

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
"Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева"

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"

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
доцент Бахаева С.П.

Кемерово 2017

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ И ИХ ЗНАЧИМОСТИ В ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ НАСЫПНЫХ СООРУЖЕНИЙ	11
1.1. Инженерно-геологические исследования свойств грунтов.....	12
1.2. Геофизические исследования грунтов.....	22
1.3. Гидрогеологические наблюдения.....	24
1.4. Состояние вопроса исследования устойчивости откосных сооружений.....	27
2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО- МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ НАСЫПНЫХ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ.....	34
2.1. Подготовка массива исходных данных	34
2.2. Анализ пространственной изменчивости свойств.....	36
2.3. Определение статистических характеристик.....	41
2.4. Проверка закона распределения	45
2.5. Сравнение средних значений.....	51
2.6. Установление однородности средних значений с общей выборкой	53
2.7. Определение неоднородных объектов в генеральной совокупности.....	55
2.8. Выводы по главе 2.....	58
3. ПРОГНОЗ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ	62
3.1. Определение наличия связи между свойствами	62
3.2. Регрессионный анализ связи.....	65
3.3. Корреляционный анализ.....	71
3.4. Выводы по главе 3.....	80
4. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВОЙ ДАМБЫ.....	83
4.1. Установление зависимости коэффициента устойчивости от изменчивости характеристик грунтов.....	83
4.2. Аппроксимация геометрических параметров дамбы прочностными характеристиками грунтов.....	88

4.3. Моделирование напряженного состояния грунтовых дамб	91
4.3.1. Дамба на горизонтальном прочном основании	91
4.3.2. Дамба на горизонтальном слабом (водонасыщенном) основании	94
4.3.3. Дамба на наклонном слоистом основании	98
4.4. Расчет устойчивости грунтовой дамбы аналитическим методом.....	104
4.5. Выводы по главе 4.....	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	112
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	124
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	138

ВВЕДЕНИЕ

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, расчет которого основан на знании 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.

Степень разработанности темы

Подоснова диссертационного исследования была сформирована анализом и изучением научных работ отечественных и зарубежных ученых.

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 со-

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

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 прочностных и физических 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, сложенных дисперсными связными техногенно перемещенными природными суглинистыми грунтами¹.

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 от прочностных свойств грунтов.

Основные задачи исследований

- анализ и обобщение пространственной изменчивости физико-механических характеристик техногенных грунтов;
- установление взаимосвязи прочностных и физических 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

¹ Далее по тексту – техногенные суглинистые грунты

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 характеристиками 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.

Методология и методы исследования

Методология исследований заключается в ретроспективном анализе существующих научно-методических разработок по изучению физико-механических свойств грунтов и прогнозу устойчивости грунтовых дамб; обработке результатов инженерно-геологических изысканий с использованием методов математической статистики и корреляции; аналитическом моделировании реальной дамбы и ее напряженного состояния; аппроксимации 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 характери-

ками (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 проверки;
- 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 аппроксимации геометрических параметров дамб прочностными характеристиками дисперсных суглинистых 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 "КУЗБАСС-НИИОГР". 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: 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-практической 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.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИЗУЧЕНИЯ СВОЙСТВ И ИХ ЗНАЧИМОСТИ В ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ НАСЫПНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Самое глубокое представление о структуре, литологическом строении грунтового массива, степени его обводнения и других важнейших показателей дает полный комплекс инженерно-геологических изысканий. Однако нормативными документами (СНиП II-15-74 [1]; СП 22.13330.2011 [2], СП 11-105-97 [3, 4]) не предусматривается обязательное проведение изысканий для дамб III и IV классов. Как правило, изыскания проводят по грунтам основания и грунтового карьера, которые на момент изысканий находятся в условиях естественного залегания и могут обладать достаточно высокими прочностными показателями вполне пригодными для их добычи в целях строительства дамб. В процессе извлечения, транспортировки, укладки техногенных грунтов в тело и уплотнения на прочностные характеристики оказывает влияние целый ряд внешних воздействий, приводящих к их существенному изменению, как правило, в худшую сторону. Поэтому информацию о свойствах техногенных грунтов целесообразно анализировать и обобщать в реальных условиях эксплуатации сооружений, когда они находятся под влиянием нагрузок и воздействий природного и техногенного характера.

При разработке проектной документации зачастую нормативные и расчетные значения прочностных и деформационных характеристик грунтов определяют по таблицам СП 22.13330.2011 приложения Б[2], либо СП 11-105-97 приложения Ж [4]. Против использования табличных свойств, приведенных в СП 22.13330.2011, Э. Р. Черняк приводит следующие доводы: эти таблицы составлялись на основе значений грунтов всей территории бывшего Советского Союза; большая часть грунтов оснований и сооружений территории России не входит в указанные таблицы; не учитывается возможное влияние генезиса грунтов; исходные данные получены по старым стандартам и обработаны в "докомпьютерную эру", что предопределяет их низкую точность; использование "входа" в таблицы для глинистых грунтов в виде коэффициента пористости, когда их физико-механические свойства

в большей степени определяются показателями пластичности, влажностью и коэффициентом водонасыщения [5]. В итоге автор цитируемой статьи выражает надежду, что будущее за таблицами региональных свойств.

Поиск решения для получения надежных данных по грунтам с минимальными затратами стал одной из причин разработки в 1981 г. ПНИИИС Госстроя СССР «Руководства по составлению региональных таблиц нормативных и расчетных показателей свойств грунтов» [6]. В этом документе изложена методика обобщения данных по физико-механическим свойствам грунтов статистическими методами и изучения связей между показателями прочностных и физических свойств грунтов.

В подавляющем большинстве работы по созданию таблиц общих и региональных свойств ориентированы на грунты естественного сложения. Сведения об обобщении техногенных грунтов приводятся в "Правилах обеспечения устойчивости откосов..." [7] и в СП 22.13330.2011. При этом в СП 22.13330.2011 прочностные характеристики техногенных грунтов выбираются по значениям физических свойств, которые на этапе проектирования зачастую отсутствуют.

1.1. Инженерно-геологические исследования свойств грунтов

Вопросами инженерно-геологических исследований грунтов, описанием и обобщением занимались многие ученые, среди которых можно отметить следующих.

Основоположником инженерной геологии, а также гидрологии в нашей стране считается Ф. П. Саваренский. Он первым разработал генетическую классификацию грунтов и классификацию физико-геологических явлений, сформулировал принципы инженерно-геологического районирования территории страны, предложив, в частности, карту геотехнического районирования по признакам просадочности лёссов, допустимых нагрузок на грунты; определил и главную задачу инженерной геологии: организация управления устойчивостью сооружений и геологическими процессами [8].

Продолжатель научной школы Ф. П. Саваренского Н. В. Коломенский изучал трение и сцепления рыхлых грунтов и рассматривал их как материал для насыпей, а также успешно работал над изучением процессов выветривания грунтов [9].

Одновременно исследования по грунтам проводились В. А. Приклонским, сформулировавшим положение о стадиях и этапах формирования свойств грунтов в процессе литогенеза, выделившим прогрессивный и регрессивный литогенез, и также разработавшим генетическую инженерно-геологическую классификацию грунтов и общую схему комплексного инженерно-геологического изучения грунтов. Под его руководством проведены работы по характеристике особенностей грунтов на оползневых склонах и намечены пути их изучения [10,11].

Одним из крупнейших ученых, занимающихся вопросами изучения свойств грунтов является В. Д. Ломтадзе. Результаты его многолетних исследований отражены более чем в 138 опубликованных научных трудах. Им созданы фундаментальные учебники и научно-методические пособия по исследованию грунтов [12 – 17].

Родоначальником такого направления инженерной геологии как мерзлотоведение в СССР считается Н. А. Цытович, изучавший физико-механические свойства мерзлых грунтов и льда. Под его руководством впервые проведены испытания мерзлых образцов грунта при кратковременных нагрузках и экспериментально доказано, что сопротивление мерзлых грунтов внешней нагрузке зависит от их состава, влажности и температуры, создал методику расчета фундаментов сооружений на мерзлом основании и способы их закрепления в многолетнемерзлых грунтах. Опубликовал первую инструкцию по исследованию вечной мерзлоты в строительных целях и обобщил свои знания не только в вопросах изучения мерзлых грунтов, но и грунтов естественного сложения в работе "Механика грунтов" [18].

Русско-американский ученый Г. П. Чебаторев, как инженер с большим опытом работы в строительстве на территориях СССР, Египта, Берлина и США, обобщил свои исследования в области механики грунтов в фундаментальном труде "Механика грунтов, основания и земляные сооружения" [19]. Область его научных интересов затрагивает устойчивость откосов, бортов выемок, распределение напряжений в основании сооружений и их несущая способность, боковое давление грунта; им разработаны методы искусственного уплотнения грунтов, разведки основания бурением и пенетрацией.

С. Р. Месчаном выполнены исследования в области одномерной и сдвиговой ползучести глинистых грунтов: разработан метод выделения ползучести скелета этих грунтов из общего процесса длительного деформирования, раскрыта природа этих деформаций; сформулирован обобщённый закон сдвиговой ползучести, связывающий между собой нелинейную деформацию сдвига, касательное напряжение, время, нормальное напряжение и параметры прочности [20, 21].

М. Н. Гольдштейн разрабатывал методы повышения устойчивости земляного полотна и оснований инженерных сооружений железных и автомобильных дорог, методологию расчетов устойчивости земляного полотна на основе компьютерных технологий; контролировал качество уплотнения грунтов методом динамического зондирования и акустическими методами [21, 22].

И. В. Попов работал над очень широким кругом научных проблем и первым разработал учение о формациях при региональных инженерно-геологических исследованиях. Опубликовал более 150 научных работ по различным вопросам грунтоведения и инженерной геологии. Большой вклад И. В. Попов внес в развитие инженерной геодинамики, как одного из научных направлений инженерной геологии. Он занимался региональным изучением оползней, карста, просадок в лёссах и др. геологическими процессами и явлениями; внедрял новые методы и технические средства при оценке инженерно-геологических условий и прогнозе их изменений [24].

Следует также отметить работы М. П. Лысенко, который описывал структуры и типы грунтов, определял характерные свойства и их происхождение [25]; Е. М. Сергеева, который изучал корреляционные зависимости между свойствами грунтов и природу прочности дисперсных грунтов; создал генетические, общие и частные классификации грунтов и ввел понятие об "оптимальной нагрузке уплотнения" [26, 27].

Значительная часть исследований характеристик состава, строения, состояния и свойств грунтов принадлежит А. М. Гальперину и его соавторам, в трудах которых изложены современные представления об особенностях массива горных пород и методах исследований, включая намывные глинистые грунты [28].

Изучением техногенных грунтов городских территорий занимался Ф. В. Котлов, которого считают главным специалистом в этой области. Им были проведены инженерно-геологические изыскания в более 20 городах СССР. Он является основоположником двух научных направлений: инженерной геологии городов и изменения геологической среды, теории и методики изучения антропогенных геологических процессов [29].

Следует отметить вклад ученых Кузбасса в изучение, разработку способов прогноза и обобщение физико-механических свойств горных пород – В. А. Шаламанова, В. В. Першина, Г. Г. Штумпфа, И. А. Паначева [30, 31, 32].

Различным областям инженерной геологии посвящены труды зарубежных ученых, например, К. Terzaghi [33]. Область его интересов – свойства и количественные аспекты водопроницаемости грунтов; анализ сил, действующих на подпорные стенки; им изобретены новые измерительные приборы, на которых он самостоятельно продолжительное время проводил наблюдения.

В Великобритании широко известно имя А. W. Skempton [34], научные взгляды которого касались гидротехнического строительства. Им исследовались процессы фильтрации воды в теле дамбы, консолидации слабых аллювиальных глин, сформулировано понятие коэффициента гидравлического давления пор грунта.

Подобными исследованиями занимался также норвежский ученый L. Bjerrum, [35]. В список его научных заслуг входят общий обзор особенностей работы слабых грунтов; детальное описание зависимости показателей жесткости и прочности грунтов от коэффициентов пористости и переуплотнения, скорости деформации и составляющих напряжения, а также эффекты объемной и девиаторной ползучести.

Чехословацкими учеными ZarubaQ. и MenclV. [36] исследуются отношения между геологией строительной площадки и инженерным сооружением. Собираются доказательства огромного значения инженерной геологии в планировании, проектировании, строительстве и эксплуатации инженерных сооружений. Большое внимание уделяется изучению механического поведения грунтов и геофизическим методам, проведению зондирования для строительства.

Актуальность проблемы по исследованию грунтов в текущем столетии подтверждается широким спектром патентообладателей устройств по исследованию грунтов. В частности, ФГБОУ ВПО "КубГАУ" создано устройство для отбора и комплексного анализа грунтов с нарушенной структурой в полевых условиях [37]; ФГБОУ ВПО "ДВФУ" – устройство для отбора проб материала, слагающего россыпные месторождения. Применение этого устройства обеспечивает сохранность первоначальной структуры образца при его выемке из опробуемого массива россыпного месторождения [38]; ФГБОУ ВПО "ДальГУПС" – устройство для диагностики и прогноза состояния грунтовых технических систем на слабых грунтах и оползневых склонах, позволяющее измерить смещения грунтов в любых направлениях при однократном воздействии вибродинамической нагрузки [39]; ООО "НПП "Геотек" – устройство, предназначенное для определения механических свойств грунтов в полевых условиях при проведении инженерно-геологических изысканий и обследования грунтов в основании существующих фундаментов [40]; ФГАОУ ВО "РУДН" и Малым производственным предприятием "Диагностика гидротехнических, энергетических и других ответственных сооружений" созданы устройства для комплексного зондирования, позволяющие определять физико-механические свойства не скальных грунтов при проведении инженерно-геологических изысканий, но отличающиеся конструкцией и числом регистрирующих датчиков [41, 42].

В последнее время в Кузбассе получили развитие инженерно-геологические исследования техногенных грунтов дамб накопителей жидких отходов промышленных, в том числе горнодобывающих, предприятий. Рассмотрим основные из них, в которых на различных этапах принимал участие автор диссертации.

Проходка горных выработок

Среди горных выработок различают скважины, закопушки, расчистки, дудки, канавы, траншеи, шурфы, шахты и их выбор производят с учетом условий залегания, состава и состояния грунтов, наличия крупных включений, их крепости, наличия подземных вод и мощности техногенных отложений руководствуясь требованиями СП 11-105-97 [43]. Учитывая чрезвычайно широкий диапазон разновид-

ностей техногенных грунтов, их изучение проводится различными способами бурения скважин: ударно-канатным, с кольцевым или сплошным забоем, вибрационным, шнековым, а также колонковым способами с отбором монолитов.

С целью изучения свойств техногенных грунтов дамб накопителей жидких отходов горнопромышленных предприятий Кузбасса выполняют бурение скважин самоходной буровой установкой УРБ-2а-2 колонковым снарядом диаметром 132 – 160 мм. По окончании буровых работ производят замер уровня воды в скважинах. Монолиты грунта отбирают тонкостенным грунтоносом стаканного типа диаметром 127 мм. По результатам бурения строят геологические разрезы (рисунок 1.1).

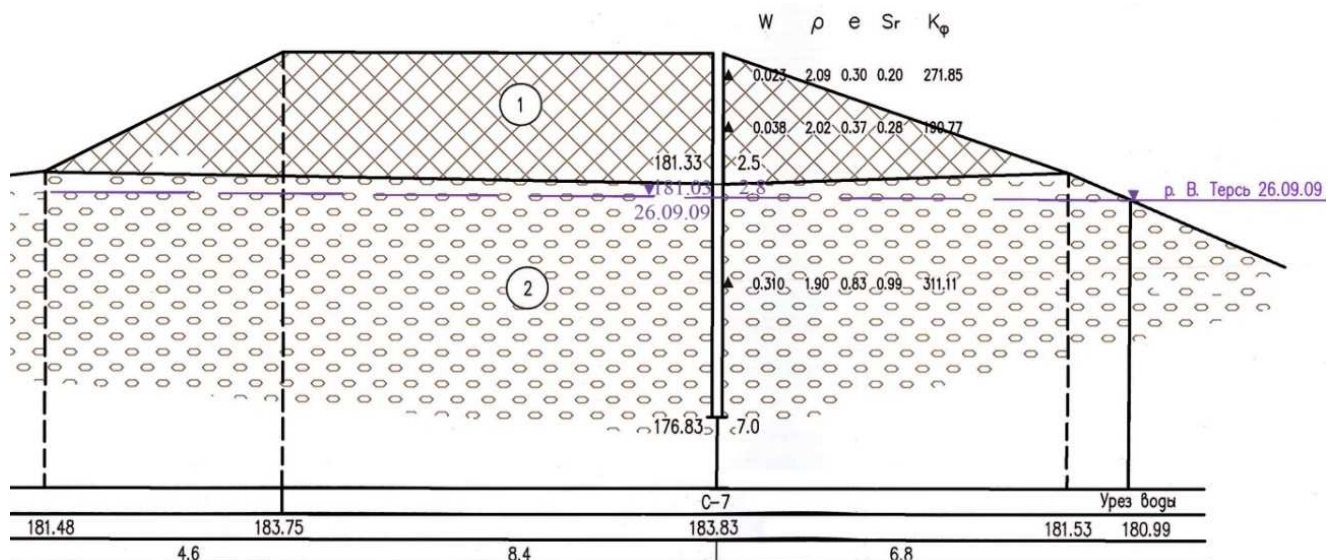


Рисунок 1.1. Инженерно-геологический разрез по дамбе отстойника шахтных вод: 1 – тело дамбы, 2 – основание

Проходка горных выработок является дорогостоящей работой, и отобранные образцы характеризуют только точечный участок изучаемой местности, поэтому предварительно на площади, подлежащей изучению, проводят полевые исследования.

Полевые исследования

При полевых исследованиях песчаных и глинистых грунтов, в которых частицы крупнее 10 мм составляют не более 25 % по массе, используется статическое зондирование.

Статическое зондирование проводят путем вдавливания в грунт с постоянной скоростью штанги с закрепленным на ней конусным наконечником (рисунок 1.2)

установкой (например, СП-59 с комплектом аппаратуры "ПИКА-15"). Замеры значений сопротивлений под наконечником и на боковой поверхности зонда с фиксированием величины порового давления выполняют через 2 м по глубине. При этом отдельно измеряют сопротивления вдавливанию конуса и трению погружения штанги.

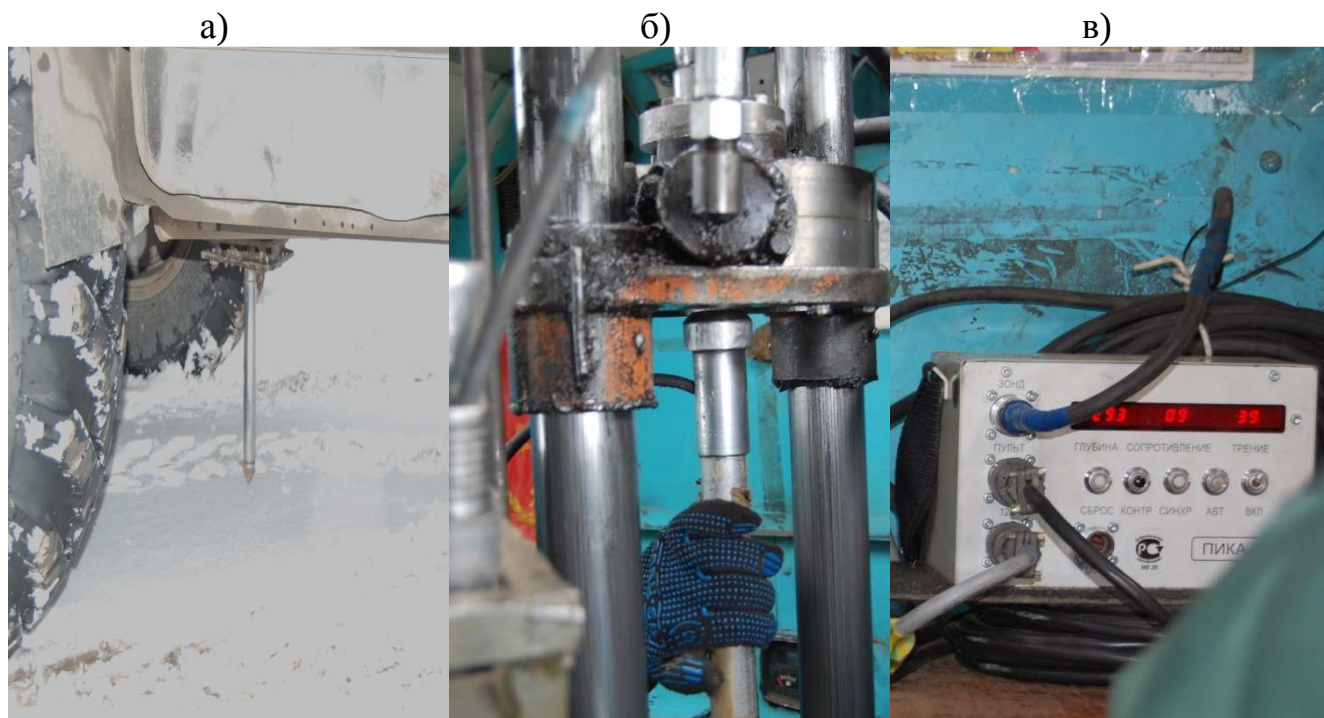


Рисунок 1.2. Пример зонда (а), вдавливающего устройства (б) и регистрирующей аппаратуры (в) при статическом зондировании грунтов

Развитие техники и технологий позволило применять на установках тензометрические датчики, автоматическую запись результатов, использовать встроенные инклинометры и датчики порового давления.

Статическое зондирование предназначено для решения определенных задач исследований грунта [44–45]: выделение инженерно-геологических элементов – толщины слоев, линз, границ распределения; оценка пространственной изменчивости свойств и состава грунта; определение глубины залегания скальных и крупнообломочных грунтов; приближенная количественная оценка физико-механических свойств; определение степени уплотнения и упрочнения грунтов.

СП 11-105-97 [43] рекомендует применять статическое зондирование в сочетании с другими методами определения свойств грунтов. Для интерпретации данных зондирования часть точек необходимо размещать рядом (на расстоянии 2 – 5 м)

с горными выработками [46].

Результаты статического зондирования представляют в виде графиков, ось ординат которых отображает значения глубины вдавливания, а ось абсцисс – сопротивление погружению конуса q_c или местного трения по муфте f_s (рисунок 1.3).

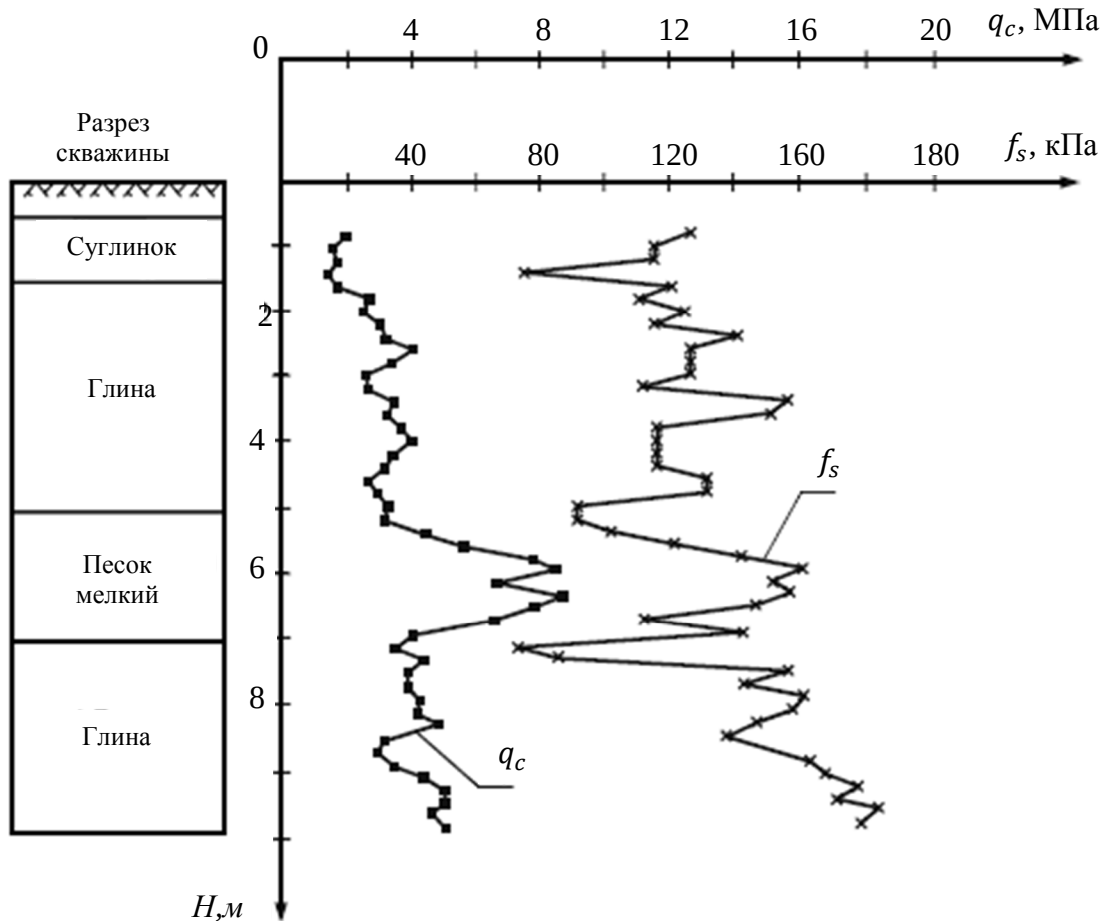


Рисунок 1.3. График результатов статического зондирования

После исследования грунтов на стадии проектирования возникает необходимость отслеживания их состояния на этапах строительства и/или эксплуатации, для чего применяют стационарные наблюдения.

