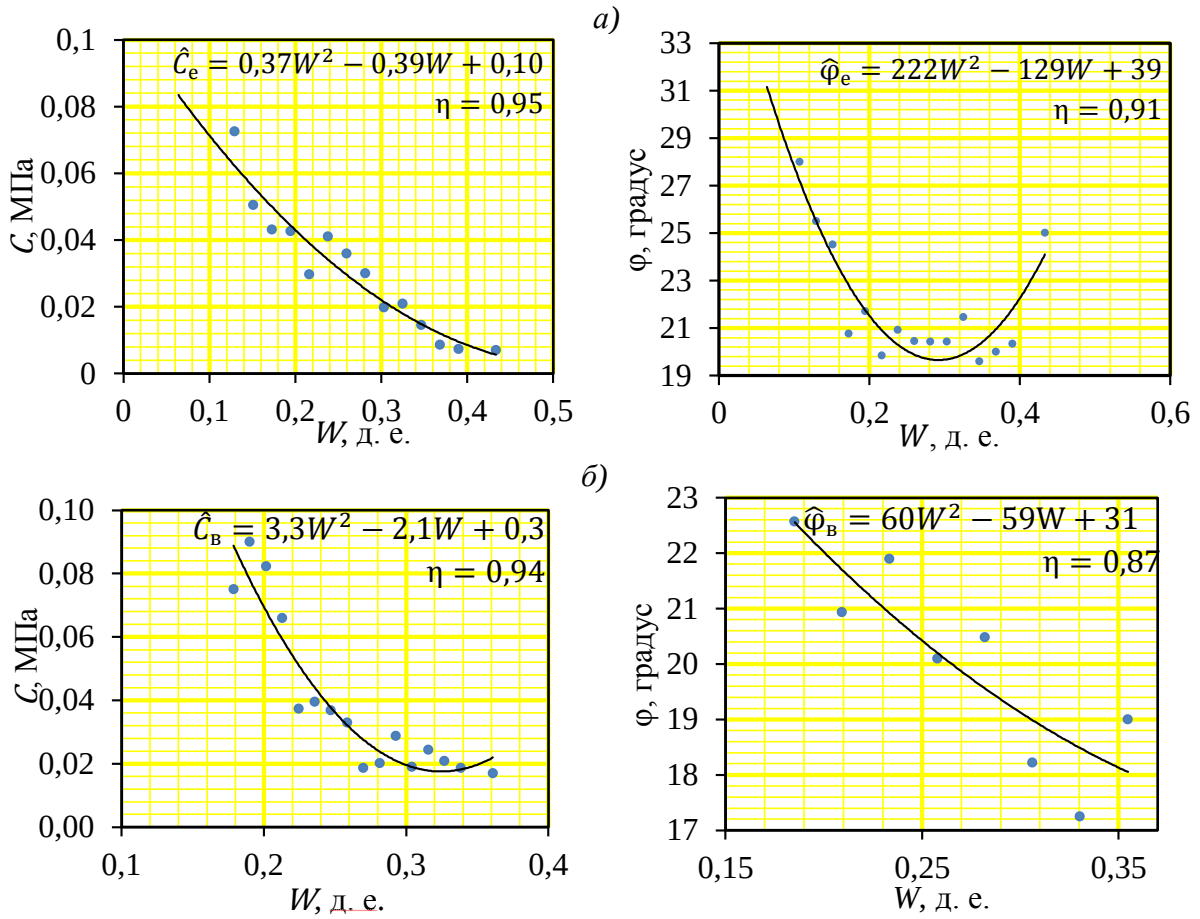


Рисунок 4. Корреляционные зависимости прочностных свойств грунтов, расположенных выше (*а*) и ниже (*б*) депрессионной кривой, от естественной влажности W

Проверка адекватности расчетных моделей подтверждена превышением критического значения критерия Фишера ($F_{кр}$=3,9 при 5 % уровне

значимости) при средней погрешности аппроксимации прочностных характеристик не более 20 %, что сравнимо с лабораторными методами исследований.

Отклонение прогнозных и фактических средних значений физико-механических характеристик техногенных суглинистых грунтов, образцы которых отобраны по дамбам, расположенным в отдельных районах Кузбасса, в среднем для угла внутреннего трения не превышает $\bar{v}_{\varphi e}$= 0,4 %, сцепления – $\bar{v}_{Св}$= -5,8 %.