Стационарные наблюдения

При изысканиях на территории распространения техногенных грунтов выполняются стационарные наблюдения за динамикой изменения физико-механических свойств техногенных и подстилающих их грунтов (уплотнение и упрочнение) и за режимом техногенного водоносного горизонта. Для этого используют зондирование, геофизические и лабораторные методы.

Расположение локальных зон обводнения в дамбах определяют по данным геоэлектрического контроля. Сущность этого метода основана на измерениях аномалий параметров, искусственно возбуждаемых в массиве электрических полей постоянного или низкочастотного переменного тока. Поскольку влагонасыщение высокопористых глинистых грунтов существенно изменяет их электрофизические свойства, это позволяет контролировать геометрические параметры обводненных зон по аномалиям электрических полей. Надежная интерпретация результатов электрометрических методов контроля обеспечивается за счет привязки прогнозируемого положения депрессионной кривой в теле дамбы к гидрогеологическим наблюдениям [47].

Наблюдения за изменением порового давления в водонасыщенных глинистых грунтах заключаются в следующем: проектируют профиль наблюдательных скважин, расположенных перпендикулярно простиранию откосов сооружения (рисунок 1.4). Скважины наблюдательной станции оборудуют контрольно-измерительной аппаратурой для замеров порового давления в грунтах призмы возможного оползания. Датчики устанавливают в процессе бурения скважин в водонасыщенные пылевато-глинистые грунты намывного массива и обводненные слои естественного основания. Необходимое число приборов и расположение их в массиве определяют исходя из условия получения полной информации о распределении порового давления в пределах призмы возможного обрушения откоса сооружения на участке наблюдений [48].

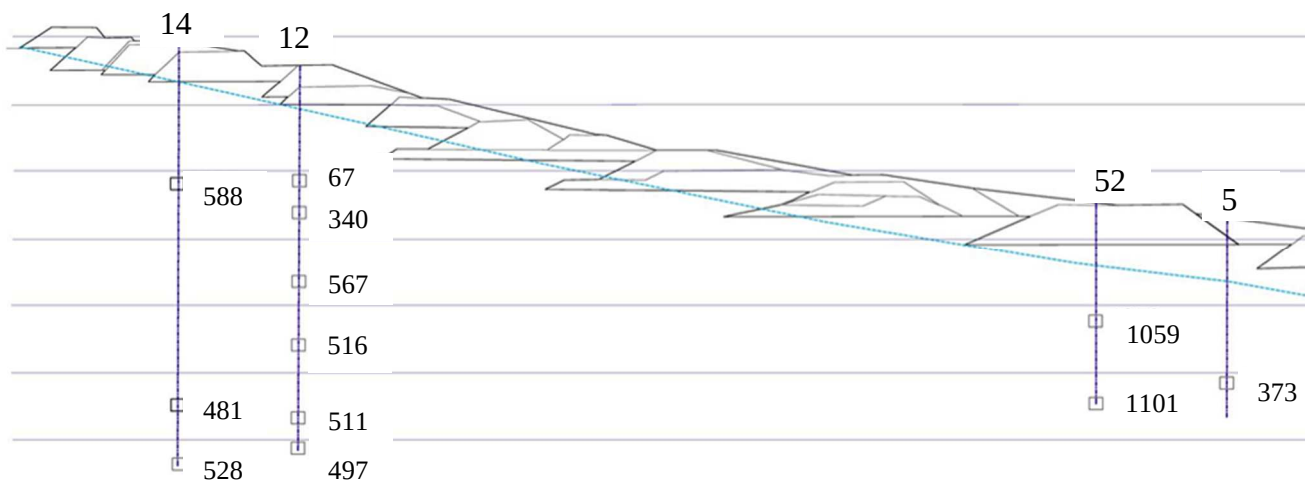


Рисунок 1.4. Схема расположения датчиков порового давления

В результате проходки горных выработок получают образцы (монолиты) грунта для определения их основных характеристик, проводят лабораторные исследования.

Лабораторные исследования грунтов

Для техногенных грунтов выполняют исследования по определению физико-механических свойств: плотность, коэффициент пористости, естественная влажность, показатель текучести, число пластичности, влажность на границе текучести, влажность на границе раскатывания, коэффициент водонасыщения, сцепление, угол внутреннего трения.

Исследование по определению физических свойств техногенных грунтов производят лабораторными методами [49]: режущего кольца (плотность), высушивание до постоянной массы (естественная влажность), метод балансирного конуса (влажность на границе текучести), раскатывание в жгут (влажность на границе раскатывания), а также расчетными (таблица 1.1).

Таблица 1.1. Методы определения физико-механических свойств грунтов

Характеристика грунта	Метод определения	Тип грунта	Нормативный документ
Естественная влажность W	Высушивание до постоянной массы	Все грунты	ГОСТ 5180-15, §5
Влажность на границе текучести W_l	Метод балансирного конуса	Пылевато-глинистые	ГОСТ 5180-15, §7
Влажность на границе раскатывания W_p	Раскатывание в жгут	Пылевато-глинистые	ГОСТ 5180-15, §8
Плотность ρ	Режущее кольцо	Легко поддающиеся вырезке или не сохраняющие свою форму без кольца	ГОСТ 5180-15, §9
Коэффициент водонасыщения S_r	Расчетный	Все грунты	ГОСТ 25100-2011 А.2
Коэффициент пористости e	Расчетный	Все грунты	ГОСТ 25100-2011 формула А.6
Показатель текучести I_l	Расчетный	Пылевато-глинистые	ГОСТ 25100-2011 формула А.18
Число пластичности I_p	Расчетный	Пылевато-глинистые	ГОСТ 25100-2011 формула А.31
Сцепление C Угол внутреннего трения φ	Одноплоскостной срез	Пески, глинистые и органо-минеральные грунты	ГОСТ 12248-2010, §5.1

Прочностные характеристики (сцепление и угол внутреннего трения) [50] техногенных грунтов в лабораторных условиях определяют для грунтов природной влажности и в водонасыщенном состоянии методом одноплоскостного среза (рисунок 1.5).

Наряду с представленными выше инженерно-геологическими исследованиями грунтов в настоящее время широкое распространение получают косвенные методы – геофизические.

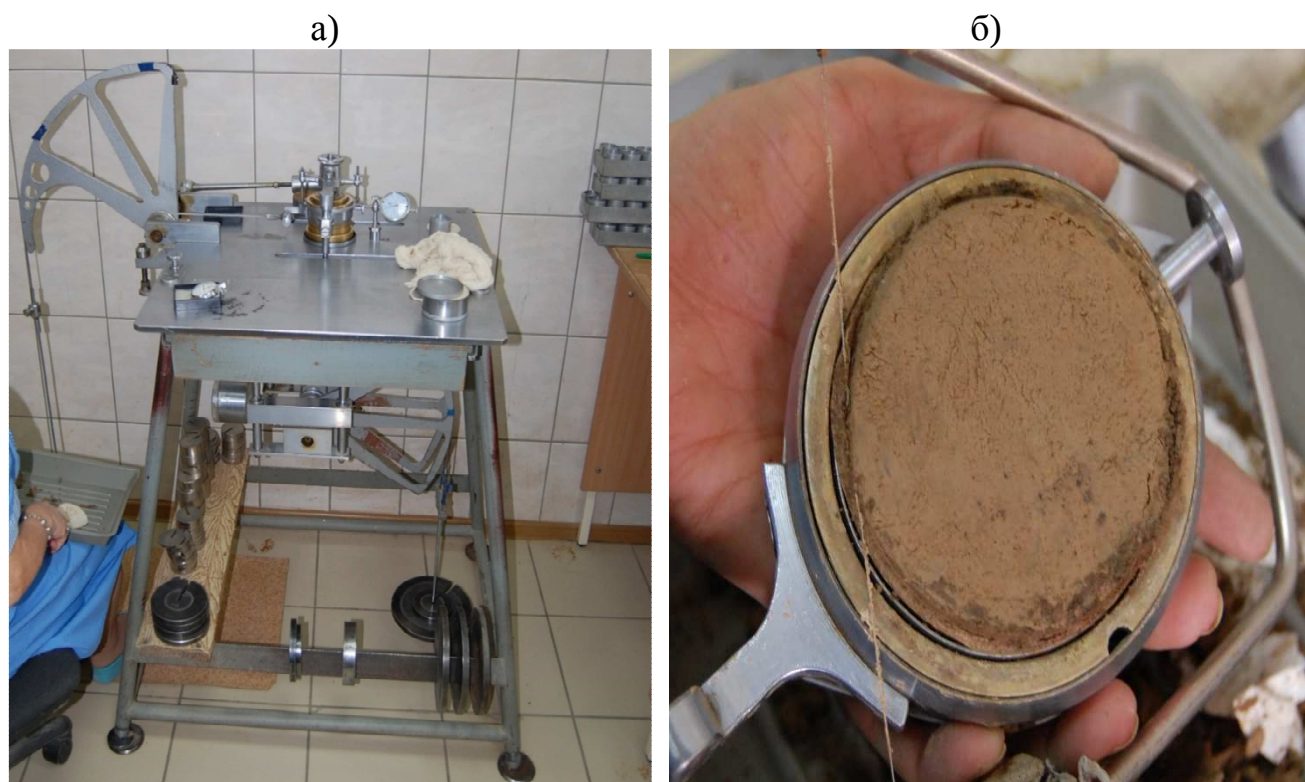


Рисунок 1.5. Прибор для испытания грунта (а) методом одноплоскостного сдвига и испытанный образец (б)

1.2. Геофизические исследования грунтов

Геофизические методы основаны на исследовании связи структурных особенностей массива и свойств грунтов в аномальных зонах с параметрами физических полей естественной или искусственной природы. В зависимости от физического поля в косвенных методах контроля выделяют [47]:

- сейсмоакустический (возбуждение в массиве упругих колебаний определенного диапазона; фиксируя сигнал, прошедший через контролируемый участок массива,

определяют изменение скорости распространения составляющих сигнала или его затухание, зависящих от плотности, коэффициента пористости и влажности грунтов);

– термометрический (измерение аномалий температуры массива или его теплофизических параметров, зависящих от состояния и свойств горных грунтов);

– геомагнитный (измерение аномалий геомагнитных полей);

– электромагнитный (мониторинг пространственно-временных изменений комплекса электромагнитных параметров среды).

Электромагнитный контроль основан на измерении параметров наведенных электромагнитных полей, распределение которых зависит от электрических и магнитных свойств грунтов. В зависимости от частоты электромагнитного поля различают методы постоянного, низкочастотного и высокочастотного тока. Методы контроля на постоянном или низкочастотном переменном токе реализуются при наличии гальванического контакта с породным массивом: вертикальное электрическое зондирование; электрическое профилирование; многоэлектродные зондирования.

Для изучения строения толщи техногенных грунтов и происходящих в них процессов самоуплотнения и упрочнения используют экономичный и довольно информативный метод многоэлектродных зондирований. Оценка объемного распределения кажущегося удельного сопротивления (УЭС) грунта дамб выполняется методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) по нескольким продольным профилям. Данные каждого профиля двумерной томографии методом ВЭЗ подвергают фильтрации двумерной и/или трехмерной инверсиями, по результатам которых строят геоэлектрический разрез (рисунок 1.6) и выделяют основные аномалии повышенного / пониженного УЭС (границы различных слоев в теле дамбы) [47].

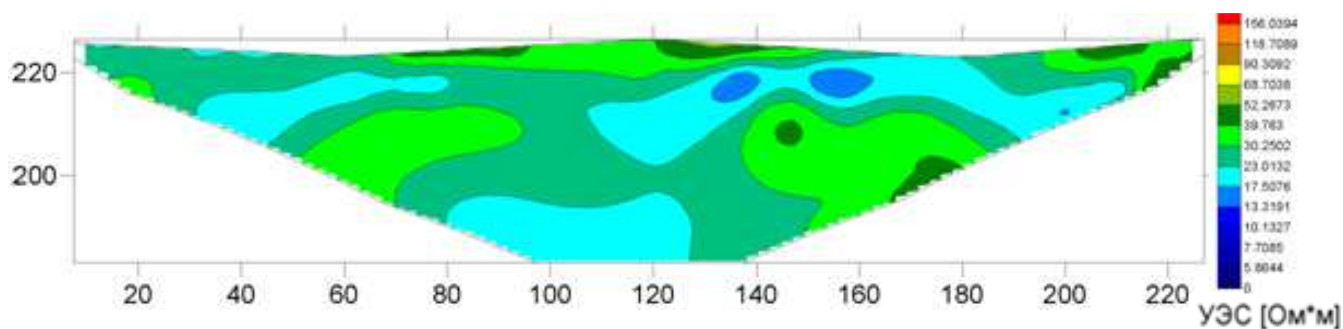


Рисунок 1.6. Геоэлектрический разрез дамбы

При работе используют автономные многоэлектродные электроразведочные станции СКАЛА серии 48, 48М и 64; "IRISSYSCALPRO", "ОМЕГА 48".

Сочетание исследований по горным выработкам (скважинам) и геоэлектрическим разрезам позволяет прогнозировать физические свойства грунтов:

$$\frac{e_{\Pi}}{e_{\Pi 0}} = \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{1/m}, \quad (1.1)$$

где e_{Π} , ρ – значения УЭС и коэффициента пористости исследуемого слоя в произвольной точке геоэлектрического профиля; ρ_0 , $e_{\Pi 0}$ – значения УЭС и коэффициента пористости в некоторой опорной точке (у скважины); m – постоянная, зависящая от структуры порового пространства.

Изменчивость УЭС определяют из анализа геоэлектрического разреза, полученного по результатам интерпретации данных электротомографии. Данные электрических зондирований характеризуют распределение усредненных УЭС в пределах инженерно-геологического элемента, поэтому прогнозные значения физико-механических свойств соответствуют их усредненным значениям [51].

Многолетний опыт показывает, что с течением времени, при соблюдении проектного режима эксплуатации, прочностные свойства грунтов улучшаются вследствие консолидации под действием гравитационных сил. Поэтому на этапе эксплуатации важно вести наблюдения за гидрогеологическим режимом тела и основания сооружения.

1.3. Гидрогеологические наблюдения

Состав гидрогеологических наблюдений включает в себя: определение положения депрессионной поверхности в грунтовой массе; контроль фильтрации воды из гидроотвала (с установлением мест высачивания и определением расхода на участках фильтрации в зависимости от положения участков намыва); определение изменения избыточного порового давления во времени; контроль работы дренажных устройств; определение фильтрационных свойств грунтов [52].

Условно гидрогеологические наблюдения можно разделить на три группы: визуальные (контроль фильтрации, работы дренажных устройств), определение фильтрационных свойств грунтов и инструментальные (определение положения депрессионной поверхности в массиве, изменения избыточного порового давления во времени).

Визуальные гидрогеологические наблюдения проводят во время периодического осмотра сооружений. Определение фильтрационных свойств грунтов проводят путем проведения лабораторных испытаний монолитов, отобранных при бурении геологических скважин.

Положение депрессионной поверхности в массиве устанавливают по результатам замеров уровня воды в пьезометрах и емкости накопителя. Более полное представление о положении пьезометрической поверхности получают из интерпретации данных электротомографии (геофизические исследования).

Измерение порового давления проводят при стационарных наблюдениях (статическое и динамическое зондирования) как простыми зондами, так и комбинированными (рисунок 1.7), позволяющими также определять величины прочностных и деформационных свойств грунтов [53, 54]. Определение порового давления в глинистых грунтах в основном производят штанговыми пьезодинамометрами, разрешающими осуществлять зондирование и стационарные измерения порового давления. В последние годы используют скважинное зондирование, позволяющее получать информацию о состоянии грунтов (величина порового давления), их прочностных (сопротивление сдвигу, сцепление, угол внутреннего трения) и деформационных (модуль деформации) свойствах [54].

Большой объем научных работ привел к формированию нового направления исследования на слиянии инженерной геологии и каротажной геофизики – метод пенетрационного каротажа [55]. Отечественными исследователями разработана станция СПК-Т, которая представляет собой вдавливающее устройство на транспортной базе высокой проходимости и аппаратный комплекс (измерительный зонд, приемопередающее устройство, полевой вычислительный комплекс).

Одно из основных предназначений исследований грунтов – это определение надежности грунтовых сооружений (рисунок 1.8) накопителей жидких отходов

горнопромышленных предприятий, характеризуемой коэффициентом устойчивости, определяемым по формуле:

$$k_f = \frac{\sum (P_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i - \frac{\rho_w g h_i^B l_i^B}{\cos \alpha_i}) + \sum C_i l_i}{\sum P_i \sin \alpha_i}, \quad (1.2)$$

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/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; h_i^B, l_i^B – 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.



Рисунок 1.7. Струнная аппаратура, используемая при проведении полевых работ:

- 1 – ПДС-ЗП (пъезодинамометр); 2 – комбинированный крыльчатый зонд;
3 – пенетрометр; 4 – периодометр цифровой; 5 – ПДМ-40 (пъезодинамометр для высоких давлений); 6 – ШПД (штанговый пьезодинамометр); 7 – ДТС (датчик температур); 8 – ГД (грунтовый динамометр); 9 – ПДС (плоский пьезодинамометр)

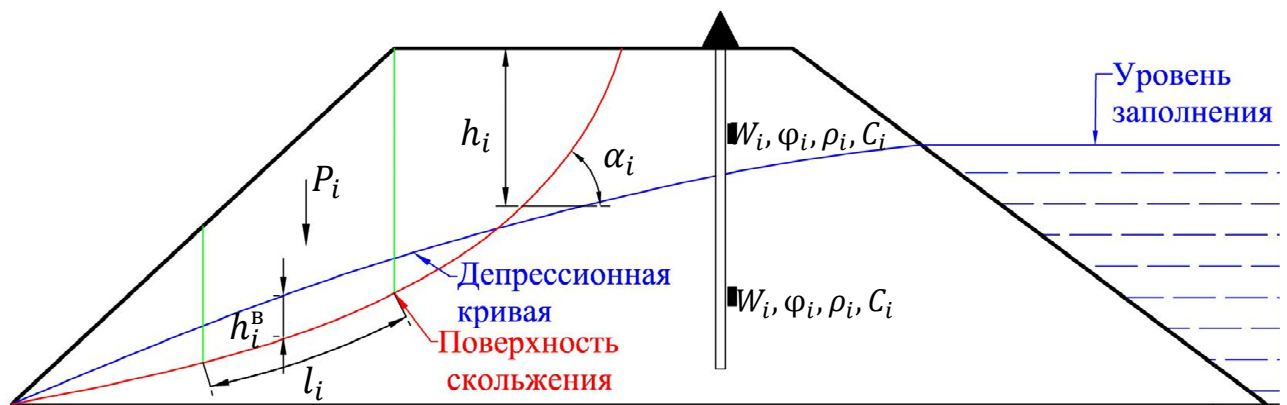


Рисунок 1.8. Профиль грунтового откосного сооружения

Величина коэффициента устойчивости определяется конструктивными особенностями и параметрами дамбы, физическими (плотность, влажность) и прочностными (сцепление, угол внутреннего трения) свойствами грунтов тела и основания, гидростатическими и гидродинамическими силами, а также сейсмическими силами природного и техногенного характера.

1.4. Состояние вопроса исследования устойчивости откосных сооружений

В шестидесятых-семидесятых годах прошлого столетия основной геомеханической задачей являлось определение предельного состояния, в том числе несущей способности фундаментов, устойчивости откосов, насыпей, плотин, подземных выработок и камер, давления на подпорные стенки.

Шарлем Огюстеном де Кулоном в конце 18-го столетия для решения подобных задач заложена теоретическая база, основанная на анализе уравнений равновесия в плоскости, в пространстве или по какой-либо поверхности, отсекающей часть массива от целого. Получаемые решения определяют только предельные сочетания действующих нагрузок при заданных свойствах грунта (сцепление C , угол внутреннего трения φ и плотность ρ).

Сущность метода предельного равновесия заключается в определении минимального значения коэффициента устойчивости, характеризующего положение наиболее напряженной поверхности скольжения.

Р. Р. Чугаев в своей работе [56] выделяет пять действующих сил на отдельные блоки призмы возможного обрушения: сила собственного веса P_i ; сила сцепления по основанию блока $C_{\text{осн}}$; реакция основания $R_{\text{осн}}$, определенная с учетом силы трения $F_{\text{тр}}$ и нормальных напряжений σ_i ; силы, действующие на рассматриваемый блок слева E_1 и справа E_2 . На этой основе Р. Р. Чугаев определяет четыре способа расчета:

Способ Свена-Гультена – силы E_1 и E_2 принимаются горизонтальными и заглубленными на $2/3$ высоты блока.

Способ В. Феллениуса – равнодействующая сил E_1 и E_2 проходит через центр основания блока и равна нулю. Силы E постепенно меняют свой уклон при переходе от блока к блоку.

Способ Г. Крея – силы E_1 и E_2 принимаются горизонтальными, а их равнодействующая, проходящая через центр основания блока равна нулю.

Способ К. Терцаги – силы E принимаются параллельными касательной, проведенной к поверхности скольжения в данном блоке.

В зарубежной практике широко применяются методы расчета устойчивости, предложенные А. Бишопом, Н. Р. Моргенштерна – В. Е. Прайса, Е. Спенсером, Н. Янбу.

А. Бишоп предложил упрощенный метод, в котором силы, действующие на основание блока, имеют только нормальное направление, а касательные приравняются нулю [56].

Метод Н. Р. Моргенштерна – В. Е. Прайса применяется для поверхностей скольжения любой формы. В рассматриваемом методе предложено дополнительное условие, в котором касательные составляющие сил T_i находятся в зависимости от нормальных E_i :

$$T_i = \lambda f(x) E_i, \quad (1.3)$$

где $f(x)$ – задаваемая функция, λ – числовой коэффициент [57].

Метод Е. Спенсера используется для поверхности скольжения любой формы и в нем принимается допущение о постоянстве угла наклона боковых сил взаимодействия [58].

Упрощенный метод Н. Янбу подобен упрощенному методу А. Бишопа: предполагается, что сила взаимодействия между элементами горизонтальна, при этом для расчета коэффициента устойчивости используется уравнение равновесия горизонтальных сил, а равновесия моментов не выполняется [59].

О. Ю. Крячко приводит доказательства целесообразности применения метода алгебраического сложения сил по плавнокриволинейной поверхности скольжения для расчета устойчивости насыпных сооружений (отвалы, дамбы, плотины). Метод многоугольника сил, предложенный в свое время Г. М. Шахунянцем и развитый Г. Л. Фисенко [52], применяется, когда поверхность скольжения предопределена геологическими или технологическими условиями.

В случае метода алгебраического сложения сил строят ряд (обычно 3 – 4) вероятных плавнокриволинейных поверхностей скольжения, отстоящих на разном расстоянии от верхней бровки.

Поверхность скольжения начинается на гребне дамбы, а далее поверхность скольжения проходит в верхней части под углом $\omega = 45^\circ + \varphi/2$ к горизонту, в нижней она составляет угол $\varepsilon = 45^\circ + \varphi/2$ с поверхностью откоса. Расчет устойчивости производят в следующем порядке.

На поперечном профиле дамбы строят призму возможного обрушения и делят ее на ряд элементарных блоков, определяют угол наклона основания блока к горизонту α_i , его площадь S_i , вес $P_i = \rho_i S_i$, нормальную $N_i = P_i \cos \alpha_i$ и касательную $T_i = P_i \sin \alpha_i$ составляющие веса и длину поверхности скольжения в пределах блока l_i . Коэффициент устойчивости по каждой поверхности скольжения рассчитывают по формуле 1.2.

Расчет устойчивости откоса дамбы методом многоугольника сил производят по характеристикам грунта, в которые введен необходимый коэффициент запаса. Между соседними блоками, опирающимися на отдельные участки ломаной поверх-

ности скольжения, проводят границу под углом $90^\circ + \varphi_n$ к поверхности скольжения. Для каждого блока строится многоугольник сил, включающий в себя: вес рассматриваемого блока P_i ; силы сцепления, возникающие в основании блока и направленные параллельно основанию $C_n l_i$; реакция со стороны основания блока, являющаяся равнодействующей сил трения и нормальной составляющей веса блока R_i ; сила гидростатического давления D_i ; реакция со стороны смежных блоков на рассматриваемый блок, являющаяся равнодействующей сил трения и сцепления, действующих по боковым поверхностям блока E_i (рисунок 1.9)..

Реакция R_i отклоняется от нормалей к границам между блоками и к наиболее напряженной поверхности на угол φ_n (φ'_n).

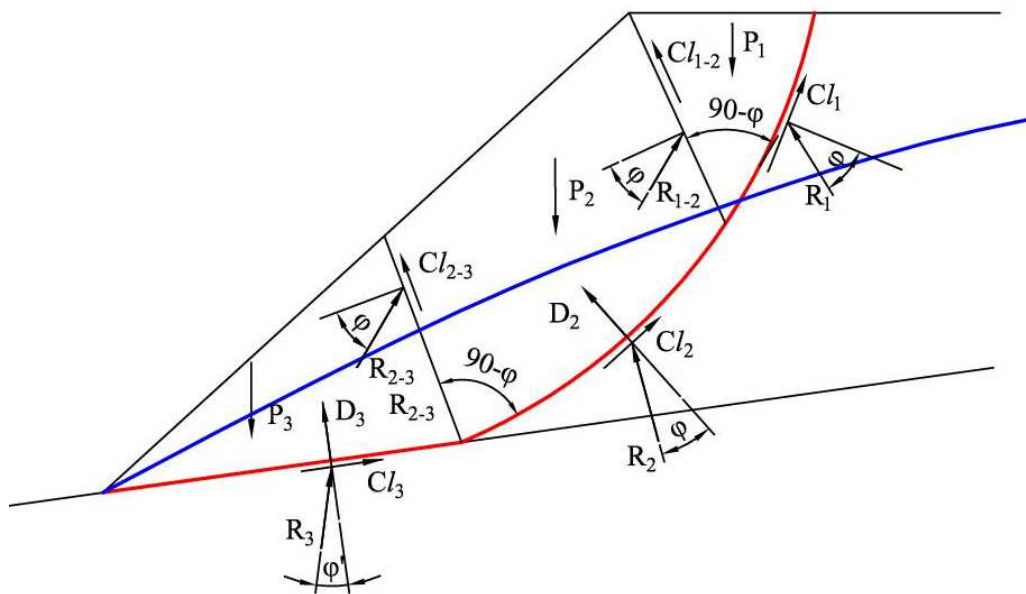


Рисунок 1.9. Силы, действующие на откос

Откос, находящийся в состоянии предельного равновесия, имеет замкнутый многоугольник сил, построенный для наиболее напряженной поверхности скольжения. Это говорит о том, что устойчивость обеспечивается коэффициентом устойчивости, близким к введенному в прочностные характеристики грунта. Если многоугольник не замыкается, то устойчивость откоса не соответствует принятому коэффициенту устойчивости. В случае не замыкания многоугольника сил расчет устойчивости откоса необходимо повторить по наиболее напряженной поверхности скольжения при других значениях коэффициентов устойчивости.

Анализ литературных источников показывает, что существует множество методов расчета устойчивости (около 150), имеющих различия в системах действующих сил и форме поверхности скольжения. Обзор существующих методов, их классификация, преимущества и недостатки, условия применения представлены в работах Х. М. Касымкановой и А. В. Жабко [60, 61].

В вопросах исследований устойчивости грунтовых откосных сооружений можно отметить отечественных ученых: Д. М. Ахпателов, В. А. Бабелло, С. П. Бахаева, А. М. Гальперин, М. Н. Гольдштейн, Р. Г. Клейменов, Э. М. Добров, А. В. Жабко, Е. П. Емельянова, Е. Н. Заборина, Г. С. Золотарев, Ю. И. Кутепов, Н. Н. Маслов, Е. Б. Тарасов, З. Г. Тер-Мартirosян, Г. Л. Фисенко, В. Н. Хашин, В. К. Цветков, Н. А. Цытович, Р. Р. Чугаев, К. Ш. Шадунц, Г. М. Шахунянц и зарубежных: A. S. Azzous, R. Baker, A. W. Bishop, C. S. Desai, M. Garber, A. K. Ghuhq, R. G. Hennes, N. Janby, U. Keizo, S. Makoto & J. Kiyoshi, N. Morgenstern, C. Narajan, D. J. Palladino, T. W. Smith, S. Sarma, S. D. Wilson, G. P. Tschebotarioff, K. Terzagi [61–91].

В начале 80-х годов А. Б. Фадеев для исследования напряженно-деформированного состояния приоткосных массивов и расчета параметров устойчивых откосов, расчета возможных деформаций и смещений ограждающих сооружений применил метод конечных элементов (МКЭ). Далее идея МКЭ нашла развитие в работах самого А. Б. Фадеева, а также В. Н. Зверинского, В. К. Исомова, Е. В. Федоренко и В. К. Цветкова [92–95]. Основная концепция МКЭ состоит в том, что искомую непрерывную величину аппроксимируют дискретными элементами.

Оценка устойчивости методом конечных элементов требует дополнительных данных по характеристикам грунта, помимо сцепления C , угла внутреннего трения φ и плотности ρ , необходимо иметь значения коэффициента Пуассона ν и модуля упругости E . Поэтому, помимо проблемы выбора расчетного метода, встает вопрос выбора характеристик грунта, как одной из основных составляющих анализа устойчивости сооружения.

Развитие компьютерной техники позволило перейти от ручных графоаналитических методов расчетов устойчивости к автоматизированным аналитическим.

Наиболее популярные программы по расчету устойчивости состояния откосных сооружений: Geo 5, GeoStab, GeoStudio Slope/W, Rocscience Slide, Plaxis, GenIDE32 [96–101]. Алгоритм работы для всех программ идентичный. Первоначально создается модель откосного сооружения, на которой отображают все слои грунтов и конструктивные особенности. Каждому грунтовому материалу задают тип и его характеристики. К каждому объекту сооружения привязывают определенный тип грунта и строят поверхность скольжения круглоцилиндрической или полигональной формы. Расчет устойчивости производится по следующим методам: Bishop'a, Fellenius'a, Morgenstern and Price'a, Janbu, Sarma и конечных элементов.

Е. В. Федоренко в своей статье отмечает, что проблемой применения различных программ для пользователя является отсутствие доступной информации и применимости расчетного метода (в большинстве случаев зарубежного), указаний в нормативных документах в области применения конкретного метода расчета и разница между заложенными в программу методами расчета устойчивости [95].

Приведенный ретроспективный анализ литературных источников по исследованию свойств грунтов, а также опыт инженерных изысканий показывает, что в основном исследования направлены на изучение свойств грунтов в целом.

Обратимся к начальному этапу рождения дамбы – ее проектированию. Разработке проекта, разумеется, предшествуют инженерные изыскания, в том числе инженерно-геологические, направленные на поиск карьера по добыче грунтов, предназначенных для строительства дамбы и противофильтрационных элементов. Отбор монолитов и исследования свойств выполняют для естественных грунтов. По этим свойствам в проектной документации выполняется оценка устойчивости дамбы. В связи с неравномерностью уплотнения грунтов, попадания посторонних включений физико-механические свойства могут отличаться от проектных значений, а также изменяться в широком диапазоне в пределах одной дамбы по площади и глубине [102].

В этой связи возникает необходимость изучения пространственной изменчивости, анализа и обобщения физико-механических характеристик техногенных сугли-

нистых грунтов эксплуатируемых дамб, установления зависимости прочностных характеристик (сцепление C , угол внутреннего трения φ) от физических (плотность ρ , влажность W , коэффициент пористости e) и разработки аналитического метода прогноза устойчивости дамбы с учетом пространственной изменчивости прочностных характеристик грунта.

Изложенное выше позволяет сформулировать цель и задачи исследований.

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.

Основные задачи исследований:

- анализ и обобщение пространственной изменчивости физико-механических характеристик техногенных грунтов;
- установление взаимосвязи прочностных и физических характеристик грунтов, применяемых для строительства дамб;
- разработка алгоритма аналитического метода прогноза устойчивости грунтовых дамб с учетом пространственной изменчивости прочностных характеристик грунтов.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТОВ НАСЫПНЫХ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Основные факторы, определяющие устойчивость откоса насыпных горнотехнических сооружений (дамб) – расчетные значения физико-механических свойств (плотность ρ , угол внутреннего трения φ ; сцепление C) техногенных грунтов. Инженерно-геологические изыскания – один из источников информации о структуре, литологическом строении грунтового массива, степени его обводнения и других показателей. Однако на этапе проектирования изыскания проводят на участке, где грунты находятся в условиях естественного залегания и могут обладать достаточно высокими прочностными показателями, пригодными для их добычи и строительства сооружений. В процессе добычи, транспортировки, укладки грунтов в тело дамбы и уплотнения на прочностные показатели оказывается влияние целого ряда внешних воздействий, приводящих к их изменению. Поэтому наряду с инженерно-геологическими изысканиями на участках строительства карьеров по добыче грунтов автором выполнены обобщение и анализ информации о свойствах техногенных грунтов в реальных условиях эксплуатации сооружений [104].

Систематизация и обработка информации по исследованию физико-механических характеристик грунтов осуществлена статистическими методами.

2.1. Подготовка массива исходных данных

В качестве массива экспериментальных данных использовались материалы отчетов ООО "Геотехника" (г. Кемерово) по инженерно-геологическим изысканиям, выполненным на дамбах накопителей жидких отходов горнопромышленных предприятий различных районов Кузбасса (приложение 1).

Материалы инженерно-геологических изысканий первоначально были подвергнуты предварительной обработке, в ходе которой отобраны образцы грунтов: извлеченные однотипным буровым станком (УРБ-2а-2); прошедшие испытания на

приборах одной марки (ПГС, кольца для определения плотности); испытанные методом одноплоскостного среза; определенного геолого-генетического комплекса (суглинков), имеющего широкое распространение при строительстве дамб; расположенные выше и ниже депрессионной кривой [49, 50].

Массив исходных данных представлял собой выборку дисперсных связных техногенно перемещенных природных суглинистых грунтов, слагающих тела дамб горнопромышленных предприятий Кузбасса [104]. Для удобства обработки данных каждому объекту присвоен условный шифр: 1, 2, ..., n (таблица 2.1).

Таблица 2.1. Перечень объектов исследований

Шифр объекта	Наименование предприятия²	Наименование объекта	Район Кузбасса
1	ООО "Карьер "Каменушинский"	Дамба хвостохранилища	Гурьевский
2	ОАО "Кемеровская ГРЭС"	Дамба золошлакоотвала	Кемеровский
3	ОАО "Коксохимический завод"	Дамба накопителя	Ленинский
4	МУП "Котельные и тепловые сети"	Дамба золошлаконакопи- теля	Междуреченский
5	ОАО "Ново-Кемеровская ТЭЦ"	Дамба золошлакоотвала	Кемеровский
6	ЗАО "Салаирский химический комбинат"	Дамба хвостохранилища	Гурьевский
7	ОАО "Разрез "Сартаки"	Дамба гидроотвала	Беловский
8	ОАО "ЦОФ Абашевская"	Дамба флотохвостохрани- лища	Новокузнецкий
9	ОАО "ЦОФ Березовская"	Дамба гидроотвала	Кемеровский
10	ОАО "Водоканал"	Плотина на р. Кара-Чумыш	Прокопьевский
11	ЗАО "Черниговец"	Дамба илонакопителя	Кемеровский
12	ЗАО "Черниговец"	Дамба шламоохранилища	Кемеровский
13	ОАО "Западно-Сибирская ТЭЦ"	Дамба пруда-охладителя	Новокузнецкий
14	ОАО "Гурьевский металлургический завод"	Дамба гидроузла на р. Малый Бачат	Гурьевский
15	ОАО "Шахта Абашевская"	Дамба первичного отстой- ника	Новокузнецкий
16	ОАО "Шахта Заречная"	Дамба отстойника шахтных вод	Ленинский
17	ОАО "Шахта Полосухинская"	Дамба отстойника шахтных вод	Ленинский
18	ОАО "Кузбассразрезуголь" "Кедровский угольный разрез"	Гидроотвал № 3	Кемеровский

² Наименование предприятий и объектов указаны на момент проведения инженерно-геологических изысканий.

2.2. Анализ пространственной изменчивости свойств

В процессе выполнения оценок устойчивости дамб далеко не однозначно решается вопрос относительно выбора прочностных характеристик грунтов, так как их изменчивость даже в пределах одного сооружения может быть значительной.

В подтверждение этого приведем свойства грунтов, полученные по материалам инженерно-геологических изысканий по двум объектам.

По ограждающей дамбе шламового отстойника (объект 16), протяженностью около 1 км, было пробурено 5 скважин, из которых отобрано 26 образцов. По ограждающей дамбе пруда-накопителя (объект 13), протяженностью 4 км – 9 скважин и отобрано 22 образца (рисунки 2.1–2.2).

Для определения количественной меры изменчивости основных характеристик грунта (плотность ρ , естественная влажность W , сцепление C , угол внутреннего трения φ), полученных по глубине и площади (вдоль профиля дамбы), использовали коэффициент вариации V_x (см. таблицу 2.6).

Результаты оценки пространственной изменчивости значений физико-механических свойств грунта по глубине отдельной скважины и профилю дамбы для всей совокупности скважин на исследуемых объектах приведены в таблице 2.2 (объект 16) и таблице 2.3 (объект 13).

Таблица 2.2. Изменчивость характеристик грунта объекта 16

№ скважины	Свойства ³		
	φ , градус	C , МПа	ρ , г/см ³
1-05 (6) ⁴	<u>18–29</u> 18	<u>0,013–0,062</u> 63	<u>1,92–2,03</u> 3
2-05 (4)	<u>18–23</u> 12	<u>0,022–0,080</u> 68	<u>1,97–2,01</u> 2
3-05 (4)	<u>17–19</u> 5	<u>0,023–0,067</u> 48	<u>1,97–2,01</u> 1
4-05 (4)	<u>18–25</u> 16	<u>0,047–0,140</u> 45	<u>1,96–2,11</u> 3
5-05 (4)	<u>18–25</u> 15	<u>0,013–0,067</u> 60	<u>1,87–2,03</u> 3
По дамбе (22)	<u>17–29</u> 15	<u>0,013–0,100</u> 66	<u>1,87–2,11</u> 3

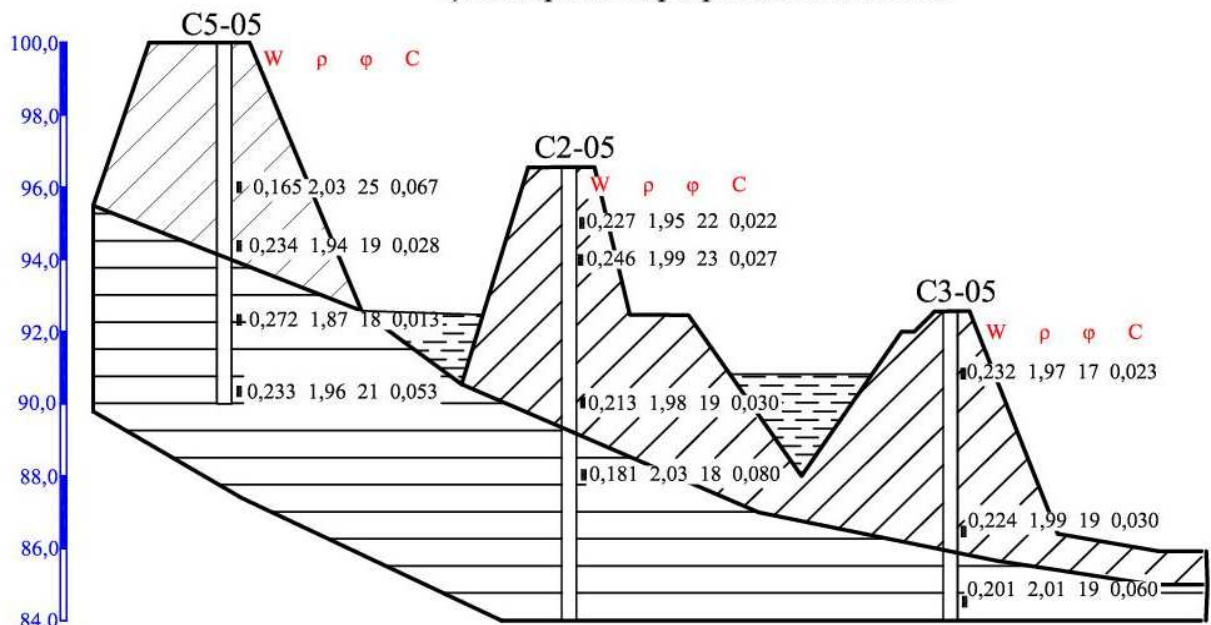
³ В числителе – диапазон свойств; в знаменателе – коэффициент вариации.

⁴ В скобках указано число образцов по скважине.

а) План ГТС



б) Поперечный разрез по линии А-А



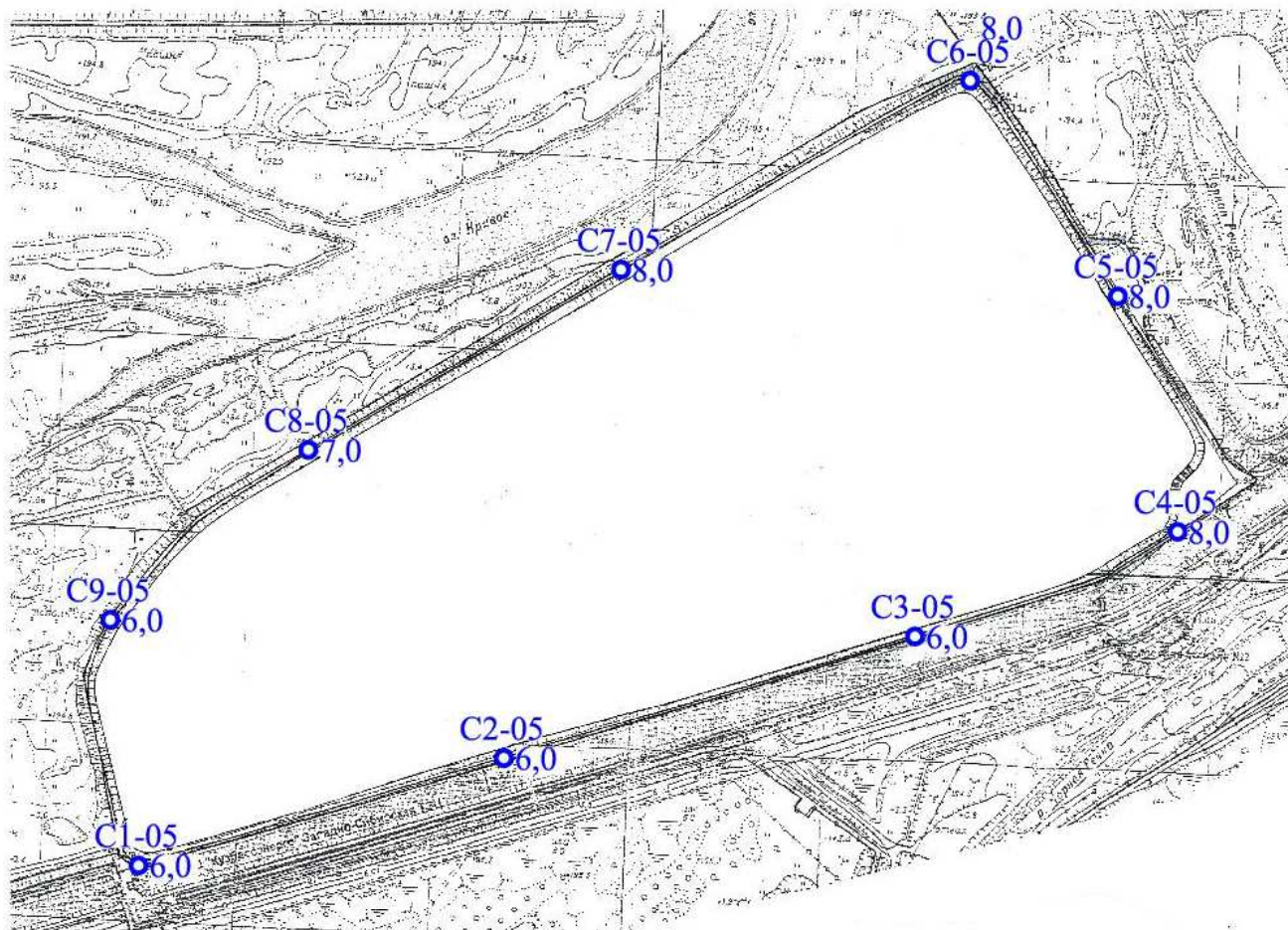
Условные обозначения

- - место отбора монолитов;
- W - естественная влажность, д.е.;
- p - плотность, г/см³;
- φ - угол внутреннего трения, градус;
- C - сцепление, МПа;

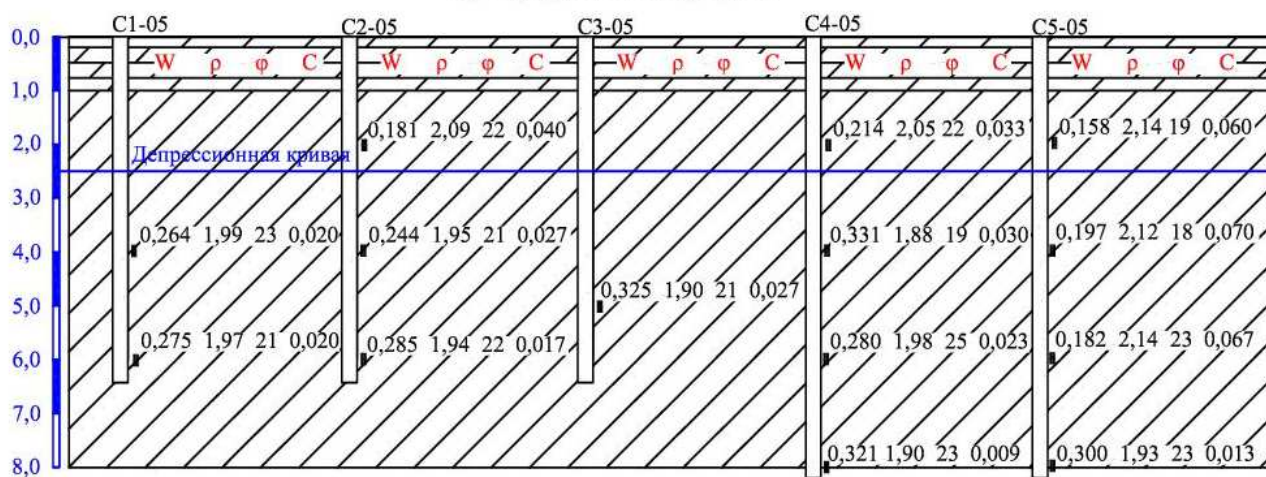
- насыпной грунт (суглинок);
- грунт основания (суглинок);
- намывной грунт.

Рисунок 2.1. План (а) и поперечный разрез (б) грунтовой дамбы объекта 16

а) План ГТС



б) Продольный разрез



Условные обозначения

- - место отбора монолитов;
- W - естественная влажность, д.е.;
- ρ - плотность, г/см³;
- φ - угол внутреннего трения, градус;
- C - сцепление, МПа;
- насыпной грунт (суглинок);
- насыпной гравийно-галечниковый грунт.

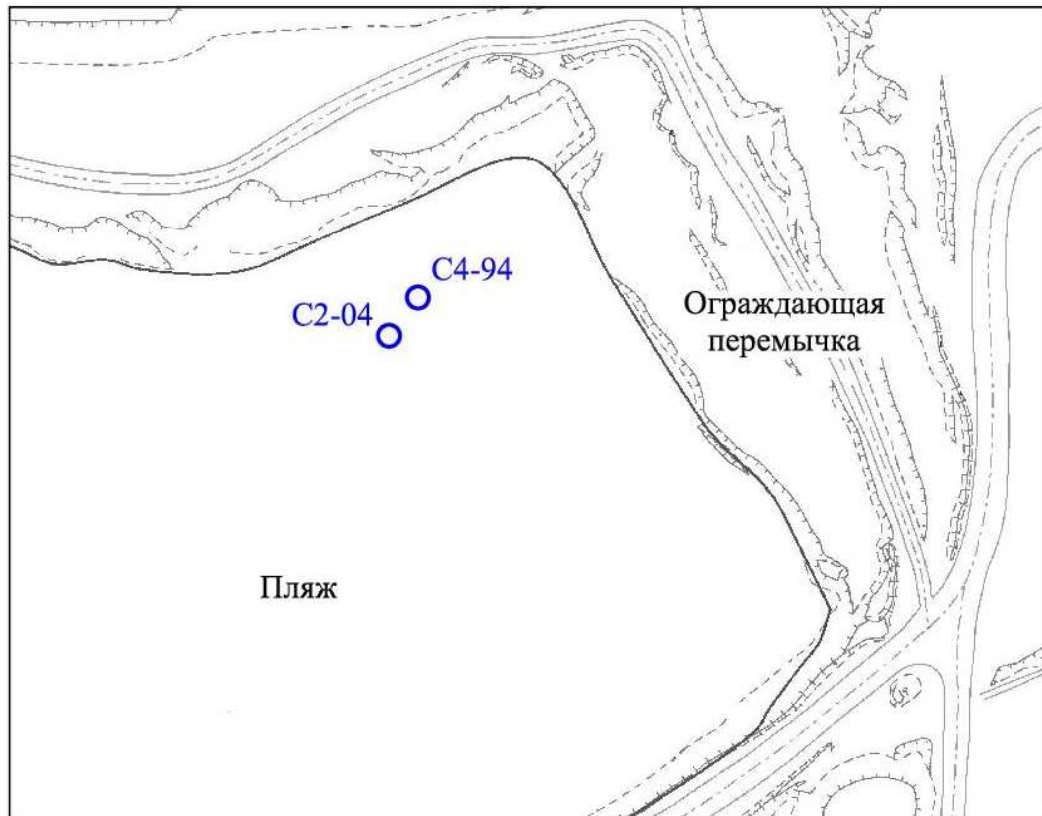
Рисунок 2.2. План (а) и поперечный разрез (б) грунтовой дамбы объекта 13

Таблица 2.3. Изменчивость характеристик грунта объекта 13

№ скважины	Свойства ⁴		
	φ , градус	C , МПа	ρ , г/см ³
1-05 (2) ³	$\frac{21-23}{6}$	$\frac{0,020}{0}$	$\frac{1,97-1,99}{1}$
2-05 (3)	$\frac{21-22}{3}$	$\frac{0,017-0,040}{41}$	$\frac{1,94-2,09}{4}$
4-05 (4)	$\frac{19-25}{11}$	$\frac{0,009-0,033}{45}$	$\frac{1,88-2,05}{4}$
5-05 (4)	$\frac{18-23}{11}$	$\frac{0,013-0,070}{51}$	$\frac{1,93-2,14}{5}$
6-05 (2)	$\frac{19-21}{7}$	$\frac{0,027-0,028}{2}$	$\frac{1,90-1,93}{1}$
7-05 (4)	$\frac{18-19}{3}$	$\frac{0,005-0,043}{32}$	$\frac{1,97-2,04}{2}$
8-05 (3)	$\frac{19-22}{9}$	$\frac{0,012-0,050}{58}$	$\frac{2,00-2,05}{1}$
9-05 (3)	$\frac{19-25}{14}$	$\frac{0,023-0,083}{64}$	$\frac{2,00-2,13}{3}$
По дамбе (25)	$\frac{18-25}{10}$	$\frac{0,005-0,083}{60}$	$\frac{1,88-2,14}{4}$

Анализ результатов показывает по обоим объектам небольшой разброс значений по плотности ($V_p \approx 3 - 4 \%$), несколько больший ($V_\varphi \approx 10 - 15 \%$) диапазон значений угла внутреннего трения и весьма значимое ($V_C \approx 60 - 66 \%$) варьирование значений сцепления грунтов по глубине и площади. Вместе с тем диапазон значений свойств грунтов по разным дамбам весьма близок, в частности сцепление грунтов для объекта 16 изменяется от 0,013 МПа до 0,100 МПа, для объекта 13 от 0,005 МПа до 0,083 МПа.