В четвертой главе представлен метод оперативного прогнозирования параметров дамб из суглинка, с учетом пространственной изменчивости прочностных характеристик грунта (рисунок 5).

Сущность метода заключается в следующем: определяются физико-механические свойства грунта (по материалам инженерных изысканий или прогнозированием сцепления C и угла внутреннего трения φ по имеющимся значениям естественной влажности W, либо по региональной таблице обобщенных значений); методом корреляции аппроксимируются геометрические параметры дамбы прочностными характеристиками грунтов и критериальный показатель безопасности – коэффициент устойчивости k, выражаемый линейным уравнением первого порядка; параметры дамбы корректируются с учетом пространственной изменчивости прочностных характеристик техногенных грунтов; поиск наиболее напряженной поверхности скольжения включает выбор типа основания, моделирование напряженного состояние дамбы, аналитическое выражение поверхности скольжения, параметров блоков и нагрузок.

Проведенные исследования позволили установить, что выбор угла откоса (но не более 40º) сооружения высотой до 20 м возможен по уравнению

$$\beta(C_i;\varphi_i) = 947C_i + 1{,}3\varphi_i - 8 \text{ (при } R\text{=0,80).} \quad (2)$$

Для полученного профиля дамбы производят прогноз устойчивости, определяя значение коэффициента устойчивости, выражающееся трехфакторной корреляционной моделью. Например, при заложении откоса 1:2 и высоте дамбы до 20 м уравнение множественной регрессии примет вид

$$k(C_i,\varphi_i,\rho_i) = 27C_i + 0{,}05\varphi_i - 0{,}4\rho_i + 0{,}6 \text{ (при } R\text{=0,85).} \quad (3)$$

На этапе проектирования дамб уравнение (3) позволяет решать обратную задачу – подбор характеристик грунта, при которых устойчивость дамбы с заданными параметрами будет обеспечена.

Моделирование напряженного состояния грунтовых дамб позволило установить, что для условий Кузбасса при высоте дамбы до 20 м и среднем значении сцепления для всего диапазона изменчивости плотности и угла внутреннего трения изменение коэффициента устойчивости составляет соответственно 10 и 30 % (рисунок 6). Вместе с тем, при средних значениях плотности, угла внутреннего трения и минимальном сцеплении (0,005 МПа)