Экспериментальные исследования физико-механических свойств глинистых грунтов на одном локальном участке (в радиусе 2–3 м) дамбы (объект 18, рисунок 2.3) в различные годы (1993, 2004) эксплуатации показали, что изменение характеристик грунта носит случайный характер (таблица 2.4). В данном случае фактор времени оказал положительное влияние, при снижении угла внутреннего трения на 5° , сцепление грунтов увеличилось в 3,5 раза, при этом более чем в 2 раза уменьшился коэффициент вариации.



а)



б)

Рисунок 2.3. План (а) и вертикальный разрез по геологическим скважинам (б) объекта 18

Таблица 2.4. Временное изменение значений свойств грунта на локальном участке

Параметр	Характеристика грунта		
	ρ , г/см ³	ϕ , градус	C , МПа
	по скважине С4-93 ⁵		
Диапазон	1,75–2,03	24–33	0,004–0,013
Среднее	1,92	26	0,008
Коэффициент вариации	5	13	45
	по скважине С2-04		
Диапазон	1,85–2,08	10–27	0,014–0,050
Среднее	1,98	21	0,027
Коэффициент вариации	4	31	19

Анализ экспериментальных данных, а также опыт эксплуатации дамб позволяет предположить, что для грунтов определенного геолого-генетического комплекса (суглинок) существует возможность обобщения характеристик грунта и установление закономерности их изменения статистическими методами.

2.3. Определение статистических характеристик

Для обобщения и анализа физико-механических характеристик дисперсных связных техногенно перемещенных природных суглинистых грунтов был собран статистический материал по 17 горнопромышленным предприятиям Кузбасса (таблица 2.1). Всего отобрано 284 образца грунта, из которых 167 расположены выше, 117 – ниже депрессионной кривой.

С целью проверки надежности полученных в результате обработки зависимостей на дополнительном (независимом) экспериментальном материале с самого начала имеющиеся данные были разделены на две выборки, условно названные обучающая и экзаменационная. При этом для обеих выборок свойства грунтов, расположенных выше и ниже депрессионной кривой, выделены в отдельные массивы. Процедура обработки массивов экспериментальных данных для обучающей и экзаменационной выборок идентична.

⁵ Через тире указаны последние две цифры года бурения скважины.

Для установления закономерностей, которым подчиняются выборки значений физико-механических свойств грунтов, по каждому информативному показателю сформировали отдельный массив экспериментальных данных в виде матриц [6] следующего вида:

$$\begin{pmatrix} x_{11}; x_{21}; \dots; x_{i1}; \dots; x_{n1} \\ x_{12}; x_{22}; \dots; x_{i2}; \dots; x_{n2} \\ x_{1j}; x_{2j}; \dots; x_{ij}; \dots; x_{nj} \\ \vdots \\ x_{1m}; x_{2m}; \dots; x_{im}; \dots; x_{nm} \end{pmatrix}, \quad (2.1)$$

где x_{ij} – результат определения свойства для i -го образца ($i = 1, 2, \dots, n$) j -го объекта ($j = 1, 2, \dots, m$).

Пример такой матрицы представлен в таблице 2.5.

Таблица 2.5. Матрица значений сцепления грунта ниже депрессионной кривой (пример)

Номер образца	Шифр объекта						
	1	2	3		15	16	j
1	0,015	0,047	0,010		0,060	0,032	0,010
2	0,015	0,023	0,011		0,013	0,035	0,023
...							
14	0,042	0,033	0,030		0,027	0,030	-
i	0,030	0,012	-		0,015	0,037	-

Массивы данных по показателям (угол внутреннего трения, сцепление и плотность грунта выше и ниже депрессионной кривой) разбивали на интервальные ряды, для чего определяли оптимальную величину интервала (шаг интервала) h . Для каждого интервала подсчитывали частоту n_i появления признака x_{ij} .

По обучающим и экзаменационным выборкам строили гистограммы эмпирического распределения значений физико-механических свойств грунтов выше (рисунок 2.4) и ниже (рисунок 2.5) депрессионной кривой.

Анализ гистограмм показал, что эмпирическое распределение характеристик грунтов близко к распределениям экспоненциального типа (нормальное, Вейбулла, гамма-распределение).

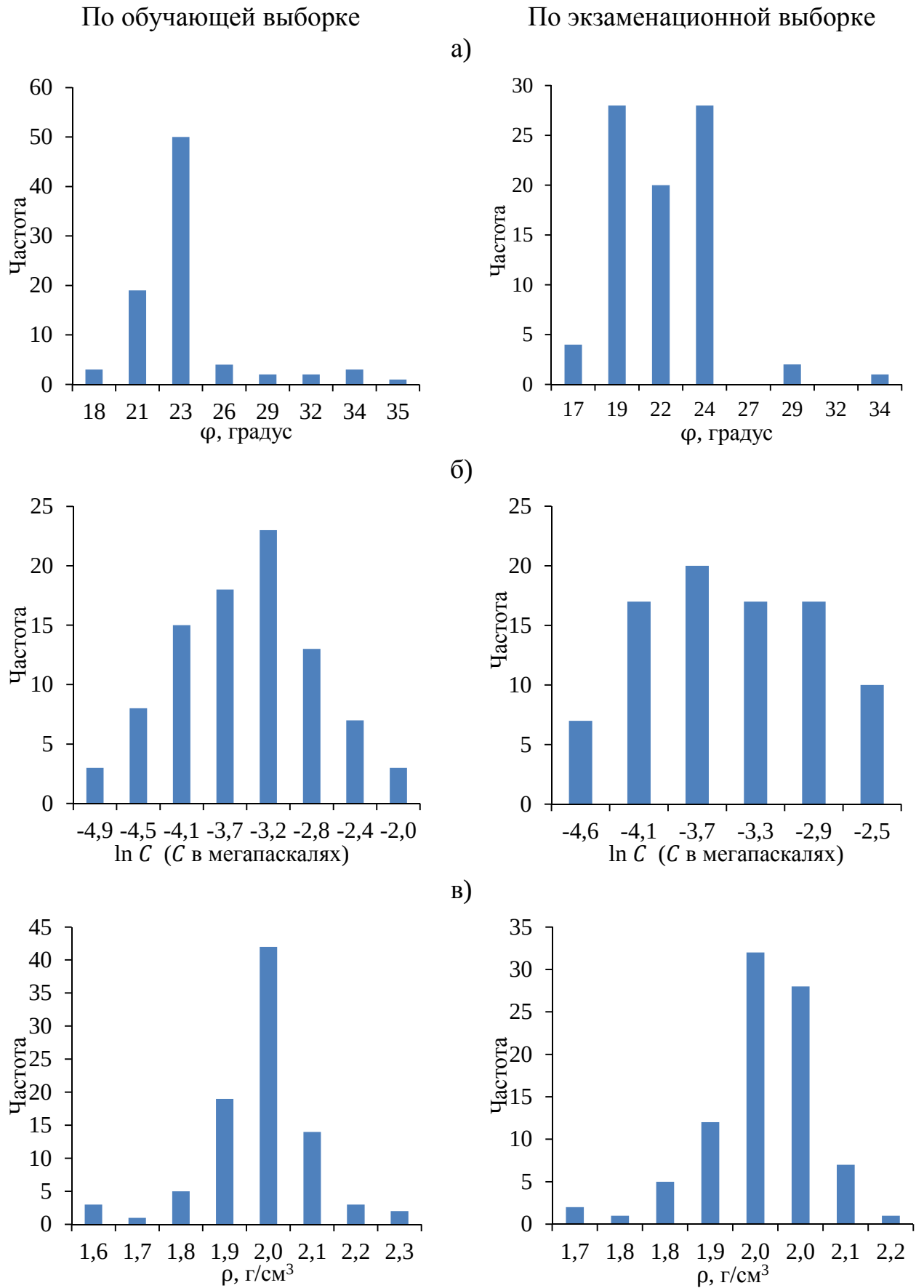


Рисунок 2.4. Эмпирическое распределение значений физико-механических свойств грунтов, расположенных выше депрессионной кривой: угол внутреннего трения ϕ (а); логарифм сцепления $\ln C$ (б); плотность ρ (в)

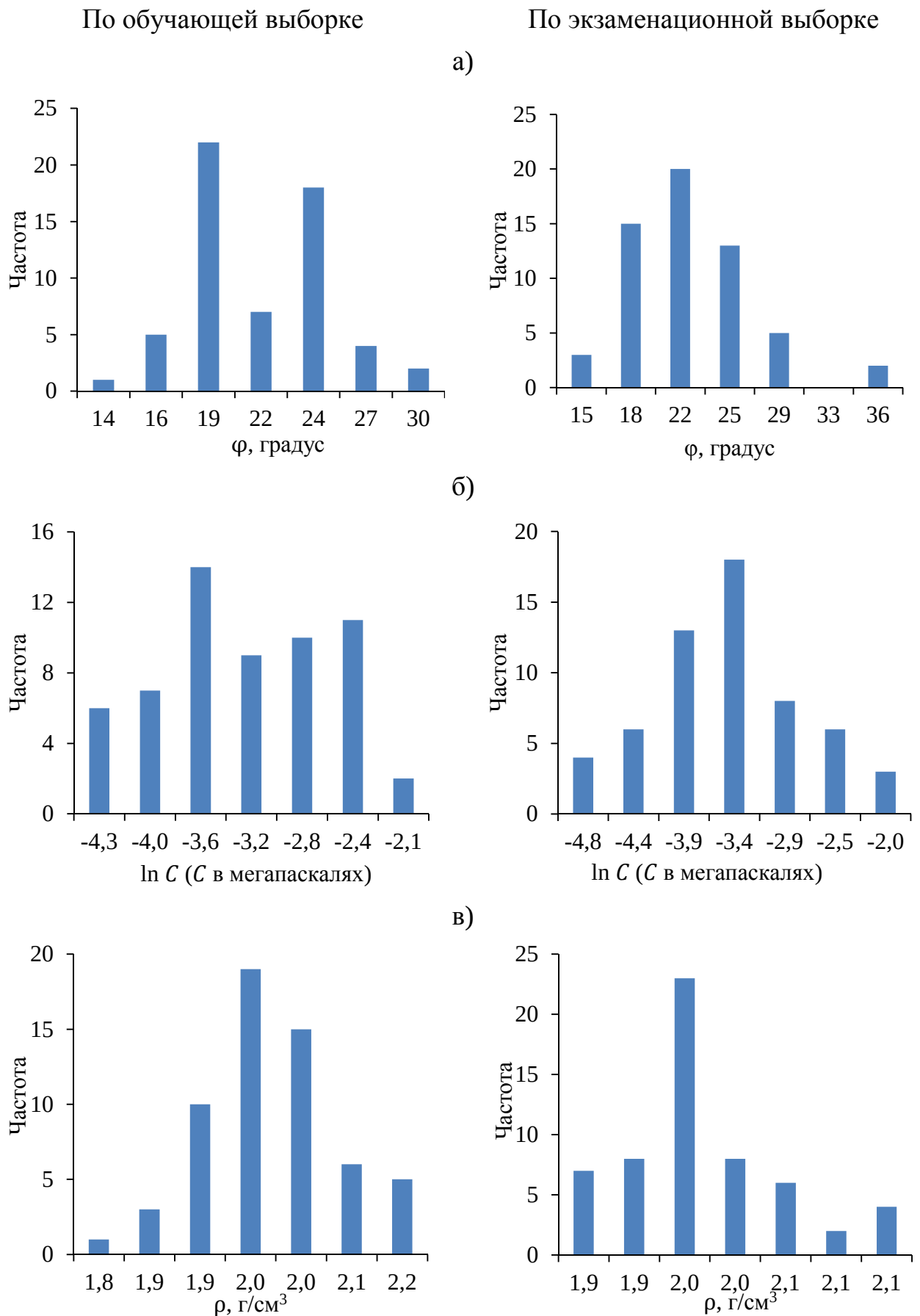


Рисунок 2.5. Эмпирическое распределение значений физико-механических свойств грунтов, расположенных ниже депрессионной кривой: угол внутреннего трения φ (а); логарифм сцепления $\ln C$ (б); плотность ρ (в)

Статистические показатели упомянутых выше интервальных рядов: среднее значение, размах, дисперсия, среднеквадратичное отклонение (стандарт), коэффициент вариации, мода, асимметрия и эксцесс, вычисляли по известным формулам (таблица 2.6).

Таблица 2.6. Основные статистические показатели

Показатель	Расчетная формула	Переменные формул
Размах R	$R = x_{max} - x_{min}$	x_{max}, x_{min} – максимальное и минимальное значения признака; n_i – частота признака в интервале; N – объем выборки; k – число параметров теоретического распределения; z – число интервалов; $x_{mod(min)}$ – нижняя граница модального интервала; m_{mod} – частота модального интервала
Шаг интервала h	$h = \frac{x_{max} - x_{min}}{1 + 3,2 \lg N}$	
Среднее значение $\bar{x}$	$\bar{x} = \frac{\sum x_i n_i}{N}$	
Дисперсия σ_x^2	$\sigma_x^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2 n_i}{N - 1}$	
Стандарт σ_x	$\sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2}$	
Степень свободы r	$r = z - k - 1$	
Асимметрия A	$A = \frac{\sum (x_i^3 n_i)}{\sum n_i \sigma^3}$	
Эксцесс $\mathcal{E}$	$\mathcal{E} = \frac{\sum (x_i^4 n_i)}{\sum n_i \sigma^4} - 3$	
Коэффициент вариации V_x	$V_x = \frac{\sigma_x}{\bar{x}} 100\%$	
Мода Mo	$Mo = x_{mod(min)} + h \frac{m_{mod} - m_{mod-1}}{(m_{mod} - m_{mod-1}) + (m_{mod} - m_{mod+1})}$	

Результаты расчета статистических характеристик анализируемых массивов по физико-механическим свойствам грунтов, которые используются для последующих оценок, представлены в таблице 2.7.

2.4. Проверка закона распределения

Одна из задач анализа физико-механических свойств грунтов заключается в выявлении закономерности распределения их значений и определении ее характера. Основной путь выявления закономерности распределения – построение вариационных рядов для достаточно больших совокупностей с предварительным выбором числа групп и размера интервала варьирующего свойства.

Таблица 2.7. Результаты расчета статистических характеристик физико-механических свойств грунтов⁶

Свой-ства	Статистические характеристики							
	R	$\bar{x}$	σ_x^2	σ_x	Мо	A	$\mathcal{E}$	V_x
Грунт, расположенный выше депрессионной кривой								
C , МПа	0,095	0,039	0,0004	0,021	0,027	1,43	1,66	69
	0,133	0,037	0,0004	0,021	0,025	1,88	6,45	67
φ , градус	17	21	9,4	3,1	22	1,7	5,5	14
	19	21	11,1	3,3	22	0,8	2,4	15
ρ , г/см ³	0,63	1,94	0,011	0,10	1,95	-0,95	2,80	5
	0,52	1,95	0,007	0,09	1,95	-1,04	2,55	4
Грунт, расположенный ниже депрессионной кривой								
C , МПа	0,104	0,043	0,0006	0,024	0,025	1,03	0,58	63
	0,122	0,039	0,0006	0,024	0,026	1,64	2,36	77
φ , градус	18	21	10,8	3,2	19	0,01	0,52	16
	24	20	17,9	4,2	19	1,00	2,37	20
ρ , г/см ³	0,37	1,98	0,005	0,07	1,95	-0,17	0,57	3
	0,25	1,97	0,003	0,06	1,98	0,61	0,27	3

Говоря о характере и типе закономерности распределения, имеем в виду отражение в ней общих условий, определяющих вариацию. При этом речь всегда идет о распределениях качественно однородных явлений. Общие условия, определяющие тип закономерности распределения, познаем анализом сущности явления, тех его свойств, которые определяют вариацию изучаемого признака.

Результаты экспериментальных данных по анализируемому свойству грунта представляли в виде гистограмм. Выдвигалась научная гипотеза, обосновывающая определенный тип теоретической кривой распределения, описывающей изменения частот в вариационном ряду, функционально связанном с изменением значений свойства (см. рисунки 2.4 и 2.5). Выполняли оценку соответствия эмпирического распределения теоретическому и устанавливали вероятность появления исследуемого признака.

Г. И. Покровский высказывал предположение, что распределение свойств грунтов соответствует гауссову распределению [105]. Согласно теории обработки статистических данных анализировалось соответствие выборки симметричным и

⁶Верхняя строка в таблице – значения для обучающей выборки, нижняя – экзаменационной.

ассимметричным распределениям [106].

Основные симметричные законы распределения:

– Нормальный применялся в случае, когда на величину изучаемого показателя оказывали влияние большое число случайных факторов и степень влияния каждого из них была невелика и не имела существенного преимущества по сравнению с другими.

– Логнормальный, находящийся в тесной связи с нормальным, использовался, когда нормальному распределению подчинялись значения логарифмов изучаемого показателя.

Асимметричные законы распределения:

– Гамма-распределение использовалось при преобладании малых, по сравнению со средним, значений показателя и величина положительной асимметрии не превышала +4.

– Распределения Вейбулла – для описания многих распределений экспоненциального типа.

Функции плотности указанных распределений приведены в таблице 2.8.

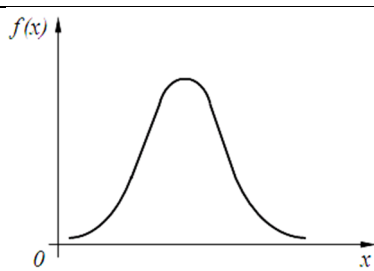
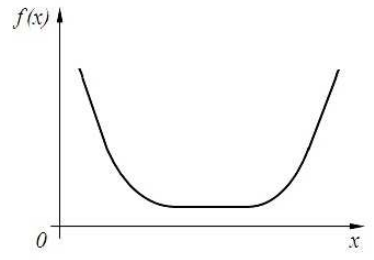
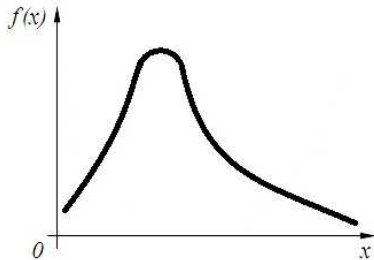
Анализ гистограмм, приведенных на рисунках 2.4 и 2.5, позволил выдвинуть нулевую гипотезу о том, что предполагаемый вид теоретического распределения для значений угла внутреннего трения и плотности грунта соответствует нормальному закону. При работе со значениями сцепления грунта был учтен опыт предыдущих исследований [104], результаты которого показали, что значения сцепления грунта подчиняются логнормальному закону распределения.

Для принятия нулевой гипотезы, то есть установления соответствия эмпирического распределения теоретическому, воспользовались известными в статистике критериями согласия (таблица 2.9):

– К. Пирсона $\chi^2_{\text{ф}}$, фактическое значение которого по экспериментальным данным сравнивают с критическим $\chi^2_{\text{кр}}(\alpha; r)^7$ и при выполнении условия $\chi^2_{\text{ф}} < \chi^2_{\text{кр}}$ делают вывод о соответствии эмпирического распределения теоретическому.

⁷ α – уровень значимости, r – степень свободы.

Таблица 2.8. Функции плотности распределений

Закон распределения	Функция плотности распределения	График функции
Нормальный	$f_x = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}}$	
Логнормальный	$f_x = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x_i - \bar{x})^2}{2\sigma_x^2}}$	
Вейбулла	$f_x = \frac{\eta}{v^\eta} x^{\eta-1} e^{-(x/v)^\eta}$	
Гамма-распределение	$f_x = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x_i^{\alpha-1} e^{-\frac{x_i}{\beta}}$	
	$\alpha = \left(\frac{\bar{x}}{\sigma_x}\right)^2 - 1$	
	$\beta = \frac{\sigma^2}{\bar{x}}$	

Примечание: $\Gamma(\alpha)$ – гамма-функция Эйлера; α, β – параметры гамма-распределения; v, η – параметры распределения Вейбулла, значения которых определяют по величине коэффициента вариации V_x

Таблица 2.9. Эмпирические значения критериев согласия

Показатель	Расчетная формула	Переменные формул
Критерий согласия К. Пирсона χ_ϕ^2	$\chi_\phi^2 = \sum \frac{(n_i - n_i^t)^2}{n_i^t}$	n_i, n_i^t – соответственно эмпирическая и теоретическая частота признака в интервале; N – объем выборки; w_i, w_i^t – эмпирические и теоретические накопленные частоты признака; k – число интервалов выборки; s – число параметров распределения
Степень свободы r	$r = k - s - 1$	
Критерий согласия А. Н. Колмогорова λ_ϕ	$\lambda_\phi = \sqrt{N} \max w_i - w_i^t $	
Критерий согласия В. И. Романовского Po_ϕ	$Po_\phi = \frac{ \chi_\phi^2 - r }{\sqrt{2r}}$	

– критерий А. Н. Колмогорова, лямбда λ применяется при объеме выборки больше 50 значений. Эмпирическое значение λ_ϕ сравнивается с критическим $\lambda_{кр}(\alpha)$, определяемым по таблице [106]. Если условие $\lambda_\phi < \lambda_{кр}$ выполняется, то

считают, что эмпирическое распределение соответствует теоретическому;

– критерий В. И. Романовского Po_{ϕ} в основном используется при отсутствии возможности вычисления критического значения критерия К. Пирсона. При значении критерия В. И. Романовского Po_{ϕ} для массива экспериментальных данных меньше 3 принимали, что расхождения распределений (эмпирического и теоретического) случайны и теоретическое распределение использовали в качестве модели для изучаемого признака [107].

Результаты расчета эмпирических и критических значений критериев согласия приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10. Проверка соответствия выборок закону распределения

Свойства	Гипотеза о законе распределения	Кол-во образцов в выборке	Критерий согласия					
			Пирсона		Романовского		Колмогорова	
			χ^2_{ϕ}	$\chi^2_{кр}$	Po_{ϕ}	$Po_{кр}$	λ_{ϕ}	$\lambda_{кр}$
Грунт, расположенный выше депрессионной кривой								
С, МПа	Логнорм-ный	84 / 83 ⁸	9,7/7,1⁹	11	1,22/0,54	3	0,18/0,39	1,36
φ, градус	Нормальный	84 / 83	84,2/70,3		34,6/25,2		2,14/2,51	
ρ, г/см ³	Нормальный	84 / 83	10,4/7,3		1,70/0,72		0,85/0,96	
Грунт, расположенный ниже депрессионной кривой								
С, МПа	Логнорм-ный	59 / 58	4,9/8,6	9,4	1,63/0,12	3	0,72/0,95	1,36
φ, градус	Нормальный	59 / 58	8,8/3,6		1,71/0,14		0,96/0,46	
ρ, г/см ³	Нормальный	59 / 58	2,1/8,3		0,64/1,52		0,21/1,11	

Анализ результатов проверки массивов физико-механических свойств грунтов дамб, приведенных в таблице 2.10, показывает, что распределение значений плотности грунта, угла внутреннего трения грунта ниже депрессионной кривой подчиняются нормальному; сцепления грунта – логнормальному закону (рисунок 2.6). Эмпирическое распределение значений угла внутреннего трения грунта выше депрессионной кривой не получило подтверждение подчинения какому-либо закону.

⁸ В числителе показатели обучающей выборки, в знаменателе – экзаменационной.

⁹ Выделенное полужирным шрифтом – подтверждение нулевой гипотезы закона распределения.