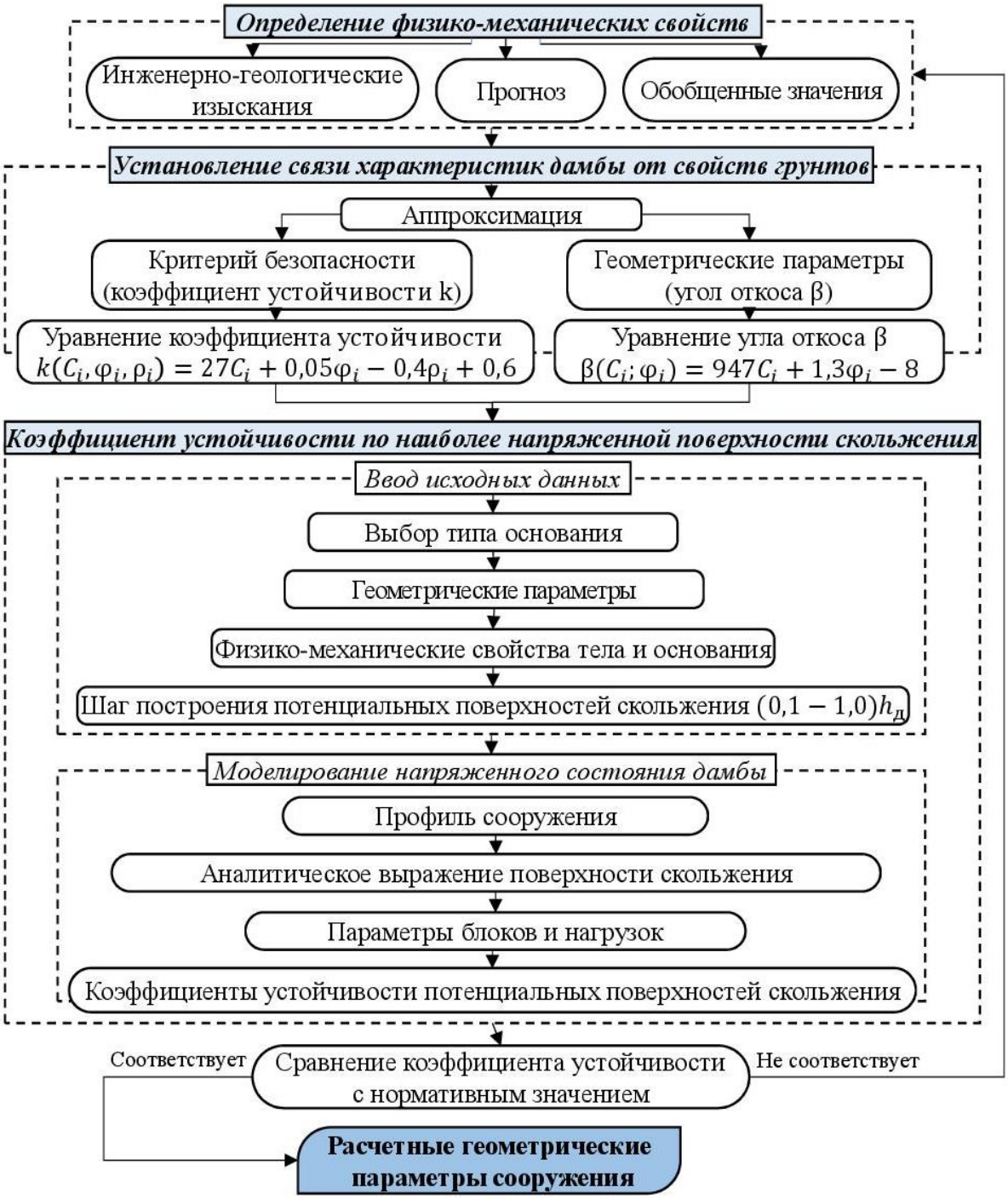


Рисунок 5. Алгоритм аналитического метода прогноза устойчивости дамбы

дамба переходит в состояние предельного равновесия (k=1,0), что указывает на большую вероятность формирования оползня откоса. При вариации сцепления от минимального до максимального значений диапазон изменения коэффициента устойчивости достигает 70 %.

Аналитический метод прогноза устойчивости реализован в программе для ЭВМ "Устойчивая насыпь". Грунтовая дамба представлена в виде двухмерного профиля со следующими элементами: поверхность низового и верхового откосов, гребень, линия контакта с основанием, поверхность скольжения. Элементы профиля в графическом виде изображены прямыми и кри-

выми линиями. Моделирование произведено в декартовой системе координат: начало – нижняя бровка низового откоса, ось абсцисс совпадает с линией горизонта, ось ординат отражает высотные отметки дамбы. Положение элементов на плоскости выражено уравнениями в координатной форме.

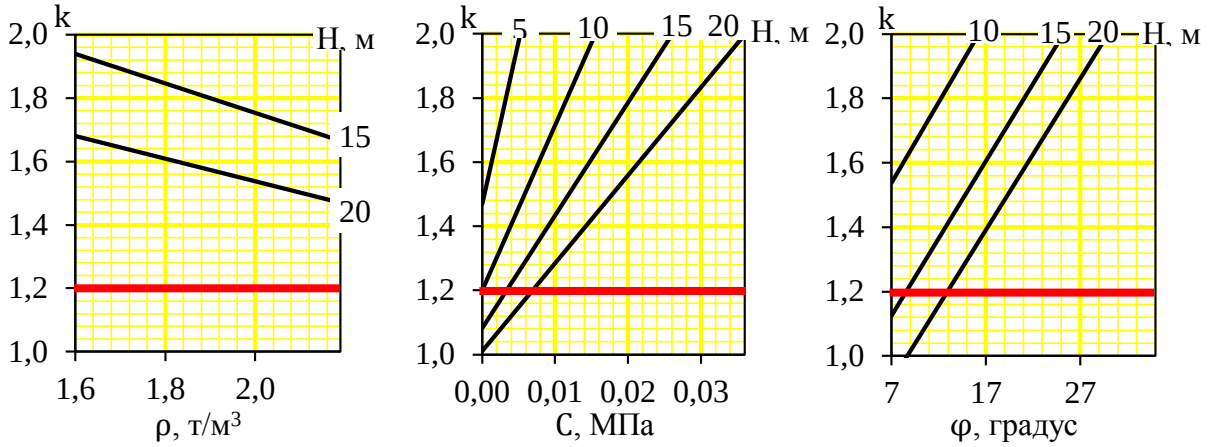


Рисунок 6. Зависимость коэффициента устойчивости k от изменчивости характеристик грунта