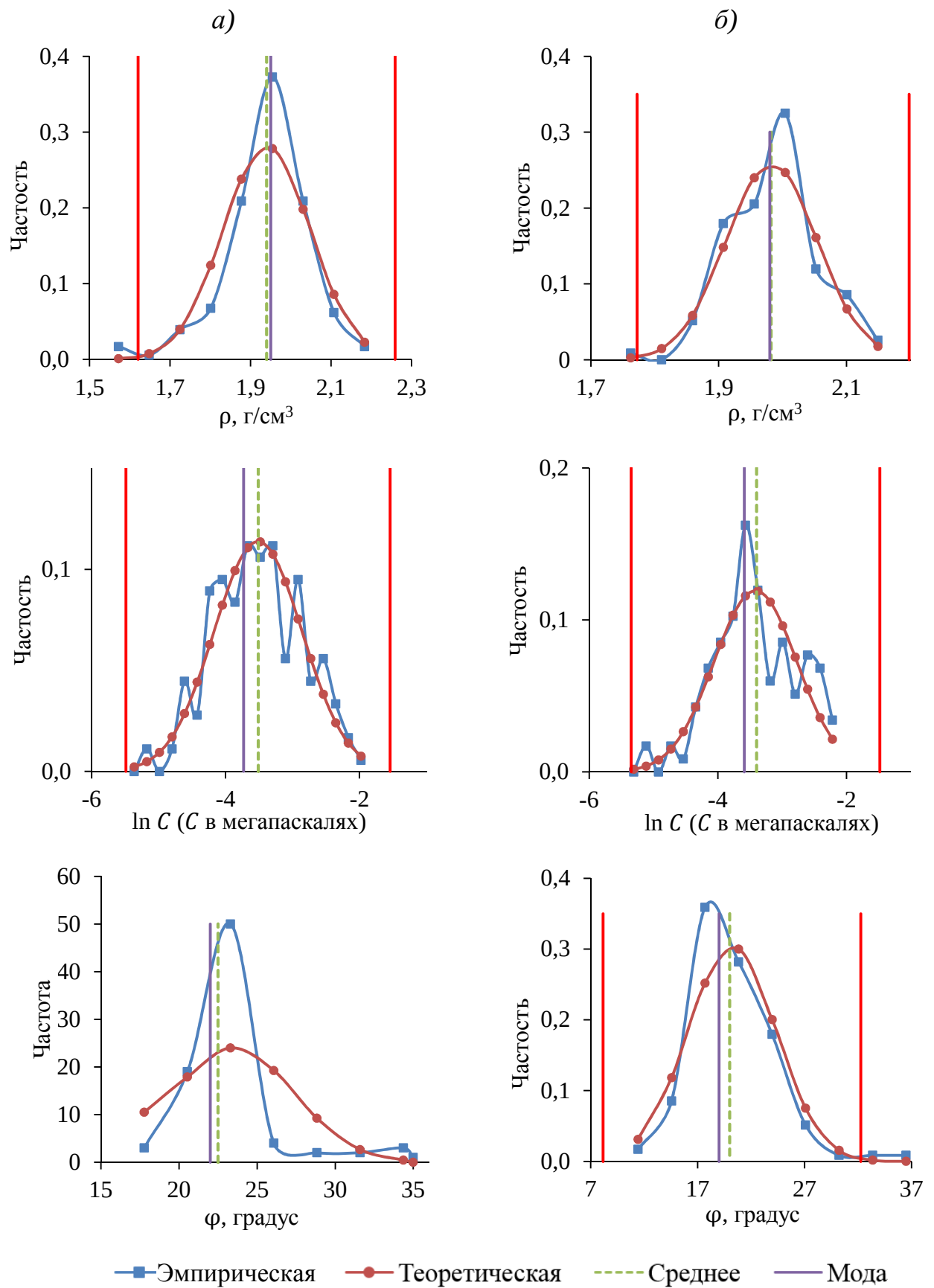


Рисунок 2.6. Теоретическое и эмпирическое распределения значений физико-механических свойств грунта выше (а) и ниже (б) депрессионной кривой

2.5. Сравнение средних значений

Как уже упоминалось выше (см. п. 2.1.), массив исходных данных исследуемых признаков был разделен на две выборки (обучающая и экзаменационная), в каждой из которых получены свои средние значения (см. таблица 2.8). В силу разнообразных причин средние значения обучающей и экзаменационной выборок одного и того же показателя могут различаться между собой. Поэтому после установления закона распределения проводили проверку равенства средних значений обучающей и экзаменационной выборок.

При соблюдении равенства средних значений показателя в двух независимых выборках наиболее вероятное значение признака рекомендовали в качестве расчетного в целом по региону, иначе производили районирование отличных от общей совокупности значений признака. Проверку значимости различий между средними значениями двух совокупностей производили по t -критерию Стьюдента. В качестве нулевой гипотезы принимали, что выборочные средние равны между собой, альтернативной – средние не равны, их различия существенны. На основе сравнения эмпирического значения t_ϕ критерия Стьюдента (таблица 2.11) с критическим $t_{кр}(\alpha; r)$, определяемым по таблице [107], при выполнении условия $t_\phi < t_{кр}$, принимали положительное решение относительно нулевой гипотезы о равенстве средних значений.

Таблица 2.11. Параметры для сравнения средних значений двух выборок

Показатель	Расчетная формула	Переменные формул
Эмпирический критерий Стьюдента t_ϕ	$t_\phi = \frac{ \bar{x}_1 - \bar{x}_2 }{\sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{n_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{n_2}\right)^2}}$	$\bar{x}_1, \bar{x}_2$ – средние значения признака в обучающей и экзаменационной выборках; σ_1, σ_2 – среднеквадратическое отклонение признака от среднего значения по обучающей и экзаменационной выборкам; n_1, n_2 – соответственно объем обучающей и экзаменационной выборок
Степень свободы r	$r = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)^2}{\frac{\sigma_1^2}{n_1+1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2+1}} - 2$	

Эмпирические и критические значения t_ϕ -критериев Стьюдента для анализируемого массива физико-механических свойств приведены в таблице 2.12.

Таблица 2.12. Сравнение средних значений свойств грунтов обучающей и экзаменационной выборок

Свойства	Среднее значение для выборки		Степень свободы r	Критерий Стьюдента	
	обучающей	экзаменационной		t_{ϕ}	$t_{кр}$
Грунт, расположенный выше депрессионной кривой					
C , МПа	0,039	0,037	179	$0,57^{10}$	1,97
ρ , г/см ³	1,94	1,95	175	$1,25$	1,97
Грунт, расположенный ниже депрессионной кривой					
C , МПа	0,039	0,043	116	$0,84$	1,98
ϕ , градус	21	20	115	$0,72$	1,98
ρ , г/см ³	1,98	1,97	115	$1,22$	1,98

Результаты, полученные при обработке массивов физико-механических свойств грунтов, свидетельствуют о равенстве средних значений для обучающей и экзаменационной выборок по всем рассматриваемым показателям. Следовательно, средние значения физико-механических свойств техногенных суглинистых грунтов могут быть рекомендованы в качестве нормативных при проектировании дамб в целом по региону (таблица 2.12). Однако анализ гистограмм (рисунок 2.6) эмпирического распределения значений сцепления показал, что целесообразнее использовать показатель, характеризующий наиболее часто встречающееся значение признака, именуемый в математической статистике "мода" (таблица 2.13).

Для выборок, распределение значений показателя которых соответствует нормальному или логнормальному законам и подтверждается равенство средних значений физико-механических свойств грунтов, установили теоретический диапазон изменчивости признака согласно правилу трех сигм: "абсолютная величина отклонения признака от среднего значения не превосходит утроенного среднего квадратического отклонения" (таблица 2.13).

Полученные средние значения свойств характерны для Кузбасса в целом, но являются ли они одними и теми же для отдельно-рассматриваемого района или объекта? Чтобы определить имеется ли расхождение между средними значениями отдельного объекта с общей совокупностью, воспользовались однофакторным дисперсионным анализом.

¹⁰Выделенное полужирным шрифтом – подтверждение нулевой гипотезы.

**Таблица 2.13. Характеристики изменчивости значений
физико-механических свойств грунтов**

Свойства	Мода	Среднее	Стандарт	Диапазон
Грунт, расположенный выше депрессионной кривой				
C , МПа	0,024	0,039	-	0,004–0,214 ¹¹
ρ , г/см ³	1,95	1,95	0,09	1,64–2,23
Грунт, расположенный ниже депрессионной кривой				
C , МПа	0,025	0,037	-	0,004–0,226
φ , градус	19	20	4	8–32
ρ , г/см ³	1,98	1,98	0,06	1,80–2,16

2.6. Установление однородности средних значений с общей выборкой

При обработке массива экспериментальных данных методом однофакторного дисперсионного анализа, позволяющего сравнивать средние значения трех и более групп, оценивалась значимость различий в средних значениях физико-механических свойств грунтов, отобранных в отдельных районах территории Кузбасса.

Нулевая гипотеза дисперсионного анализа о статистической однородности результатов изысканий во всех группах (под однородностью понимали одинаковость средних значений в любом подмножестве данных) и альтернативная гипотеза о неоднородности изысканий в группах проверялись по критерию Р. Э. Фишера F_ϕ .

Для проведения однофакторного дисперсионного анализа разделили массив физико-механических свойств грунтов по определенному фактору – их принадлежность отдельному грунтовому сооружению. Для этих выборок определяли межгрупповую $S_{\text{мг}}^2$ и внутригрупповую $S_{\text{вг}}^2$ дисперсии, на основании которых вычисляли эмпирическое значение критерия Р. Э. Фишера F_ϕ . Сравнивая F_ϕ с критическим $F_{\text{кр}}(\alpha; g - 1; g - P)$, определяемым по таблицам [107], делали вывод о статистической однородности физико-механических свойств грунта. Если $F_\phi < F_{\text{кр}}$, то принимали нулевую гипотезу, иначе – опровергали (таблица 2.14).

Результаты расчета эмпирического и критического значений критерия Р. Э. Фишера сведены в таблицу 2.15.

¹¹ Для значений сцепления грунта мода, среднее, стандарт и теоретический диапазон преобразованы из логарифмических значений в натуральные.

Таблица 2.14. Параметры однофакторного дисперсионного анализа

Показатель	Расчетная формула	Переменные формул
Межгрупповая дисперсия $S_{\text{мг}}^2$	$S_{\text{мг}}^2 = \sum_{k=1}^m n_i (\bar{x}_u - \bar{x})^2$	$\bar{x}$ – среднее значение признака всей совокупности; $\bar{x}_u$ – среднее значение признака в u -й выборке; P – число выборок; x_{iu} – значение i -го признака j -й выборки; g – число значений признака
Внутригрупповая дисперсия $S_{\text{вг}}^2$	$S_{\text{вг}}^2 = \sum_{j=1}^k \sum_{u=1}^m (x_{iu} - \bar{x}_u)^2$	
Эмпирический критерий Фишера F_{ϕ}	$F_{\phi} = \frac{S_{\text{мг}}^2 (g - P)}{S_{\text{вг}}^2 (g - 1)}$	

Таблица 2.15. Проверка однородности средних значений свойств с общей выборкой

Свойство	Критерий Фишера		Вывод о соответствии
	F_{ϕ}	$F_{кр}$	
Грунт, расположенный выше депрессионной кривой			
C	5,83	1,63	не однородны
ρ	3,30	1,65	не однородны
Грунт, расположенный ниже депрессионной кривой			
C	1,79	1,65	не однородны
φ	1,43	1,65	однородны
ρ	1,57	1,65	однородны

Согласно результатам проверки однородности средних значений свойств с общей выборкой установлено:

– для массивов значений плотности и угла внутреннего трения грунта ниже депрессионной кривой равенства средних значений отдельной дамбы с общей совокупностью подтверждаются. Следовательно, среднее значение общей совокупности можно считать постоянным для Кузбасса;

– для значений сцепления грунта и плотности грунта выше депрессионной кривой нулевая гипотеза не подтверждается. Следовательно, в указанных выборках присутствуют неоднородные элементы.

Неоднородность выявляли сравнением среднего значения каждого элемента со средним общей выборки методом множественного сравнения Б. Дункана.

2.7. Определение неоднородных объектов в генеральной совокупности

Проверка массива физико-механических свойств грунтов по отдельному объекту, например по объекту 9 (рисунок 2.7), с общим массивом на неоднородность с использованием эмпирического значения критерия Б. Дункана D_Φ сводилась к следующему: в выборках, использованных в однофакторном дисперсионном анализе, устанавливали среднее значение показателей и их объем; проводили ранжирование средних значений от максимального к минимальному; для каждой выборки в ранжированном ряду вычисляли эмпирическое D_Φ (таблица 2.16) и устанавливали критическое значение критерия $D_{кр}(r_1; r_2)$ по таблице [108]. При выполнении условия $D_\Phi > D_{кр}$ выявляли отличные от общей совокупности выборки.

Таблица 2.16. Параметры множественного сравнения по критерию Б. Дункана

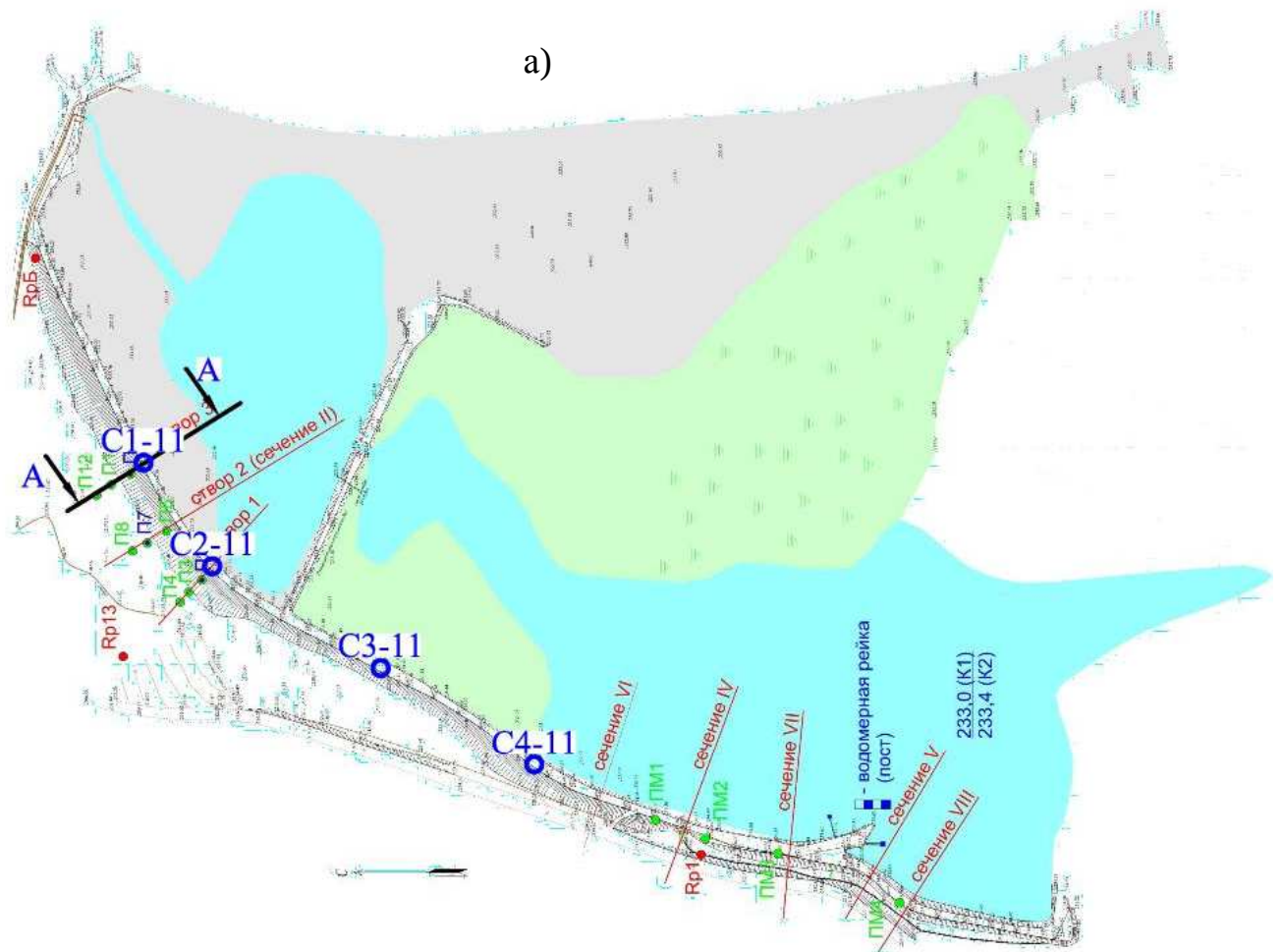
Показатель	Формула	Переменные формул
Критерий Дункана D_Φ	$D_\Phi = \frac{ \bar{x}_i - \bar{x}_j }{\sqrt{\frac{S_{\text{мг}}}{2} \left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j} \right)}}$	$S_{\text{мг}}$ – среднеквадратичная дисперсия внутри групп; $\bar{x}_i, \bar{x}_j$ – средние значения сравниваемых групп; n_i, n_j – объемы выборок сравниваемых групп; n_b – число средних значений между сравниваемыми выборками; N – объем выборки; P – число выборок.
Степень свободы r_1	$r_1 = n_b + 2$	
Степень свободы r_2	$r_2 = N - P$	

Результаты проверки однородности средних значений свойств грунтов по критерию Б. Дункана приведены в таблице 2.17.

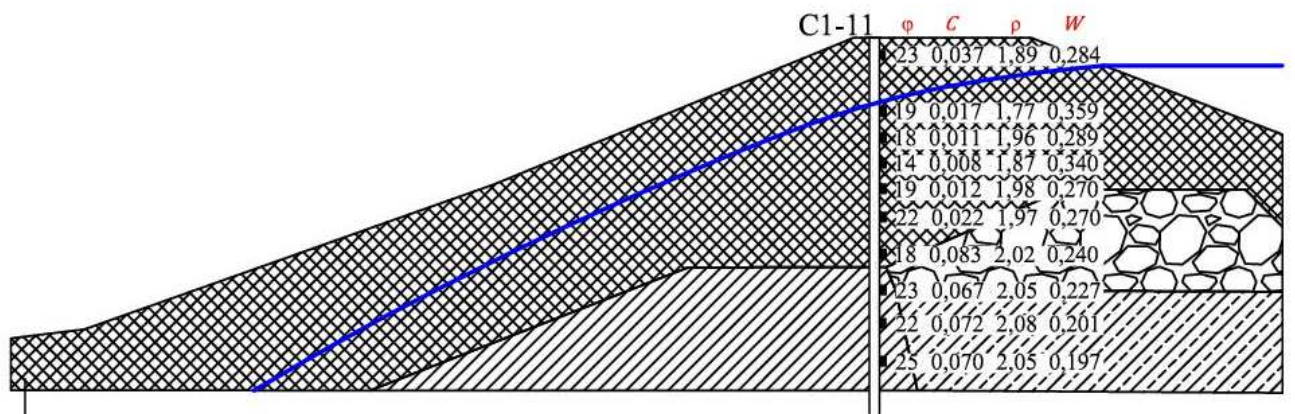
Анализ результатов оценки однородности средних значений свойств грунта, приведенных в таблице 2.17, показал следующее:

– средние значения плотности грунтов выше депрессионной кривой объектов 1, 5 и 13 выделены в отдельные группы, так как по ним наблюдается превышение критического значения критерия Б. Дункана;

– значения сцепления грунта однородны, за исключением объектов 5, 10, 12 и 16.



б) по линии А-А



Условные обозначения

■ - место отбора монолитов;
 W - естественная влажность, д.е.;

ρ - плотность, г/см³;
 φ - угол внутреннего трения, градус;
 c - сцепление, МПа;

■ - насыпной грунт (суглинок);
 ■ - насыпной грунт (бурый суглинок);
 ■ - грунт тела дамбы наращивания (суглинок);
 ■ - вскрышная порода.

Рисунок 2.7. План (а) и поперечный разрез (б) грунтовой дамбы объекта 9

Таблица 2.17. Проверка однородности средних значений свойств грунта¹²

Шифр объекта	Плотность грунта выше депрессионной кривой		Сцепление грунта выше депрессионной кривой		Сцепление грунта ниже депрессионной кривой	
	Критерий Б. Дункана					
	D_{ϕ}	$D_{кр}$	D_{ϕ}	$D_{кр}$	D_{ϕ}	$D_{кр}$
1	3,23	3,14	0,66	2,77	0,72	2,77
2	3,06	3,14	1,37	2,91	2,25	3,19
3	1,97	3,08	1,96	3,08	1,13	3,01
4	0,03	2,77	1,35	3,23	1,29	3,29
5	5,12	3,19	5,05	3,19	–	
6	1,05	3,19	1,18	3,14	–	
7	0,95	3,01	–		0,74	2,91
8	–		0,76	2,77	2,06	3,26
9	0,17	2,91	1,05	2,91	0,11	2,77
10	–		–		7,01	3,08
11	1,62	3,01	2,61	3,14	0,45	3,01
12	1,42	3,23	4,67	3,26	0,36	3,08
13	4,68	3,29	2,36	3,08	1,61	3,14
14	0,08	2,77	2,71	3,01	–	
15	–		1,51	3,19	0,23	2,91
16	2,87	3,08	5,25	3,23	–	
17	1,06	2,91	0,74	3,01	2,68	3,23

Следует отметить, что средние значения сцепления грунта по объектам 10, 12 и 16 превышают среднее значение общей совокупности (для грунта выше депрессионной кривой – 0,039 МПа; ниже – 0,037 МПа). Использование для расчетов устойчивости грунтовых сооружений таких значений свойств может привести к завышенному, по сравнению с фактическим, коэффициенту устойчивости. Поэтому указанные показатели выделяли в отдельные районы, а в качестве обобщенного значения сцепления принимали его модальное значение.

На основании статистической обработки анализируемых массивов получены обобщённые значения физико-механических свойств дисперсных связных техногенных суглинистых грунтов для условий Кузбасса (таблица 2.18).

Анализ результатов статистической обработки экспериментальных данных по физико-механическим свойствам техногенных суглинистых грунтов для условий Кузбасса показал следующее:

¹² жирным шрифтом выделены объекты, средние значения свойств которых отличаются от общего среднего, прочерк – отсутствие экспериментальных данных.

– диапазон фактических значений свойств обширнее рекомендуемых Сводом Правил (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 значений свойств грунтов, расположенных выше и ниже депрессионной кривой, находятся в пределах погрешности вычислений (угол внутреннего трения – 1° , сцепление – 0,001 МПа, плотность – $0,03 \text{ г/см}^3$).

Следовательно, на этапе проектирования насыпных сооружений, расположенных на территории Кузбасса, а также при отсутствии инженерно-геологических изысканий, можно руководствоваться обобщенными значениями физико-механических свойств грунта, приведенными в таблице 2.18.

Процедура по анализу и обобщению физико-механических свойств грунтов по материалам инженерно-геологических изысканий приведена на рисунке 2.8.

Анализ результатов статистической обработки экспериментальных данных по физико-механическим свойствам дисперсных связных техногенно перемещенных природных суглинистых грунтов для условий Кузбасса позволяет сформулировать следующие выводы по главе 2.

2.8. Выводы по главе 2

1. Изменчивость свойств техногенных грунтов, характеризуемая коэффициентом вариации V , отдельного объекта и совокупности объектов Кузбасса по глубине и площади носит случайный характер, имеет небольшой (до 4 %) разброс значений по плотности ($\rho = 1,77\text{--}2,19 \text{ г/см}^3$), несколько больший (до 15 %) диапазон угла внутреннего трения ($\varphi = 11^\circ\text{--}35^\circ$) и весьма значимое (до 69 %) варьирование значений сцепления ($C = 0,009\text{--}0,113 \text{ МПа}$).

2. Характеристики плотности ρ и угла внутреннего трения φ грунтов дамб подчиняются нормальному, сцепления C – логнормальному законам распределения, что подтверждается критериями согласия К. Пирсона, В. И. Романовского и А. Н. Колмогорова при 5 % уровне значимости.

3. Для дамб, расположенных на территории Кузбасса, в качестве обобщенных приняты следующие характеристики физико-механических свойств грунтов:

усредненные значения плотности $\rho = 1,95 \text{ г/см}^3$ ($1,98 \text{ г/см}^3$)¹³ и угла внутреннего трения $\varphi = 21^\circ$ (20°), модальное значение сцепления $C = 0,024 \text{ МПа}$ ($0,025 \text{ МПа}$).

4. Алгоритм обобщения физико-механических свойств грунтов с целью составления региональной таблицы нормативных значений заключается в сборе материалов инженерно-геологических изысканий; создании массива экспериментальных данных, включающего обучающую и экзаменационную выборки; определении их основных статистических характеристик и проверки соответствия закону распределения; установлении однородности свойств; создании региональной таблицы нормативных значений; выделении районов со специфичными условиями.

Установленные в результате проведенных исследований региональные нормативные значения физико-механических свойств техногенных суглинистых грунтов, характеризуемые показателями плотности, угла внутреннего трения и сцепления, позволяют перейти к решению задач по прогнозу прочностных характеристик (сцепление C , угол внутреннего трения φ) по физическим (плотность ρ , влажность W , коэффициент пористости e).

¹³ В скобках указаны значения для грунтов, расположенных ниже депрессионной кривой.

Таблица 2.18. Физико-механические характеристики техногенных суглинистых грунтов дамб для условий Кузбасса

Показатель	Обобщенные по Кузбассу ¹⁴	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	$\frac{-}{14 - 35}^{15}$	$\frac{-}{14 - 32}$	$\frac{-}{14 - 29}$	$\frac{-}{18 - 33}$	$\frac{-}{17 - 25}$	$\frac{-}{15 - 35}$	15 – 20	18 – 26
C, 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, г/см 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	$\frac{20}{11 - 32}$	$\frac{20}{14 - 32}$	$\frac{18}{16 - 24}$	$\frac{21}{18 - 26}$	$\frac{20}{18 - 26}$	$\frac{22}{19 - 23}$	–	–
C, 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, г/см ³	$\frac{1,98}{1,77 - 2,14}$	$\frac{1,97}{1,77 - 2,08}$	$\frac{1,95}{1,89 - 2,99}$	$\frac{1,98}{1,84 - 2,14}$	$\frac{2,12}{1,85 - 2,13}$	$\frac{1,99}{1,93 - 2,04}$	–	–

¹⁴ В числителе указаны обобщенные значения (для угла внутреннего трения и плотности – средние; сцепления – модальные), в знаменателе – диапазон изменения свойств грунтов.

¹⁵ Обобщенное значение угла внутреннего трения не приводится, так как его распределение не получило подтверждения подчинению нормальному закону.



Рисунок 2.8. Структурно-логическая схема анализа и обобщения физико-механических характеристик техногенных грунтов

3. ПРОГНОЗ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ

При проведении инженерно-геологических изысканий не всегда проводится полный комплекс исследований свойств техногенных грунтов. В практике зачастую имеются материалы исследования гранулометрического состава и физических свойств грунтов (плотность, влажность) и отсутствуют исследования прочностных характеристик, необходимых для оценки устойчивости дамбы. В этой связи поставлена задача: установить связь прочностных (сцепление C , угол внутреннего трения φ) характеристик от физических (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) для имеющегося массива проб (приложение 1) методом корреляции.

3.1. *Определение наличия связи между свойствами*

Исследование было начато с графического анализа зависимости между свойствами. По оси абсцисс откладывали значения одного из физических свойств x_i (например, естественную влажность W , называемого факторным), а по оси ординат – прочностного y_i (сцепления C , принимаемого за результирующий показатель). Каждое измерение изображалось точкой, а их совокупность – облаком точек.

В первоначальных исследованиях установлено [109] беспорядочное расположение точек (рисунок 3.1. а), что указывало на отсутствие зависимости между свойствами.

На довольно малый диапазон, иногда и для одиночного значения физического свойства, приходился широкий диапазон изменения значений прочностных свойств. Автором была выдвинута гипотеза: "надежную корреляционную связь прочностных свойств грунтов от физических можно установить, если анализировать усреднённое значение прочностных свойств и середины интервалов физических" (рисунок 3.1.б). Все экспериментальные данные инженерно-геологических изысканий по грунтам

выше и ниже депрессионной кривой (таблица 3.1) разделили на две матрицы по результативному показателю: сцепление C (формула 3.1а) и угол внутреннего трения φ (формула 3.1б).

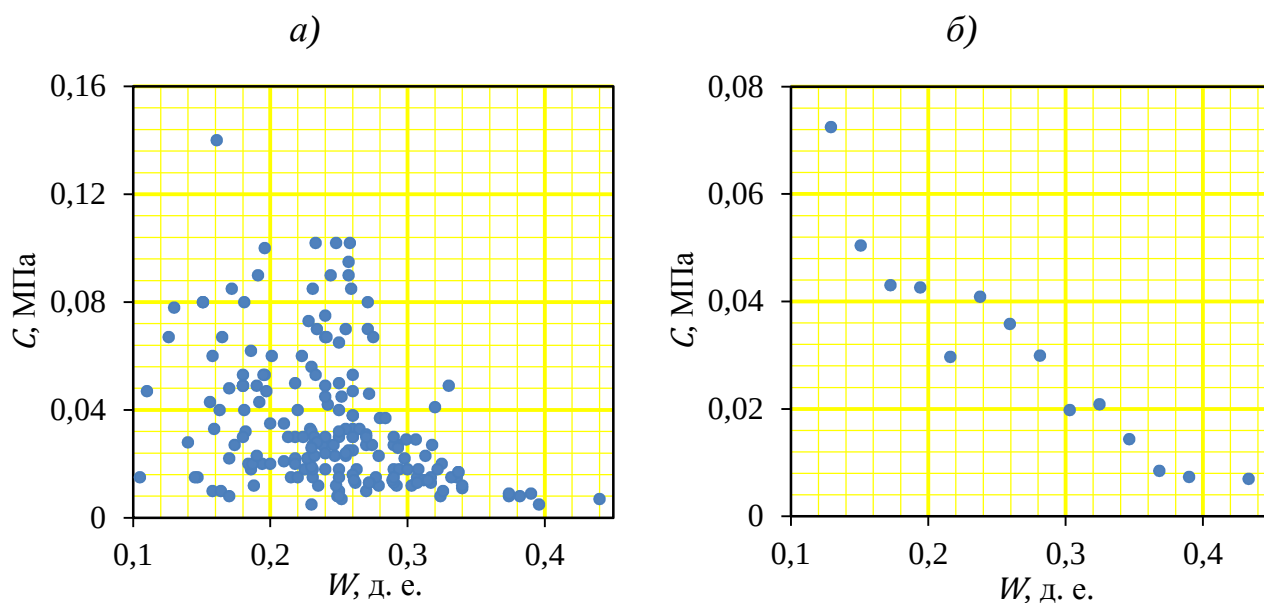


Рисунок 3.1. Корреляционное поле общей выборки (а) и группированной (б) пары "сцепление C – естественная влажность W "

Таблица 3.1. Массив экспериментальных данных

Шифр предприятия	Результативный показатель (прочностные свойства)		Факторный показатель x_{ij} (физические свойства)							
	φ_j	C_j	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Грунт, расположенный выше депрессионной кривой										
1	22	0,015	1,60	0,147	0,317	0,226	0,091	0,87	0,93	0,43
...										
Грунт, расположенный ниже депрессионной кривой										
1	21	0,027	1,93	0,304	0,356	0,252	0,104	0,50	0,82	1,00

$$\begin{pmatrix} x_{11}; x_{21}; \dots; x_{i1}; \dots; x_{n1}; C_1 \\ x_{12}; x_{22}; \dots; x_{i2}; \dots; x_{n2}; C_2 \\ x_{1j}; x_{2j}; \dots; x_{ij}; \dots; x_{nj}; C_j \\ \vdots \\ x_{1m}; x_{2m}; \dots; x_{im}; \dots; x_{nm}; C_m \end{pmatrix}, \quad (3.1a)$$

$$\begin{pmatrix} x_{11}; x_{21}; \dots; x_{i1}; \dots; x_{n1}; \varphi_1 \\ x_{12}; x_{22}; \dots; x_{i2}; \dots; x_{n2}; \varphi_2 \\ x_{1j}; x_{2j}; \dots; x_{ij}; \dots; x_{nj}; \varphi_j \\ \vdots \\ x_{1m}; x_{2m}; \dots; x_{im}; \dots; x_{nm}; \varphi_m \end{pmatrix}, \quad (3.16)$$

где x_{ij} – результат определения i -го ($i = 1, 2, \dots, n$) физического свойства для j -го ($j = 1, 2, \dots, m$) образца; C_j, φ_j – соответственно сцепление и угол внутреннего трения j -го ($j = 1, 2, \dots, m$) образца.

Массив экспериментальных данных разделили на пары: факторный (физическое свойство) – результативный (прочностное свойство) показатели. Всего получилось 32 пары, из них 16 по грунтам выше депрессионной кривой, 16 – ниже.

Физические свойства представляли в виде интервального ряда, шаг h которых вычислялся по формуле Стерджесса (см. таблицу 2.6), прочностные – в виде средних значений, соответствующих интервалу физических свойств (таблица 3.2). Результаты изображали в двумерном пространстве в виде облака точек (рисунок 3.2).

Таблица 3.2. Пара факторный – результативный показатели (пример)

Показатель	Свойство	Интервал	0,09– 0,11	...	0,33– 0,35	0,35– 0,37	0,37– 0,40	0,42– 0,44
Факторный x_{ij}	Естественная влажность W , д. е.	Середина интервала	0,10		0,34	0,36	0,39	0,43
Результативный C_j	Сцепление C , МПа	Среднее значение	0,025		0,014	0,008	0,007	0,007
		Частота	2		10	9	4	3

Визуальным анализом графиков отбирали пары, для которых прослеживалась статистическая зависимость между признаками.

Ввиду небольшого диапазона изменения показателей предположить точный вид (прямолинейный или криволинейный) статистической связи не представлялось возможным, так как графики всех видов связи на малом промежутке могут изображаться отрезком близким к прямой. Поэтому для более надежного суждения относительно вида связи перейдем к первому этапу корреляционного моделирования – регрессионному анализу.

3.2. Регрессионный анализ связи

Отыскание регрессионного уравнения, наиболее адекватно описывающего зависимость между физическими и прочностными характеристиками грунтов, выполняли путем определения коэффициентов уравнений связи по методу наименьших квадратов (МНК).

Минимизируем сумму квадратов отклонений S эмпирических y_i от прогнозируемых значений $\hat{y}_i$ прочностных свойств и составим систему линейных уравнений, решение которых (таблица 3.3) позволяет получить параметры регрессионной модели.

$$S = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \min. \quad (3.2)$$

Меру близости эмпирических y_i и прогнозируемых значений $\hat{y}_i$ прочностных свойств оценивали средней квадратической погрешностью $\sigma_{y/x}$ уравнения парной регрессии

$$\sigma_{y/x} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}. \quad (3.3)$$

Параметры уравнений парной регрессии и среднеквадратические погрешности $\sigma_{y/x}$, рассчитанные с использованием *Microsoft Office Excel*, приведены в таблицах 3.4 и 3.5. Выбор уравнений связи для последующего расчета основывался на условиях простоты функции и минимизации среднеквадратической погрешности $\sigma_{y/x}$ (таблица 3.6).

Анализ данных таблицы 3.6 показал, что для каждого прочностного свойства имеется набор оптимальных уравнений различного вида и связь с несколькими физическими свойствами.

Для оценки наличия и тесноты связи между признаками перейдем ко второму этапу корреляционного моделирования – корреляционный анализ.

Таблица 3.3. Система линейных уравнений потенциально возможных видов функций

Вид функции	Уравнение функции	Система линейных уравнений	Решение системы линейных уравнений
Прямолинейная	$y_i = a + bx_i$	$\begin{cases} na + b \sum x_i = \sum y_i \\ a \sum x_i + b \sum x_i^2 = \sum (y_i x_i) \end{cases}$	$\begin{cases} b = \frac{n \sum (y_i x_i) - \sum y_i \sum x_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \\ a = \frac{\sum y_i - b \sum x_i}{n} \end{cases}$
Криволинейная связь			
Экспоненциальная	$y_i = ae^{bx_i}$	$\begin{cases} n \ln a + b \sum x_i = \sum \ln y_i \\ \ln a \sum x_i + b \sum x_i^2 = \sum (\ln y_i x_i) \end{cases}$	$\begin{cases} b = \frac{n \sum (\ln y_i x_i) - \sum \ln y_i \sum x_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \\ a = \frac{\sum \ln y_i - b \sum x_i}{n} \end{cases}$
Параболическая	$y_i = ax_i^2 + bx_i + d$	$\begin{cases} a \sum x_i^4 + b \sum x_i^3 + d \sum x_i^2 = \sum y_i x_i^2 \\ a \sum x_i^3 + b \sum x_i^2 + d \sum x_i = \sum y_i x_i \\ a \sum x_i^2 + b \sum x_i + dn = \sum y_i \end{cases}$	Вычисление коэффициентов выполняется по методам Гаусса, Крамера или подстановки.
Степенная	$y_i = ax_i^b$	$\begin{cases} n \ln a + b \sum \ln x_i = \sum \ln y_i \\ \ln a \sum \ln x_i + b \sum (\ln x_i)^2 = \sum (\ln y_i \ln x_i) \end{cases}$	$\begin{cases} b = \frac{n \sum (\ln y_i \ln x_i) - \sum \ln y_i \sum \ln x_i}{n \sum (\ln x_i)^2 - (\sum \ln x_i)^2} \\ a = \frac{\sum \ln y_i - b \sum \ln x_i}{n} \end{cases}$
Логарифмическая	$y_i = a + b \ln x_i$	$\begin{cases} na + b \sum \ln x_i = \sum y_i \\ a \sum \ln x_i + b \sum (\ln x_i)^2 = \sum (\ln x_i y_i) \end{cases}$	$\begin{cases} b = \frac{n \sum (\ln x_i y_i) - \sum y_i \sum \ln x_i}{n \sum (\ln x_i)^2 - (\sum \ln x_i)^2} \\ a = \frac{\sum y_i - b \sum \ln x_i}{n} \end{cases}$

Таблица 3.4. Уравнения парной регрессии – сцепления C от физических свойств

Физическое свойство	Прямолинейная связь	Криволинейная связь			
		Экспоненциальная	Логарифмическая	Параболическая	Степенная
Грунт, расположенный ниже депрессионной кривой					
W	$\hat{C}_e = -0,39W + 0,14$	$\hat{C}_e = 0,41e^{-9,47W}$	$\hat{C}_e = -7,10 \ln W - 0,10$	$\hat{C}_e = 3,34W^2 - 2,17W + 0,37$	$\hat{C}_e = 0,0011W^{-2,5}$
$\sigma_{y/x}^{16}$	0,0119 / 52	0,0094 / 41	0,0106 / 46	0,0068 / 30	0,0086 / 38
W_l	$\hat{C}_e = 0,11W_l - 0,0053$	$\hat{C}_e = 0,01e^{2,85W_l}$	$\hat{C}_e = 0,04 \ln W_l + 0,08$	$\hat{C}_e = 0,02W_l^2 + 0,09W_l + 0,002$	$\hat{C}_e = 0,10W_l^{1,12}$
$\sigma_{y/x}$	0,0081/ 35	0,0088 / 38	0,00792 / 35	0,0080 / 35	0,0087 / 38
W_p	$\hat{C}_e = 0,06W_p + 0,018$	$\hat{C}_e = 0,02e^{2,55W_p}$	$\hat{C}_e = 0,018 \ln W_p + 0,06$	$\hat{C}_e = -0,31W_p^2 + 0,24W_p - 0,003$	$\hat{C}_e = 0,09W_p^{0,72}$
$\sigma_{y/x}$	0,0085 / 37	0,0091 / 40	0,0081 / 36	0,0080 / 35	0,0090 / 39
I_p	$\hat{C}_e = -0,028I_p + 0,05$	$\hat{C}_e = 0,05e^{-0,78I_p}$	$\hat{C}_e = -0,008 \ln I_p + 0,03$	$\hat{C}_e = -0,54I_p^2 + 0,58I_p - 0,03$	$\hat{C}_e = 0,02I_p^{-0,25}$
$\sigma_{y/x}$	0,0151 / 66	0,0122 / 53	0,0134 / 59	0,0098 / 43	0,0121 / 53
I_l	$\hat{C}_e = -0,068I_l + 0,06$	$\hat{C}_e = 0,05e^{-2,14I_l}$	—	$\hat{C}_e = 0,046I_l^2 - 0,097I_l + 0,05$	—
$\sigma_{y/x}$	0,0099 / 43	0,0084 / 36		0,0073 / 32	
e	$\hat{C}_e = -0,11e + 0,12$	$\hat{C}_e = 0,27e^{-2,82e}$	$\hat{C}_e = -0,089 \ln e + 0,01$	$\hat{C}_e = 0,36e^2 - 0,67e + 0,33$	$\hat{C}_e = 0,017e^{-2,20}$
$\sigma_{y/x}$	0,0128 / 56	0,0102 / 45	0,0108 / 47	0,0071 / 31	0,0085 / 37
S_r	$\hat{C}_e = 0,20S_r - 0,16$	$\hat{C}_e = 0,000006e^{9,91S_r}$	$\hat{C}_e = 0,19 \ln S_r + 0,04$	$\hat{C}_e = -2,71S_r^2 + 5,30S_r - 2,55$	$\hat{C}_e = 0,05S_r^{9,44}$
$\sigma_{y/x}$	0,0152 / 23	0,0164 / 28	0,0152 / 23	0,0162 / 27	0,0170 / 32
ρ	$\hat{C}_e = 0,19\rho - 0,34$	$\hat{C}_e = 0,000004e^{4,64\rho}$	$\hat{C}_e = 0,39 \ln \rho - 0,22$	$\hat{C}_e = 0,99\rho^2 - 3,69\rho + 3,46$	$\hat{C}_e = 0,00005\rho^{9,01}$
$\sigma_{y/x}$	0,0139 / 61	0,0099 / 43	0,0151 / 66	0,0045 / 20	0,0159 / 69

¹⁶Средняя квадратическая погрешность $\sigma_{y/x}$ приведена в МПа; в числителе указаны значения $\sigma_{y/x}$, в знаменателе доля от среднего значения сцепления по Кузбассу.

Продолжение таблицы 3.4

Физиче- ское свой- ство	Прямолинейная связь	Криволинейная связь			
		Экспоненциальная	Логарифмическая	Параболическая	Степенная
Грунт, расположенный выше депрессионной кривой					
W	$\hat{C}_e = -0,19W + 0,08$	$\hat{C}_e = 0,19e^{-7,66W}$	$\hat{C}_e = -0,05 \ln W - 0,03$	$\hat{C}_e = 0,37W^2 - 0,39W + 0,10$	$\hat{C}_e = 0,002W^{-1,86}$
$\sigma_{y/x}$	0,0103 / 52	0,0156 / 78	0,0128 / 64	0,0019 / 60	0,0096 / 48
W_l	$\hat{C}_e = 0,013W_l + 0,03$	$\hat{C}_e = 0,05e^{-0,90W_l}$	$\hat{C}_e = 0,007 \ln W_l + 0,04$	$\hat{C}_e = -0,98W_l^2 + 0,75W_l + 0,10$	$\hat{C}_e = 0,02W_l^{-0,22}$
$\sigma_{y/x}$	0,0087 / 44	0,0100 / 50	0,0086 / 43	0,0088 / 44	0,0097 / 49
W_p	$\hat{C}_e = -0,16W_p + 0,06$	$\hat{C}_e = 0,22e^{-9,0W_p}$	$\hat{C}_e = -0,03 \ln W_p - 0,02$	$\hat{C}_e = -2,09W_p^2 + 0,91W_p - 0,06$	$\hat{C}_e = 0,001W_p^{-2,07}$
$\sigma_{y/x}$	0,0100 / 49	0,0129 / 65	0,0101 / 51	0,0073 / 37	0,0134 / 67
I_p	$\hat{C}_e = 0,35I_p + 0,004$	$\hat{C}_e = 0,01e^{6,68I_p}$	$\hat{C}_e = 0,04 \ln I_p + 0,13$	$\hat{C}_e = 1,58I_p^2 - 0,07I_p + 0,02$	$\hat{C}_e = 0,21I_p^{0,84}$
$\sigma_{y/x}$	0,0098 / 49	0,0090 / 46	0,01033 / 52	0,0095 / 48	0,0094 / 47
I_l	$\hat{C}_e = -0,01I_l + 0,04$	$\hat{C}_e = 0,03e^{-0,31I_l}$	—	$\hat{C}_e = -0,003I_l^2 - 0,01I_l + 0,04$	—
$\sigma_{y/x}$	0,0154 / 77	0,0152 / 75		0,0161 / 81	
e	$\hat{C}_e = -0,07e + 0,09$	$\hat{C}_e = 0,20e^{-2,6e}$	$\hat{C}_e = -0,05 \ln e + 0,01$	$\hat{C}_e = 0,02e^2 - 0,10e + 0,10$	$\hat{C}_e = 0,01e^{-1,76}$
$\sigma_{y/x}$	0,0368 / 184	0,0074 / 37	0,0649 / 325	0,1558 / 779	0,1706 / 853
S_r	$\hat{C}_e = 0,02S_r + 0,01$	$\hat{C}_e = 0,01e^{1,38S_r}$	$\hat{C}_e = -0,01 \ln S_r + 0,03$	$\hat{C}_e = 0,09S_r^2 - 0,10S_r + 0,05$	$\hat{C}_e = 0,03S_r^{0,84}$
$\sigma_{y/x}$	0,0083 / 42	0,0089 / 45	0,0082 / 41	0,0093 / 47	0,0084 / 42
ρ	$\hat{C}_e = 0,12\rho - 0,20$	$\hat{C}_e = 0,00005e^{3,63\rho}$	$\hat{C}_e = 0,23 \ln \rho - 0,11$	$\hat{C}_e = 0,18\rho^2 - 0,57\rho + 0,46$	$\hat{C}_e = 0,0004\rho^{6,82}$
$\sigma_{y/x}$	0,0093 / 47	0,0061 / 31	0,0102 / 51	0,0055 / 28	0,0062 / 31

Таблица 3.5. Уравнения парной регрессии – угла внутреннего трения φ от физических свойств

Физиче- ское свой- ство	Прямолинейная	Криволинейная			
		Экспоненциальная	Логарифмическая	Параболическая	Степенная
Грунт,расположенный ниже депрессионной кривой					
W	$\hat{\varphi}_B = -28,41W + 27,48$	$\hat{\varphi}_B = 29,45e^{-1,50W}$	$\hat{\varphi}_B = -7,29 \ln W + 10,11$	$\hat{\varphi}_B = 60,29W^2 - 59,10W + 31,43$	$\hat{\varphi}_B = 11,84W^{-0,38}$
$\sigma_{y/x}^{17}$	1,28 / 6,8	1,31 / 6,9	1,32 / 7,0	1,27 / 6,7	1,36 / 7,2
W_l	$\hat{\varphi}_B = -29,81W_l + 31,08$	$\hat{\varphi}_B = 36,36e^{-1,64W_l}$	$\hat{\varphi}_B = -11,53 \ln W_l + 8,36$	$\hat{\varphi}_B = 5,91W_l^2 - 34,54W_l + 31,99$	$\hat{\varphi}_B = 10,43W_l^{-0,63}$
$\sigma_{y/x}$	1,40 / 7,4	1,43 / 7,6	1,41 / 7,5	1,40 / 7,4	1,47 / 7,8
W_p	$\hat{\varphi}_B = -31,26W_p + 27,67$	$\hat{\varphi}_B = 30,20e^{-1,70W_p}$	$\hat{\varphi}_B = -7,86 \ln W_p + 8,78$	$\hat{\varphi}_B = -100,55W_p^2 + 23,73W_p + 20,53$	$\hat{\varphi}_B = 10,86W_p^{-0,42}$
$\sigma_{y/x}$	1,09 / 5,8	1,12 / 5,9	1,11 / 5,9	1,06 / 5,6	1,14 / 6,0
I_p	$\hat{\varphi}_B = -3,56I_p + 20,38$	$\hat{\varphi}_B = 20,41e^{-0,19I_p}$	$\hat{\varphi}_B = -1,62 \ln I_p + 16,80$	$\hat{\varphi}_B = 17,88I_p^2 - 23,76I_p + 23,11$	$\hat{\varphi}_B = 16,85I_l^{-0,086}$
$\sigma_{y/x}$	1,79 / 9,5	1,79 / 9,5	1,46 / 7,7	1,24 / 6,5	1,46 / 7,7
I_l	$\hat{\varphi}_B = -3,87I_l + 20,68$	$\hat{\varphi}_B = 20,61e^{-0,23I_l}$	—	$\hat{\varphi}_B = -10,56I_l^2 + 2,62I_l + 21,34$	—
$\sigma_{y/x}$	2,01 / 10,6	2,18 / 11,5		1,67 / 8,8	
e	$\hat{\varphi}_B = -7,80e + 25,94$	$\hat{\varphi}_B = 26,76e^{-0,39e}$	$\hat{\varphi}_B = -5,84 \ln e + 18,26$	$\hat{\varphi}_B = 3,39e^2 - 13,10e + 27,91$	$\hat{\varphi}_B = 18,26e^{-0,28}$
$\sigma_{y/x}$	1,26 / 6,6	1,27 / 6,7	1,29 / 6,8	1,27 / 6,7	1,32 / 7,0
S_r	$\hat{\varphi}_B = -63,70S_r + 81,82$	$\hat{\varphi}_B = 229,91e^{-2,51S_r}$	$\hat{\varphi}_B = -61,05 \ln S_r + 18,11$	$\hat{\varphi}_B = 1641,6S_r^2 - 3151,5S_r + 1531,4$	$\hat{\varphi}_B = 18,61S_r^{-2,40}$
$\sigma_{y/x}$	2,11 / 11,1	1,85 / 9,7	2,10 / 11,1	1,37 / 7,2	1,83 / 9,7
ρ	$\hat{\varphi}_B = 10,85\rho - 1,46$	$\hat{\varphi}_B = 6,54e^{0,56\rho}$	$\hat{\varphi}_B = 21,36 \ln \rho + 5,46$	$\hat{\varphi}_B = -23,21\rho_l^2 + 102,02\rho - 90,69$	$\hat{\varphi}_B = 9,37\rho^{1,11}$
$\sigma_{y/x}$	1,84 / 9,7	1,88 / 9,9	1,82 / 9,6	1,67 / 8,8	1,86 / 9,8

¹⁷Средняя квадратическая погрешность $\sigma_{y/x}$ приведена в градусах; в числителе указаны значения $\sigma_{y/x}$, в знаменателе доля от среднего значения угла внутреннего трения по Кузбассу.