Расчетом устойчивости реальных дамб (пример одной из них представлен на рисунке 7) аналитическим способом и по корреляционной связи для физико-механических свойств, определенных по результатам инженерно-геологических изысканий или прогнозом сцепления C, угла внутреннего трения φ по естественной влажности W, либо обобщенных для дамб Кузбасса (таблица 3), установлено следующее:

– незначительное (до 10 %) расхождение коэффициента устойчивости, позволяющее на этапе проектирования дамб использовать наименее трудоемкий способ прогноза – по корреляционным связям;

– на этапе эксплуатации дамбы оценку устойчивости дамбы выполнять по прочностным характеристикам грунтов, полученным по инженерно-геологическим изысканиям, т. к. прогнозные значения дают завышенное значение коэффициента устойчивости;

– на этапе проектирования целесообразно пользоваться таблицей региональных свойств, в этом случае получается несколько заниженный коэффициент устойчивости, что сработает в дополнительный запас устойчивости дамбы.

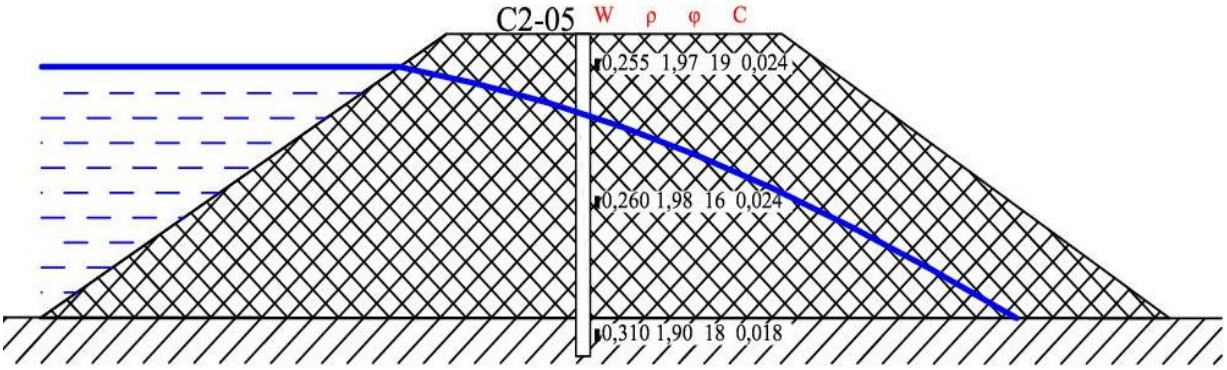


Рисунок 7. Профиль грунтовой дамбы (объект 17)

Таблица 3. Прогноз устойчивости грунтовых дамб Кузбасса

Шифр объекта	Свойства			Параметры дамбы		Коэффициент устойчивости, определенный	
	по изысканиям	прогнозные	обобщенные	высота $h_д$, м	заложение откоса	по корреляционной связи	аналитическим способом
9	20[4] 0,023 1,98	20 0,031 1,98	20 0,025 1,98	12,7	1:2,4	1,91[5] 2,25 1,99	2,14 2,52 2,23
14	20 0,041 1,94	21 0,047 1,98		7,5	1:2,9	5,38 5,95 3,35	5,34 5,70 3,29
15	22 0,038 2,00	20 0,041 1,98		17,8	1:2,5	2,38 2,41 1,78	2,52 2,52 1,95
16	21 0,030 1,98	21 0,043 1,98		6	1:1,7	3,27 4,23 2,67	3,15 4,13 2,72
17	18 0,021 1,92	19 0,022 1,98		7,5	1:1,0	1,27 1,35 1,41	1,30 1,39 1,43

Заключение

Диссертация является научно квалификационной работой, в которой изложены научно-обоснованные технические решения по аналитическому методу прогноза устойчивости грунтовых дамб, включающему аппроксимацию линейными уравнениями первого порядка геометрических параметров или критерия безопасности (коэффициент устойчивости k) с учетом пространственной изменчивости прочностных свойств техногенных грунтов, снижающие трудоемкость определения их параметров на этапе проектирования и имеющие существенное значение для обеспечения безопасных условий эксплуатации накопителей жидких отходов горнопромышленных предприятий.

Основные научные и практические результаты исследований:

1. Изменчивость свойств техногенных грунтов, характеризуемая коэффициентом вариации V, отдельного объекта и совокупности объектов по глубине и площади носит случайный характер, имеет небольшой (до 4 %) разброс значений по плотности (ρ = 1,77–2,19 г/см^3), несколько больший (до 15 %) диапазон угла внутреннего трения (φ = 11º–35º) и весьма значимое (до 69 %) варьирование значений сцепления (C = 0,009–0,113 МПа). Диапазон фактических характеристик грунта обширнее рекомендуемых

[4] Первое число в ячейке соответствует углу внутреннего трения, градус; второе – сцеплению, МПа; третье – плотности, г/см^3.

[5] Первое число в ячейке соответствует коэффициенту устойчивости, определенному по материалам инженерно-геологических изысканий; второе – по прогнозным прочностным характеристикам; третье – по обобщенным свойствам.

СП 11-105-97 для сцепления – в 5, угла внутреннего трения – в 3,5, плотности – в 1,8 раза. Для надежной оценки устойчивости грунтовых дамб на этапе их проектирования целесообразно использовать нормативные характеристики физико-механических свойств суглинистых грунтов для условий Кузбасса: средние значения плотности (ρ= 1,98 г/см^3) и угла внутреннего трения (φ= 20°), модальное – сцепления (C= 0,025 МПа).

2. На практике зачастую имеются материалы исследования гранулометрического состава и физических характеристик грунтов (плотность, влажность), которые связаны с прочностными (сцепление C, угол внутреннего трения φ), необходимыми для оценки устойчивости дамбы. Отыскание регрессионного уравнения, характеризуемого минимальной средней квадратической погрешностью и наиболее адекватно описывающего зависимость между физико-механическими характеристиками грунтов, основано на минимизации суммы квадратов отклонений S эмпирических y_i от прогнозируемых значений $\widehat{y}_i$ прочностных свойств. Прочностные характеристики грунта ниже депрессионной кривой уменьшаются с увеличением его естественной влажности W(при $W = 0{,}20 - 0{,}30$) и выражаются тесной параболической зависимостью ($\eta_{xy} > 0{,}87$).

3. Аналитический метод прогноза устойчивости дамбы включает: определение физико-механических свойств грунтов по материалам инженерно-геологических изысканий, при их отсутствии – прогнозированием прочностных характеристик (сцепление C, угол внутреннего трения φ) по имеющимся физическим (естественная влажность W), либо региональной таблице нормативных значений; аппроксимацию уравнением первого порядка геометрических параметров либо критерия безопасности (коэффициент устойчивости k) характеристиками прочности грунтов; отыскание наиболее напряженной поверхности скольжения путем формализации профиля дамбы уравнениями прямой в координатной форме, поверхности скольжения и депрессионной кривой уравнениями дуги окружности, векторов действующих нагрузок координатами многоугольников сил и обоснование на этой основе геометрических параметров дамбы с учетом пространственной изменчивости прочностных свойств техногенных грунтов.

4. Коэффициенты устойчивости дамбы по сертифицированным программам и программе для ЭВМ «Устойчивая насыпь», разработанной автором (в соавторстве), находятся в пределах погрешности округления, что позволяет рекомендовать эту программу для инженерных расчетов.

5. Результаты диссертационных исследований реализованы в форме методических рекомендаций "Обобщение физико-механических характеристик техногенных глинистых грунтов", принятых к использованию проектными организациями ОАО "Кузбассгипрошахт" и ООО "Сибгеопроект"; программы для ЭВМ "Устойчивая насыпь", зарегистрированной в Реестре программ для ЭВМ Российской Федерации; региональной таблицы физико-механических характеристик техногенных суглинистых грунтов для условий Кузбасса.

Внедрение разработок в практику проектных работ способствовало снижению трудоемкости расчетов и позволило обеспечить учет изменчивости прочностных характеристик грунтов при оценке устойчивости дамб.

Основное содержание диссертации опубликовано
в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Бахаева, С. П. Прогноз параметров дамбы на основе моделирования напряженно-деформированного состояния откоса / С. П. Бахаева, **Д. В. Гурьев** // Вестник КузГТУ. – 2016. – № 1. – С. 12–16.

2. **Гурьев, Д. В**. Обобщение характеристик дисперсных грунтов техногенных массивов на примере Кузбасса / Д. В. Гурьев // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 3. – С. 31–36.