Продолжение таблицы 3.5

Физиче- ское свой- ство	Прямолинейная	Криволинейная			
		Экспоненциальная	Логарифмическая	Параболическая	Степенная
Грунт,расположенный выше депрессионной кривой					
W	$\hat{\varphi}_e = -11,87W + 25,02$	$\hat{\varphi}_e = 24,89e^{-0,51W}$	$\hat{\varphi}_e = -3,65 \ln W + 16,72$	$\hat{\varphi}_e = 221,6W^2 - 129,31W + 38,52$	$\hat{\varphi}_e = 17,45W^{-0,15}$
$\sigma_{y/x}$	1,60 / 8,0	1,51 / 7,6	1,42 / 7,1	0,93 / 4,7	1,33 / 6,7
W_l	$\hat{\varphi}_e = -5,6W_l + 23,22$	$\hat{\varphi}_e = 23,19e^{-0,26W_l}$	$\hat{\varphi}_e = -2,53 \ln W_l + 18,58$	$\hat{\varphi}_e = 188,72W_l^2 - 148,35W_l + 49,02$	$\hat{\varphi}_e = 18,71W_l^{-0,12}$
$\sigma_{y/x}$	1,32 / 6,6	1,31 / 6,6	1,31 / 6,6	1,37 / 6,9	1,29 / 6,5
W_p	$\hat{\varphi}_e = 2,29W_p + 20,61$	$\hat{\varphi}_e = 20,93e^{0,06W_p}$	$\hat{\varphi}_e = 0,27 \ln W_p + 21,58$	$\hat{\varphi}_e = 226,87W_p^2 - 114,11W_p + 34,84$	$\hat{\varphi}_e = 21,0W_p^{-0,003}$
$\sigma_{y/x}$	0,97 / 4,9	0,97 / 4,9	0,97 / 4,9	0,97 / 4,9	0,97 / 4,8
I_p	$\hat{\varphi}_e = -39,39I_p + 25,65$	$\hat{\varphi}_e = 27,10e^{-2,23I_p}$	$\hat{\varphi}_e = -5,13 \ln I_p + 9,83$	$\hat{\varphi}_e = 314,1I_p^2 - 124,64I_p + 30,98$	$\hat{\varphi}_e = 11,12I_p^{-0,28}$
$\sigma_{y/x}$	1,31 / 6,6	1,36 / 6,8	1,30 / 6,5	1,30 / 6,5	1,38 / 6,9
I_l	$\hat{\varphi}_e = -2,41I_l + 22,94$	$\hat{\varphi}_e = 22,66e^{-0,08I_l}$	—	$\hat{\varphi}_e = 7,34I_l^2 - 5,56I_l + 21,01$	—
$\sigma_{y/x}$	1,97 / 9,9	1,83 / 9,2		1,23 / 6,2	
e	$\hat{\varphi}_e = -1,26e + 22,43$	$\hat{\varphi}_e = 21,72e^{-0,03e}$	$\hat{\varphi}_e = -0,91 \ln e + 21,17$	$\hat{\varphi}_e = 5,67e^2 - 9,86e + 25,34$	$\hat{\varphi}_e = 21,14e^{-0,02}$
$\sigma_{y/x}$	1,81 / 9,1	1,79 / 9,0	1,79 / 9,0	1,70 / 8,5	1,79 / 9,0
S_r	$\hat{\varphi}_e = -4,52S_r + 25,11$	$\hat{\varphi}_e = 25,01e^{-0,19S_r}$	$\hat{\varphi}_e = -3,17 \ln S_r + 20,69$	$\hat{\varphi}_e = 10,06S_r^2 - 18,59S_r + 29,66$	$\hat{\varphi}_e = 20,74S_r^{-0,13}$
$\sigma_{y/x}$	0,96 / 4,8	1,05 / 5,3	1,04 / 5,2	1,04 / 5,2	1,04 / 5,2
ρ	$\hat{\varphi}_e = 1,14\rho + 18,93$	$\hat{\varphi}_e = 19,05e^{0,05\rho}$	$\hat{\varphi}_e = 2,05 \ln \rho + 19,80$	$\hat{\varphi}_e = 6,60\rho^2 - 23,46\rho + 41,66$	$\hat{\varphi}_e = 19,85\rho^{0,09}$
$\sigma_{y/x}$	1,51 / 7,6	1,51 / 7,6	1,51 / 7,6	1,46 / 7,3	1,51 / 7,6

Таблица 3.6. Оптимальные¹⁸ уравнения парной регрессии

Показатель		Вид связи	Уравнение	$\sigma_{y/x}$
Прочност- ные свой- ства	Физиче- ские свойства			
Грунт, расположенный ниже депрессионной кривой				
$\hat{\phi}_в$, градус	W , д. е.	Линейная	$\hat{\phi} = 27,48 - 28,41W$	1,280
		Параболическая	$\hat{\phi} = 60,29W_p^2 - 59,10W_p + 31,43$	1,270
	W_p , д. е.	Линейная	$\hat{\phi} = 27,67 - 31,26W_p$	1,090
		Параболическая	$\hat{\phi} = 100,55W_p^2 - 23,73W_p + 20,53$	1,060
$\hat{C}_в$, МПа	W , д. е.	Параболическая	$\hat{C} = 3,34W^2 - 2,17W + 0,37$	0,007
	ρ ,г/см ³	Параболическая	$\hat{C} = 0,99\rho^2 - 3,69\rho + 3,46$	0,005
Грунт, расположенный выше депрессионной кривой				
$\hat{\phi}_е$, градус	W , д.е.	Параболическая	$\hat{\phi} = 221,60W^2 - 129,31W + 38,52$	0,930
	W_p , д.е.	Линейная	$\hat{\phi} = 20,61 - 2,29W_p$	0,974
		Параболическая	$\hat{\phi} = 226,87W_p^2 + 114,11W_p + 34,84$	0,975
$\hat{C}_е$, МПа	e , д.е.	Экспоненциальная	$\hat{C} = 0,20e^{-2,6e}$	0,007
	W_p , д.е.	Параболическая	$\hat{C} = -2,09W_p^2 + 0,91W_p - 0,06$	0,007
	ρ , г/см ³	Экспоненциальная	$\hat{C} = 0,00005e^{3,63\rho}$	0,006
		Параболическая	$\hat{C} = 0,18\rho^2 - 0,57\rho + 0,46$	0,005
	W , д.е.	Параболическая	$\hat{C}_e = 0,37W^2 - 0,39W + 0,10$	0,002

3.3. Корреляционный анализ

Силу связи между результативным и факторным показателями, оцениваемую по значениям коэффициента корреляции r_{xy} (для прямолинейной связи) или корреляционного отношения η_{xy} (для криволинейной связи), вычисляли по формулам, приведенным в таблице 3.7.

Таблица 3.7. Показатели тесноты связи

Показатель	Расчетная формула	Переменные формул
Линейный коэффициент корреляции парной связи r_{xy} (прямолинейный тип связи)	$r_{xy} = \frac{\overline{x_i y_i} - \bar{y} \cdot \bar{x}}{\sigma_x \sigma_y}$	$y_i, \bar{y}, \hat{y}_i$ – соответственно эмпирическое, среднее и прогнозируемое значения результативного показателя; $\overline{x_i y_i}$ – усредненное значение произведений эмпирических результативного и факторного показателей; $\bar{x}$ – среднее значение факторного показателя; σ_y, σ_x – соответственно стандарт результативного и факторного показателей
Корреляционное отношение η_{xy} (криволинейный тип связи)	$\eta_{xy} = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}}$	

¹⁸По условию близости прогнозных значений эмпирическим.

В статистике принято считать связь тесной при $\eta_{xy} > 0,70$, средней – $0,50 < \eta_{xy} < 0,69$, умеренной – $0,30 < \eta_{xy} < 0,49$, слабой– $0,20 < \eta_{xy} < 0,29$, очень слабой– $0,19 < \eta_{xy}$ [107].

Надежность самих показателей тесноты связи характеризует их средняя квадратическая погрешность (таблица 3.8).

Таблица 3.8. Оценка надежности показателей тесноты связи

Показатель	Расчетная формула
Прямолинейная связь	
СКП коэффициента корреляции m_r	$m_r = \pm \frac{1 - r^2}{\sqrt{N}}$
Криволинейная связь	
СКП корреляционного отношения m_η	$m_\eta = \pm \frac{1 - \eta^2}{\sqrt{N}}$
Примечание: N – объем выборки.	

Достоверность связи оценивалась относительным показателем $\psi = \eta/m_\eta$. Согласно теореме Ляпунова. При ψ больше 2,58, с вероятностью 99 % считают, что полученное значение коэффициента корреляции отображает зависимость между показателями.

Результаты оценки тесноты и надежности связи прочностных свойств от физических для массива свойств техногенных грунтов приведены в таблице 3.9.

Анализ результатов расчета (таблица 3.9) показал следующее.

Прочностные характеристики (угол внутреннего трения φ и сцепление C) грунта ниже депрессионной кривой уменьшаются с увеличением его естественной влажности W (рисунки 3.2 и 3.3) и выражаются тесной параболической связью ($\eta_{xy} > 0,87$).

Сцепление C грунта выше депрессионной кривой зависит от четырех факторных показателей: коэффициента пористости e , влажности на границе раскатывания W_p , плотности ρ , естественной влажности W .

Таблица 3.9. Результаты оценки тесноты и надежности связи

Показатель		Вид связи	Теснота связи		СКП показателя связи	Ψ
Результатив- ный	Фактор- ный					
Грунт, расположенный ниже депрессионной кривой						
ϕ _в , градус	W, д.е.	Линейная	r _{xy}	0,81	—	—
		Параболическая ¹⁹	η _{xy}	0,87	0,01	86,0
	W _p , д.е.	Линейная	r _{xy}	0,92	—	—
		Параболическая	η _{xy}	0,88	—	—
Ĉ _в , МПа	W, д.е.	Параболическая	η _{xy}	0,94	0,01	89,0
	ρ, г/см ³	Параболическая		0,87	—	—
Грунт, расположенный выше депрессионной кривой						
ϕ _е , градус	W, д.е.	Параболическая	η _{xy}	0,91	0,02	41,5
	W _p , д.е.	Линейная	r _{xy}	0,31	—	—
		Параболическая	η _{xy}	0,34	—	—
Ĉ _е , МПа	e, д.е.	Экспоненциальная	η _{xy}	0,88	—	—
	W _p , д.е.	Параболическая		0,80	—	—
		ρ, д.е.		Экспоненциальная	0,98	—
	Параболическая			0,98	—	—
	W, д.е.	Параболическая		0,95	0,004	227,5

Зависимости от влажности на границе раскатывания W_p и коэффициента пористости не рассматривали, так как они характеризуются меньшим корреляционным отношением по сравнению с остальными.

Корреляционные отношения связи сцепления C грунта выше депрессионной кривой с плотностью ρ и естественной влажностью W имеют близкие значения, в свою очередь плотность тесно связана с влажностью. В этой связи в качестве факторного показателя приняли влажность и получили следующее: "Сцепление C грунта выше депрессионной кривой описывается убывающей параболической зависимостью ($\eta_{xy} = 0,91$) от естественной влажности W " (рисунок 3.4).

Угол внутреннего трения φ грунта ниже депрессионной кривой имеет тесную параболическую связь ($\eta_{xy} = 0,87$) с естественной влажностью W (рисунок 3.5).

¹⁹ Жирным шрифтом выделены связи, которые наиболее точно аппроксимируют зависимость результативного и факторного показателей.

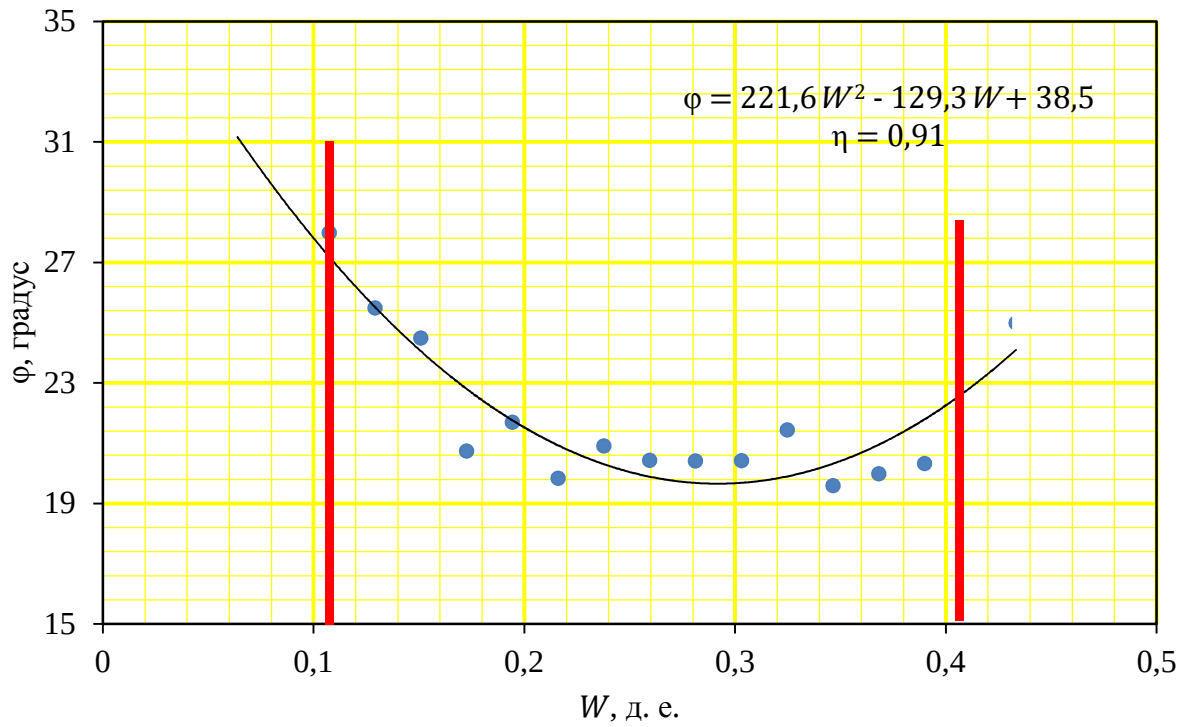


Рисунок 3.2. Параболическая зависимость угла внутреннего трения фгрунта от естественной влажности W грунта выше депрессионной кривой

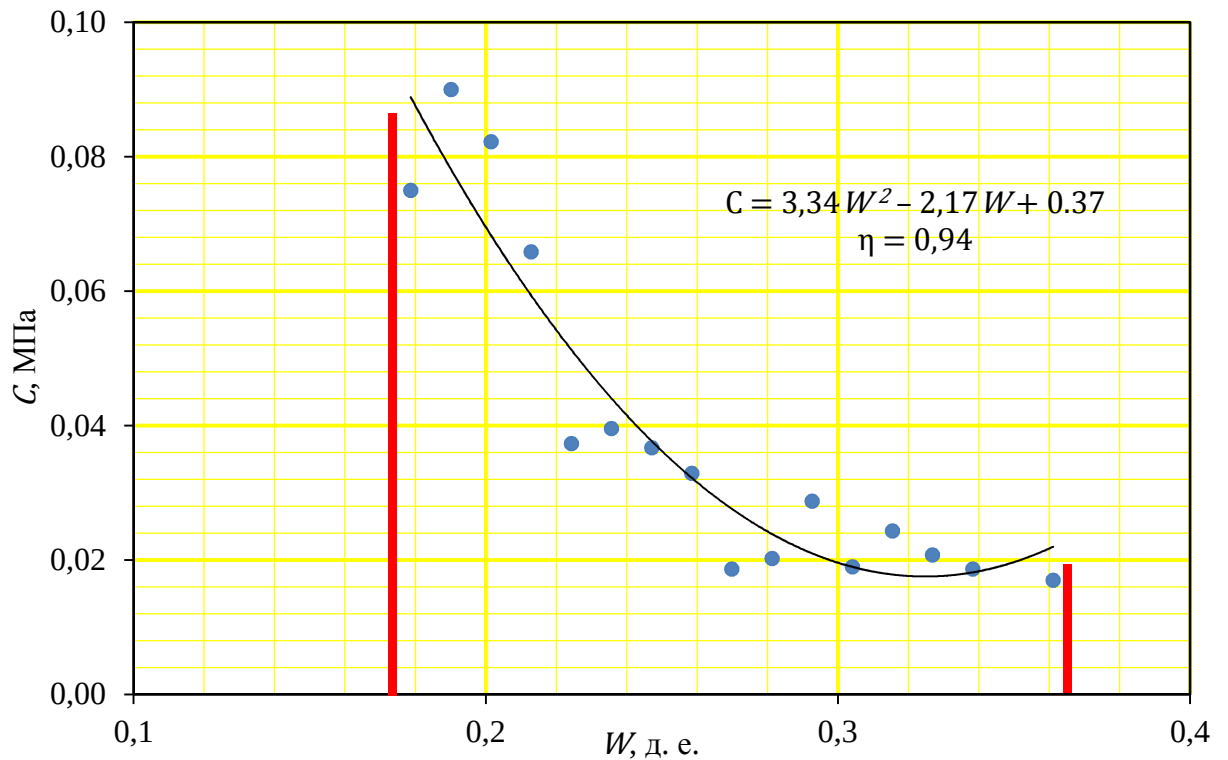


Рисунок 3.3. Параболическая зависимость сцепление грунта C от естественной влажности W грунта ниже депрессионной кривой

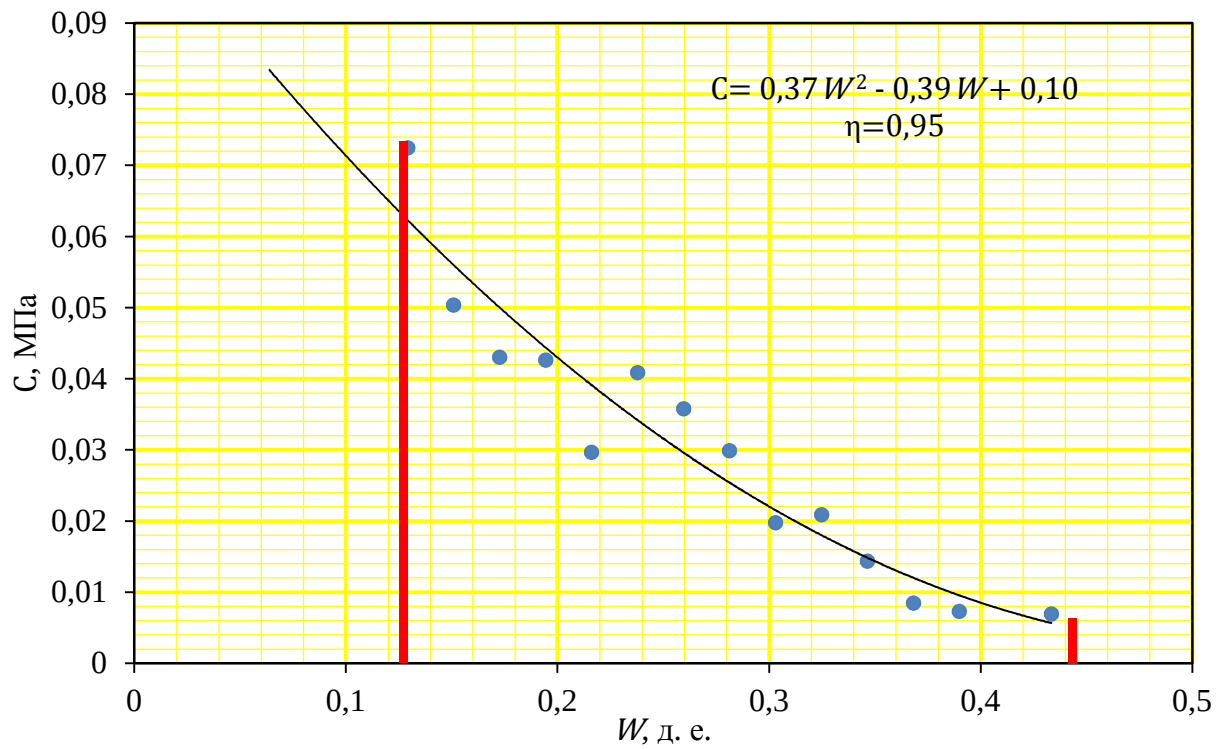


Рисунок 3.4. Параболическая зависимость сцепления грунта C от естественной влажности W грунта выше депрессионной кривой

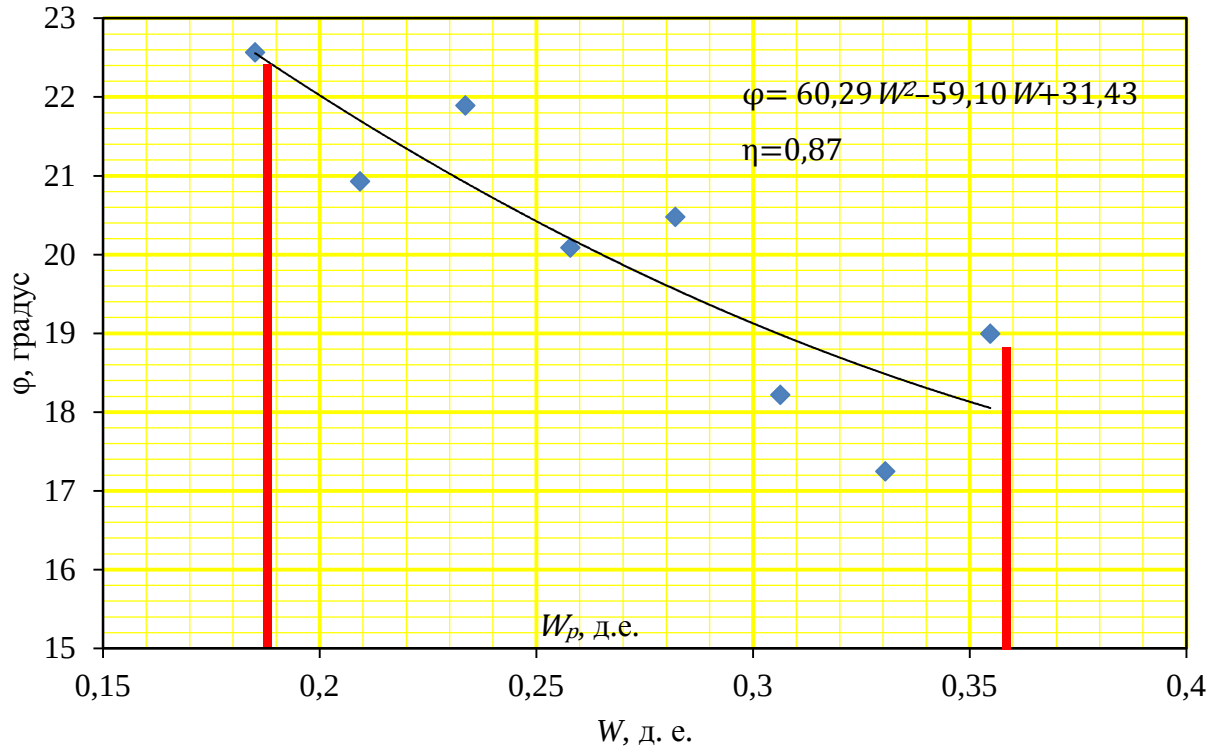


Рисунок 3.5. Параболическая зависимость угла внутреннего трения ϕ от естественной влажности W грунта ниже депрессионной кривой

Применение выбранных регрессионных уравнений для прогноза прочностных свойств грунта допускается после оценки значимости коэффициента детерминации R^2 , то есть определения доли, обусловленной вариацией факторного признака в общей дисперсии:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}, \quad (3.4)$$

по критерию Фишера:

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} (n - 2). \quad (3.4)$$

Отклонение прогнозных значений от эмпирических оценивали величиной средней погрешности аппроксимации $\bar{\varepsilon}$:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i}, \quad (3.5)$$

где $y_i, \hat{y}_i$ – соответственно эмпирическое и прогнозное значение признака; n – объем выборки.

Уравнения зависимости прочностных свойств от физических, имеющие максимальные значения показателей тесноты связи и минимальные значения погрешностей этих показателей (в таблице 3.9 выделены жирным шрифтом), подвергали проверке на их адекватность, результаты которой представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10. Оценка адекватности регрессионной модели

Свойства	Средняя погрешность аппроксимации $\bar{\varepsilon}$, %	Коэффициент детерминации R^2	Критерий Фишера	
			F_ϕ	$F_{кр}^{20}$
Грунт, расположенный ниже депрессионной кривой				
φ , градус	4	0,76	310	3,9
C , МПа	16	0,88	718	3,9
Грунт, расположенный выше депрессионной кривой				
φ , градус	6	0,82	674	4,0
C , МПа	15	0,90	1332	4,0

²⁰ Критическое значение Фишера определено для 5 % уровня значимости.

Анализ таблицы 3.10 показал, что эмпирические значения критерия Фишера превышают критические (для 5 % уровня значимости), поэтому считаем, что прочностные свойства достаточно полно описываются выбранным факторным показателем (естественная влажность W); средняя погрешность аппроксимации прочностных свойств (не превышает 20 %) сравнима с погрешностью, получаемой в лабораторных условиях.

Таким образом, на основании проведенных исследований получили уравнения прогноза прочностных свойств грунтов (таблица 3.11).

Таблица 3.11. Уравнения прогноза прочностных свойств грунтов

Результативный показатель	Уравнение прогноза
Грунт, расположенный ниже депрессионной кривой	
$\hat{\varphi}_в$, градус	$\hat{\varphi}_в = 60,29W^2 - 59,10W + 31,43$
$\hat{C}_в$, МПа	$\hat{C}_в = 3,34W^2 - 2,17W + 0,37$
Грунт, расположенный выше депрессионной кривой	
$\hat{\varphi}_е$, градус	$\hat{\varphi}_е = 221,60W^2 - 129,31W + 38,52$
$\hat{C}_е$, МПа	$\hat{C}_е = 0,37W^2 - 0,39W + 0,10$

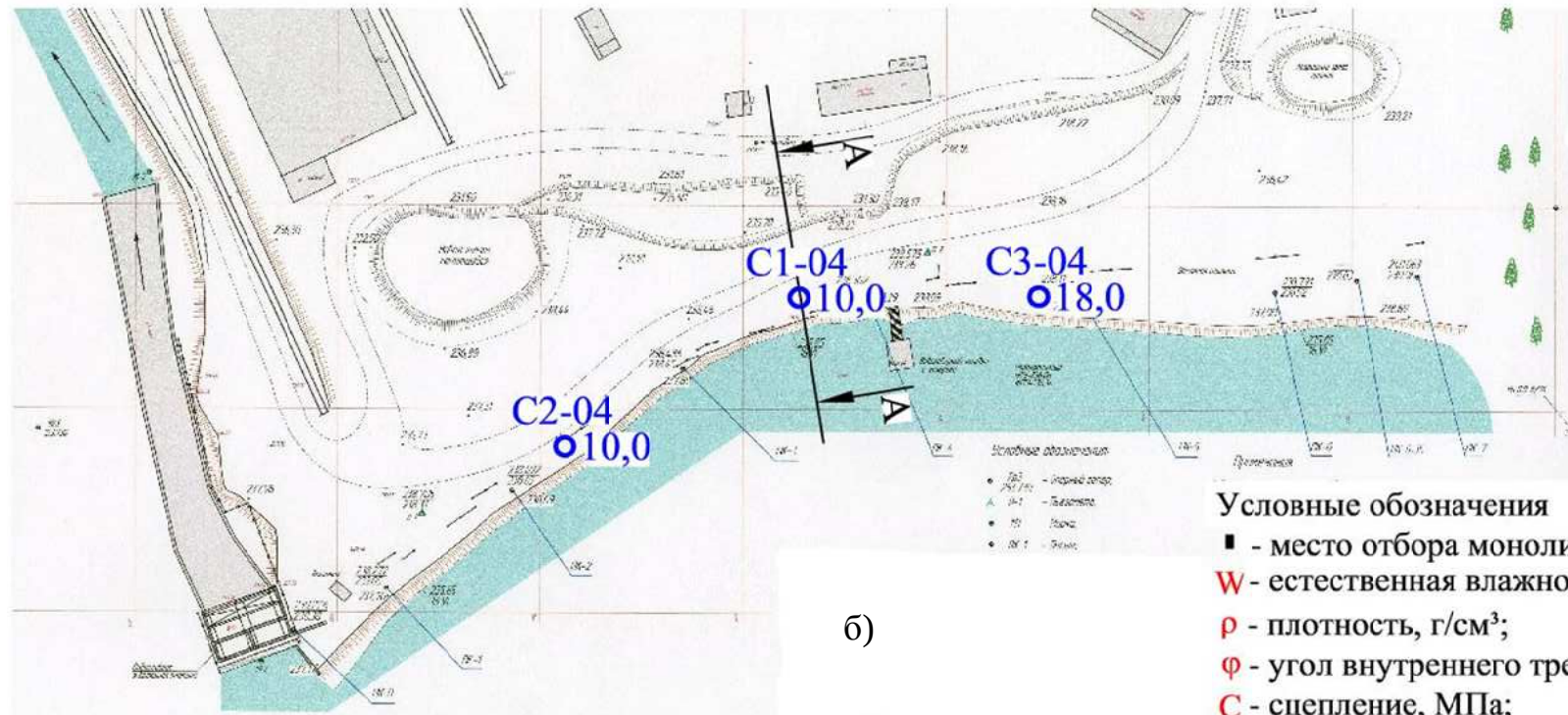
Уравнения прогноза, приведенные в таблице 3.11, проверили на их устойчивость. Для этого, по объектам, приведенным в таблице 2.1 (например, по объекту 13, представленному на рисунке 3.6), произвели выборку фактических средних значений прочностных и физических свойств грунта. По расчетным значениям физических характеристик x_i определили прогнозные значения прочностных $\hat{y}_i$ и их отклонение v от эмпирических значений y_i по формуле:

$$v = \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \cdot 100 \%. \quad (3.4)$$

Положительное значение отклонения v характеризует превышение эмпирического значения показателя относительно прогнозного, отрицательное – превышение прогнозного значения относительно эмпирического.