3. Бахаева, С. П. Исследование влияния изменчивости физико-механических свойств полусухих хвостов на устойчивость отвала / С. П. Бахаева, **Д. В. Гурьев** // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 8. – С. 54–57.

4. Бахаева, С. П. Исследование влияния изменчивости физико-механических свойств грунтов на устойчивость дамб / С. П. Бахаева, **Д. В. Гурьев**, Т. В. Михайлова // Маркшейдерский вестник. – 2013. – № 5. – С. 11–14.

Свидетельства на программы для ЭВМ:

5. Свидетельство № 2015617755 о государственной регистрации программы для ЭВМ "Устойчивая насыпь" / **Д. В. Гурьев**, М. М. Караблин // заявл. 23.04.2015; №2015613416; зарегистр. 22.07.2015.

Прочие публикации:

6. Bakhaeva, S. P. Analytical Prediction of Stability of Earthfill Dam / S. P. Bakhaeva, **D. V. Guriev** // Proceedings of the 8th Russian-Chinese Symposium “Coal in the 21st Century: Mining, Processing, Safety». – Beijing, 2016. – P. 188–192.

7. **Гурьев Д. В.** Влияние изменчивости физико-механических свойств грунтов на устойчивость откосных сооружений [Электр. ресурс] / Д. В. Гурьев // Сборник материалов всероссийской научно-технической конференции с международным участием "Современные проблемы в горном деле и методы моделирования горно-геологических условий при разработке месторождений полезных ископаемых". Кемерово. – 2015.

8. Бахаева С. П. Моделирование напряженно-деформированного состояния откосного сооружения от изменчивости прочностных свойств техногенных грунтов / С. П. Бахаева, **Д. В. Гурьев** // Сборник тезисов VI

Уральского горнопромышленный форума. Екатеринбург. – 2015. – С. 122 – 123.

9. Бахаева С. П. Оценка влияния пространственно-временного изменения свойств техногенных грунтов на устойчивость откосного горнотехнического сооружения / С. П. Бахаева, **Д. В. Гурьев** // Сборник научных статей международной научно-практической конференции "Инновация-2015". Ташкент. – 2015. – С. 45 – 46.

10. Бахаева С. П. Автоматизированная оценка устойчивости грунтовых дамб [Электр. ресурс] / С. П. Бахаева, **Д. В. Гурьев**, М. М. Караблин // Сборник материалов XV международной научно-практической конференции "Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. СИБРЕСУРС 2014". Кемерово. – 2014.

11. Бахаева С. П. Статистические методы при формировании региональной таблицы физико-механических свойств глинистых грунтов / С. П. Бахаева, **Д. В. Гурьев**// Сборник тезисов Кузбасского международного угольного форума "Энергетическая безопасность России: Новые подходы к развитию угольной промышленности". Кемерово. – 2014. – С. 215 – 218.

12. **Гурьев Д. В.** Исследование влияния изменчивости физико-механических свойств грунтов на устойчивость дамб / Д. В. Гурьев // Сборник тезисов международного форум-конкурса молодых ученых "Проблемы недропользования". Санкт-Петербург. – 2013. – С. 177.

13. **Гурьев Д. В.** Оценка устойчивости намывной дамбы гидроотвала с учетом изменчивости свойств грунтов / Д. В. Гурьев // Сборник тезисов докладов новосибирской межвузовской научной конференции "Интеллектуальный потенциал Сибири" (часть 1). Новосибирск. – 2012.– С. 41.

14. **Гурьев Д. В.** Оценка влияния природных и техногенных факторов на устойчивость дамбы гидроотвала №3 / Д. В. Гурьев // Сборник материалов IV всероссийской, 57 научно-практической конференции молодых ученых "РОССИЯ МОЛОДАЯ". Кемерово. – 2012. – С. 47 – 49.

15. Бахаева С. П. Оценка влияния природных и техногенных факторов на устойчивость дамбы гидроотвала №3 / С. П. Бахаева, **Д. В. Гурьев** // Сборник материалов IV всероссийской, 57 научно-практической конференции молодых ученых "РОССИЯ МОЛОДАЯ". Кемерово – 2012. – С. 47 – 49.

Подписано в печать __.__.2017. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе
Уч.-изд. л. ___. Тираж ___ экз. Заказ №__

КузГТУ, 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.
Издательский Центр УИП КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4а.