Анализ оценки устойчивости уравнений прогноза, результаты которой приведены в таблице 3.12, показал следующее:

а)



б)

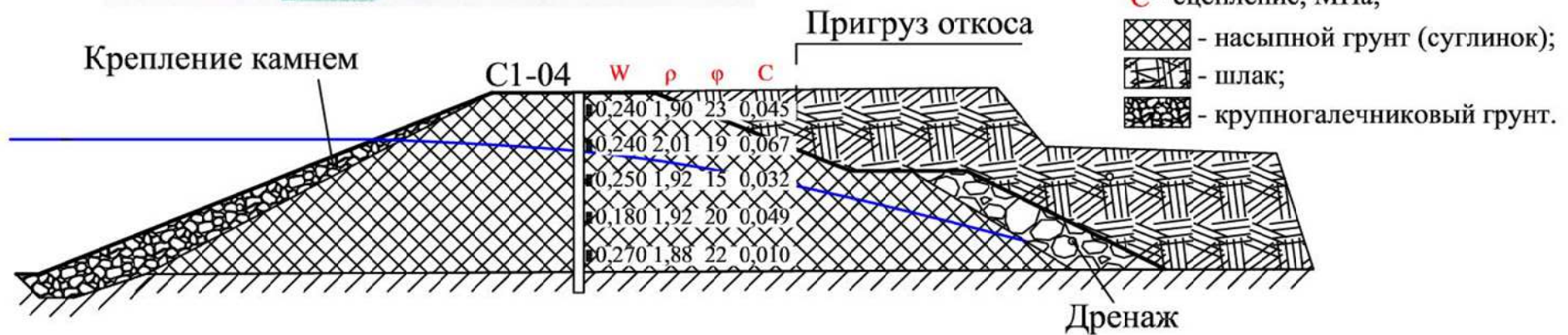


Рисунок 3.6. План (а) и поперечный разрез (б) грунтовой дамбы объекта 13

Таблица 3.12. Расчет устойчивости уравнений прогноза прочностных характеристик грунта

Шифр объекта	Грунт, расположенный ниже депрессионной кривой								Грунт, расположенный выше депрессионной кривой							
	Ф, градус	W _p , д.е.	Φ _в , градус	v, %	C, МПа	W, д.е.	Ĉ _в , МПа	v, %	Ф, градус	W, д.е.	Φ _е , градус	v, %	C, МПа	W, д.е.	Ĉ _е , МПа	v, %
1	21,8	0,227	20,6	5,6	0,031	0,263	0,030	2,2	23,5	0,214	21,0	10,7	0,028	0,261	0,029	-4,7
2	22,2	0,247	19,9	10,1	0,021	0,284	0,023	-10,1	24,5	0,218	20,9	14,9	0,026	0,268	0,028	-7,4
3	20,0	0,214	21,0	-4,9	0,03	0,261	0,031	-3,8	19,0	0,229	20,5	-8,0	0,024	0,275	0,027	-10,7
4	19,0	0,228	20,5	-8,1	0,015	0,286	0,023	-50,5²¹	21,0	0,248	20,1	4,4	0,012	0,281	0,025	-112,0
5	—				—				20,8	0,319	19,8	4,7	0,027	0,271	0,027	-1,3
6									23,0	0,131	25,4	-10,4	0,023	0,268	0,028	-21,4
7	24,6	0,222	20,7	15,7	0,030	0,261	0,031	-3,8	21,6	0,258	19,9	7,8	0,034	0,25	0,032	7,1
8	22,3	0,212	21,0	5,4	0,022	0,275	0,026	-17,4	—				—			
9	20,5	0,229	20,5	-0,1	0,036	0,261	0,031	13,5	21,0	0,268	19,8	5,8	0,035	0,241	0,033	4,3
10	18,2	0,237	20,3	-11,3	0,068	0,200	0,070	-2,4	—				—			
11	19,6	0,24	20,2	-2,9	0,040	0,230	0,048	-19,0	19,8	0,240	20,2	-2,3	0,039	0,245	0,033	16,3
12	22,0	0,231	20,4	7,1	0,030	0,258	0,032	-8,2	21,3	0,230	20,5	3,7	0,068	0,249	0,032	53,3
13	20,7	0,223	20,7	0,0	0,029	0,255	0,034	-16,7	21,0	0,182	22,3	-6,3	0,034	0,257	0,030	11,4
14	—				—				20,1	0,227	20,6	-2,4	0,037	0,243	0,033	10,7
15	22,2	0,205	21,3	4,2	0,038	0,240	0,042	-9,4	30,5	0,115	26,6	12,9	0,040	0,238	0,034	14,6
16	—				—				20,6	0,219	20,8	-1,1	0,037	0,234	0,031	16,6
17	17,6	0,231	20,4	-16,2	0,021	0,286	0,023	-7,5	17,3	0,241	20,2	-16,9	0,026	0,286	0,025	5,7

²¹ Жирным курсивом выделены отклонения, превышающие 30 %.

– уравнения угла внутреннего трения для грунта выше и ниже депрессионной кривой пригодны для использования, так как отклонение ν для рассматриваемых выборок носит случайный характер и находится в диапазоне $\pm 16,3 \%$, а его среднее значение для грунта ниже ($\bar{\nu}_{\phi_{\text{в}}} = 0,4 \%$) и выше ($\bar{\nu}_{\phi_{\text{е}}} = 1,2 \%$) депрессионной кривой стремится к нулю;

– погрешность прогнозирования сцепления находится в пределах $\pm 20 \%$, средние значения для грунта ниже депрессионной кривой составляют $\bar{\nu}_{\text{св}} = -5,8 \%$, выше – $\bar{\nu}_{\text{св}} = 4,2 \%$.

Процедура прогноза прочностных свойств грунта по материалам инженерно-геологических изысканий приведена на рисунке 3.7.

3.4. Выводы по главе 3

1. Установление надежной корреляционной связи прочностных (сцепление C , угол внутреннего трения ϕ) характеристик от физических (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) для массива техногенных грунтов обеспечивается разбивкой вариационного ряда на интервалы и последующим анализом средних значений прочностных свойств и середины интервалов физических.

2. Отыскание регрессионного уравнения, характеризуемого минимальной средней квадратической погрешностью и наиболее адекватно описывающего зависимость между физическими и прочностными характеристиками грунтов, основано на минимизации суммы квадратов отклонений S эмпирических y_i от прогнозируемых значений $\hat{y}_i$ прочностных свойств.

3. Прочностные характеристики (угол внутреннего трения ϕ и сцепление C) грунта ниже депрессионной кривой уменьшаются с увеличением его естественной влажности W (при $W = 0,20 - 0,30$) и выражаются тесной параболической зависимостью ($\eta_{xy} > 0,87$).

Установленные корреляционные связи прочностных и физических характеристик техногенных грунтов, применяемых для строительства дамб, позволяют перейти к разработке алгоритма аналитического метода прогноза устойчивости дамб с учетом пространственной изменчивости свойств грунтов.

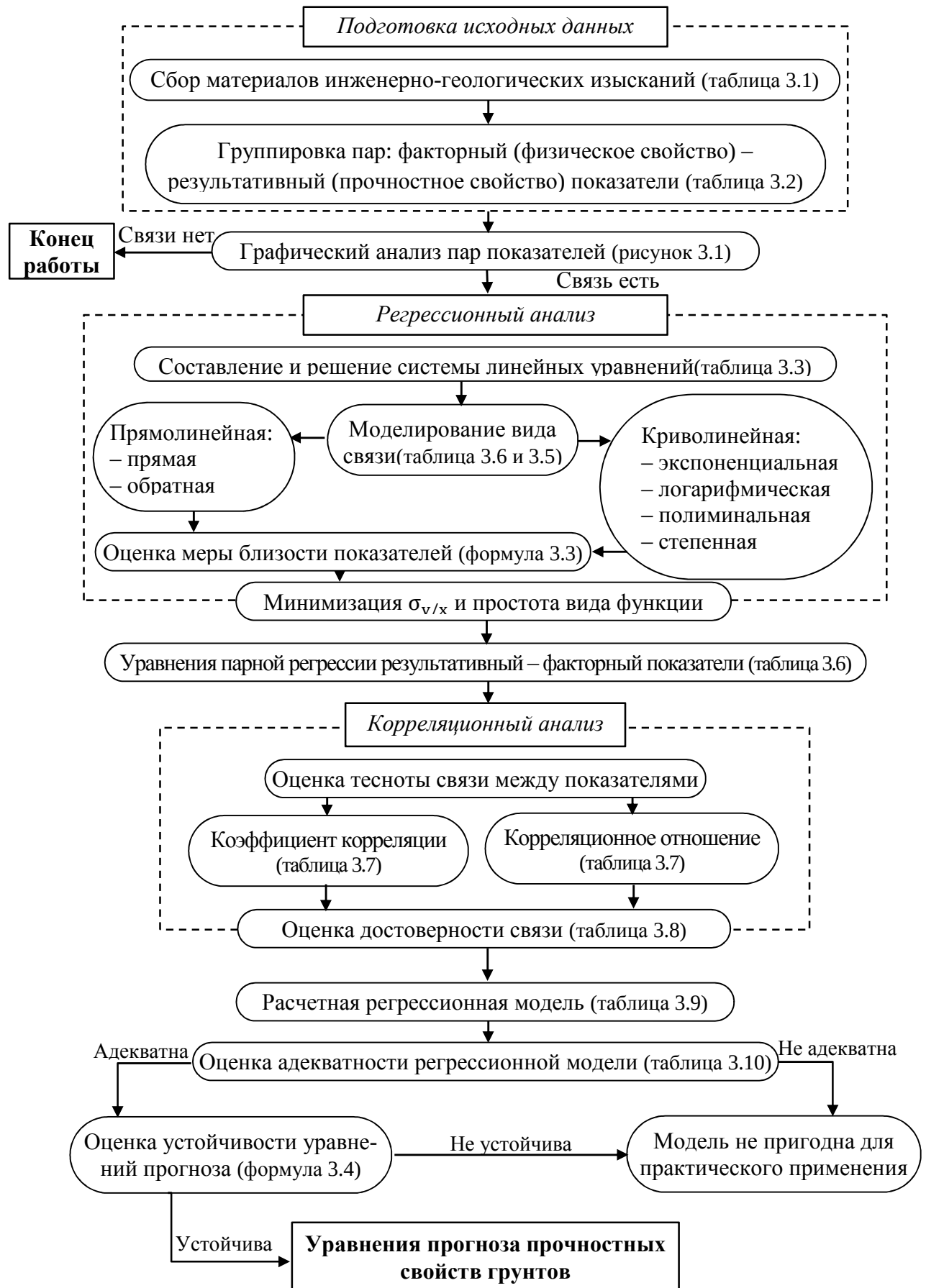


Рисунок 3.8. Алгоритм прогноза прочностных характеристик грунта

4. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА ПРОГНОЗА УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВОЙ ДАМБЫ

В практике проектирования ограждающих сооружений выбор их профиля, обеспечивающего устойчивое положение, определяется методом итераций, путем построения множества вариантов контура проектируемой дамбы. Для каждого варианта производится расчет устойчивости откосов. В результате выбирается контур дамбы, величина коэффициента устойчивости которого удовлетворяет нормативным значениям.

Проведение поверочного расчета "вручную" приводит к значительным временным и трудовым затратам. Известные программы [96–101] по расчету устойчивости откосных сооружений имеют ряд недостатков. В программах предусмотрено моделирование сооружения в графическом редакторе, потом – расчет устойчивости откосов. В случае изменения параметров сооружения возникает необходимость в изменении всей модели. Кроме того, программы рассчитаны на решение комплекса задач для горного производства и требуют специального обучения численному моделированию инженерно-геологических и гидрогеологических условий сооружения.

Известно, что коэффициент устойчивости связан с геометрическими параметрами и физико-механическими свойствами грунта [110]. Следовательно, можно предположить, что существует некая корреляционная связь параметров дамбы от физико-механических характеристик грунта, использование которой позволит оперативно устанавливать ее расчетный контур.

4.1. Установление зависимости коэффициента устойчивости от изменчивости характеристик грунтов

В работах [104] обосновано, что наиболее существенное влияние на коэффициент устойчивости (результативный показатель) оказывают физико-механические свойства грунтов (факторный показатель).

Оценка значимости отдельных (сцепление C , угол внутреннего трения φ , плотность ρ) свойств выполнена автором на графической модели. Параметры модели: дамба на горизонтальном прочном основании высотой 5, 10, 15 и 20 м; коэффициент заложения верхового и низового откосов $m = 2$; ширина по гребню 5 м. Для исследо-

вания принимались средние значения пары свойств (таблица 2.18) и i -е значение третьего свойства. Например, принимали средние значения плотности ($1,95 \text{ г/см}^3$) и угла внутреннего трения (21 градус) и для каждого i -го значения третьего свойства – сцепления (таблица 4.1, колонка 1), вычисляли коэффициенты устойчивости $k_{i(c)}$ (таблица 4.1, колонка 4). Затем последовательно вычисляли коэффициенты устойчивости²² при изменении от минимального до максимального значений углов внутреннего трения – $k_{i(\varphi)}$ (таблица 4.1, колонка 5) и плотности – $k_{i(\rho)}$ (таблица 4.1, колонка 6).

Таблица 4.1. Матрица значений коэффициентов устойчивости для всего диапазона изменчивости свойств грунтов

Свойства грунтов			Коэффициент устойчивости для <i>i</i> -го значения		
<i>C</i> , МПа	φ, градус	ρ, г/см ³	сцепления	угла внутреннего трения	плотности
средние по Кузбассу					
0,024	21	1,95			
по материалам изысканий			<i>k_{i(C)}</i>	<i>k_{i(φ)}</i>	<i>k_{i(ρ)}</i>
1	2	3	4	5	6
0,004	7	1,64	1,33	2,78	3,95
....					
0,154	35	2,23	16,01	4,28	3,17

Корреляционные модели линейной связи коэффициента устойчивости от характеристик грунтов изображены на рисунке 4.1.

Анализом полученных моделей установлено, что для условий Кузбасса устойчивость дамб высотой до 10 м обеспечивается при минимальном значении сцепления грунтов и средних значениях угла внутреннего трения и плотности грунтов. Для более высоких дамб при среднем значении сцепления грунтов для всего диапазона изменчивости плотности и угла внутреннего трения изменение коэффициента устойчивости составляет соответственно 10 и 30 %, его расчетное значение превышает 1,5 при нормативном 1,2. Вместе с тем при средних значениях плотности, угла внутреннего трения и сцеплении менее 0,03 МПа коэффициент устойчивости становится менее нормативной величины, а при минимальном сцеплении $C = 0,004 \text{ МПа}$ дости-

²² Расчет коэффициента устойчивости произведен в программе для ЭВМ "Устойчивая насыпь", алгоритм работы которой представлен в параграфах 4.3 – 4.5.

гает критического значения 1,0, что указывает на большую вероятность формирования оползня откоса. При вариации сцепления от минимального до максимального значения диапазон изменения коэффициента устойчивости близок к 70 %.

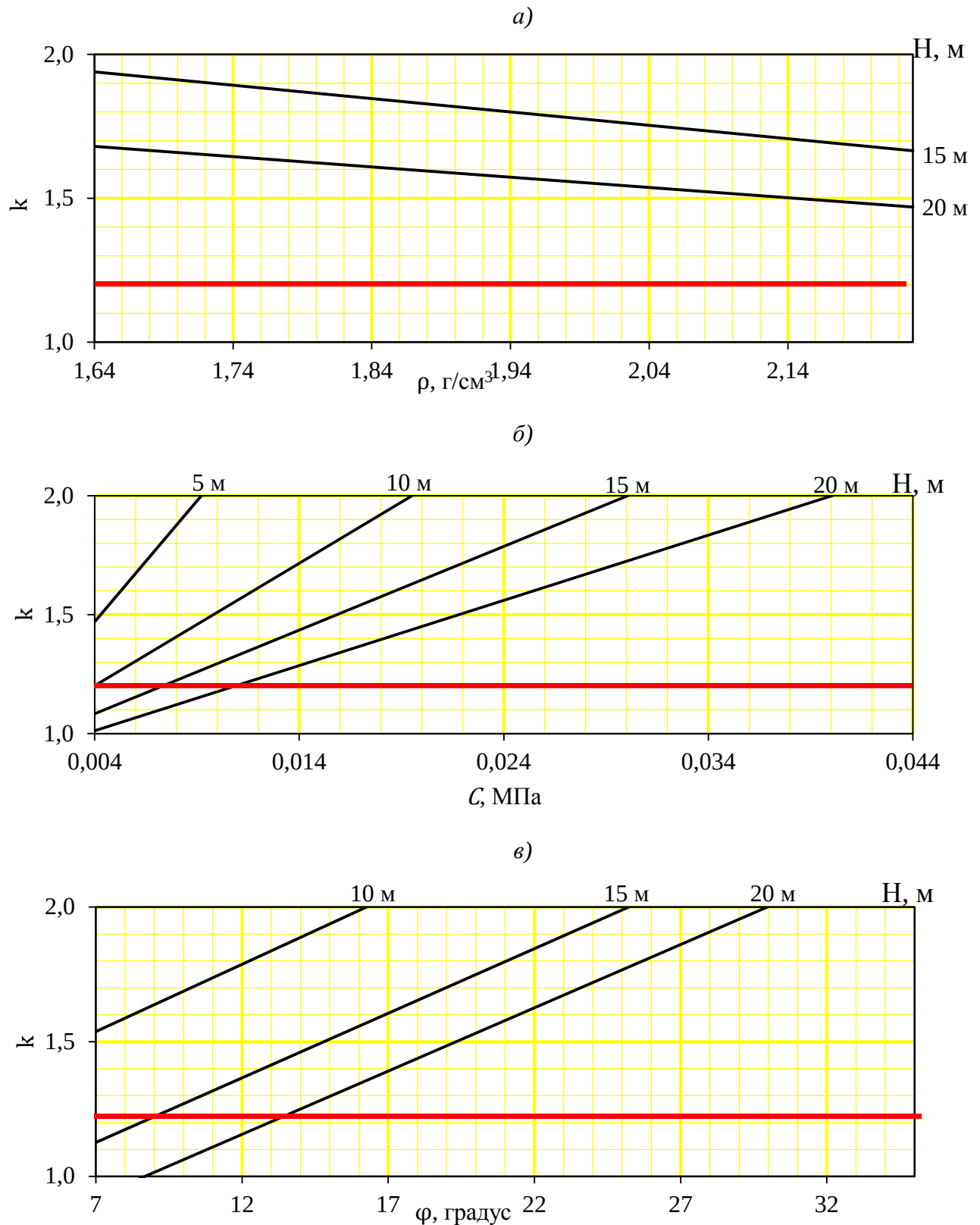


Рисунок 4.1. Зависимость коэффициента устойчивости от физико-механических характеристик грунта: плотности (а), сцепления (б) и угла внутреннего трения (в)

Параметры уравнений парной линейной регрессии и результаты оценки тесноты связи приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Параметры связи коэффициента устойчивости от физико-механических характеристик грунтов

Высота дамбы, м			C, МПа			φ, градус			ρ, г/см ³		
5			$k_C = 101,676C + 1,063$			$k_\varphi = 0,053\varphi + 2,383$			$k_\rho = -1,291\rho + 6,033$		
r	m_r	ψ	0,90	0,01	90	0,87	0,01	87	0,85	0,01	85
10			$k_C = 51,499C + 0,995$			$k_\varphi = 0,050\varphi + 1,187$			$k_\rho = -0,674\rho + 3,551$		
r	m_r	ψ	0,89	0,02	44	0,86	0,03	28	0,91	0,04	22
15			$k_C = 35,196C + 0,942$			$k_\varphi = 0,048\varphi + 0,789$			$k_\rho = -0,465\rho + 2,702$		
r	m_r	ψ	0,87	0,01	87	0,84	0,02	42	0,83	0,02	41
20			$k_C = 27,421C + 0,902$			$k_\varphi = 0,047\varphi + 0,592$			$k_\rho = -0,357\rho + 2,266$		
r	m_r	ψ	0,91	0,03	30	0,85	0,01	85	0,92	0,01	92

Исходя из наличия тесной парной связи между коэффициентом устойчивости и отдельными характеристиками грунта, уместно предположить, что также существует зависимость от совокупности характеристик грунта.

Общий вид уравнения множественной регрессии $k(\varphi, \rho, C)$ выражается формулой

$$k(\varphi, \rho, C) = A_0 + A_1\varphi_i + A_2\rho_i + A_3C_i, \quad (4.1)$$

где A_0, A_1, A_2, A_3 – коэффициенты уравнения множественной регрессии.

Минимизируя сумму квадратов отклонений прогнозных значений от эмпирических функции (4.3), получим систему линейных уравнений

$$\begin{cases} \sum k = NA_0 + A_1 \sum \varphi_i + A_2 \sum \rho_i + A_3 \sum C_i \\ \sum \varphi_i k = A_0 \sum \varphi_i + A_1 \sum \varphi_i^2 + A_2 \sum \varphi_i \rho_i + A_3 \sum \varphi_i C_i \\ \sum \rho_i k = A_0 \sum \rho_i + A_1 \sum \rho_i \varphi_i + A_2 \sum \rho_i^2 + A_3 \sum \rho_i C_i \\ \sum C_i k = A_0 \sum C_i + A_1 \sum C_i \varphi_i + A_2 \sum C_i \rho_i + A_3 \sum C_i^2 \end{cases}. \quad (4.2)$$

Вычислив коэффициенты системы уравнений (4.2), приходим к уравнению множественной регрессии коэффициента устойчивости от совокупности физико-механических свойств грунтов дамб высотой от 5 м до 10 м и заложением откоса от 1:1,0 до 1:3,0 (таблица 4.3).

Таблица 4.3. Уравнение множественной регрессии коэффициента устойчивости от совокупности характеристик грунта

Высота дамбы, м	Уравнение	R	Критерий Фи- шера	
			F _{кр}	F _ф
Заложение откоса – 1:1,0				
5	$k(\varphi, \rho, C) = 70,336C_i + 0,029\varphi_i - 2,748\rho_i + 5,059$	0,91	2,94	988
10	$k(\varphi, \rho, C) = 35,863C_i + 0,028\varphi_i - 1,290\rho_i + 2,366$	0,92		986
15	$k(\varphi, \rho, C) = 24,350C_i + 0,029\varphi_i - 0,891\rho_i + 1,612$	0,91		694
20	$k(\varphi, \rho, C) = 20,596C_i + 0,030\varphi_i - 0,998\rho_i + 1,684$	0,96		189
Заложение откоса – 1:1,5				
5	$k(\varphi, \rho, C) = 87,361C_i + 0,037\varphi_i - 3,440\rho_i + 6,342$	0,89	3,00	982
10	$k(\varphi, \rho, C) = 44,456C_i + 0,038\varphi_i - 1,684\rho_i + 3,057$	0,92		1153
15	$k(\varphi, \rho, C) = 30,216C_i + 0,037\varphi_i - 1,120\rho_i + 2,007$	0,87		1290
20	$k(\varphi, \rho, C) = 23,317C_i + 0,036\varphi_i - 0,875\rho_i + 1,547$	0,88		1354
Заложение откоса – 1:2,0				
5	$k(\varphi, \rho, C) = 101,625C_i + 0,053\varphi_i - 1,294\rho_i + 2,473$	0,89	2,80	5231
10	$k(\varphi, \rho, C) = 51,445C_i + 0,050\varphi_i - 0,647\rho_i + 1,264$	0,85		5010
15	$k(\varphi, \rho, C) = 35,094C_i + 0,048\varphi_i - 0,464\rho_i + 0,847$	0,81		2013
20	$k(\varphi, \rho, C) = 27,293C_i + 0,047\varphi_i - 0,356\rho_i + 0,624$	0,85		4225
Заложение откоса – 1:2,5				
5	$k(\varphi, \rho, C) = 127,521C_i + 0,056\varphi_i - 5,011\rho_i + 9,209$	0,85	3,45	986
10	$k(\varphi, \rho, C) = 62,282C_i + 0,073\varphi_i - 2,513\rho_i + 4,428$	0,87		625
15	$k(\varphi, \rho, C) = 44,490C_i + 0,057\varphi_i - 1,718\rho_i + 3,065$	0,90		1196
20	$k(\varphi, \rho, C) = 34,583C_i + 0,056\varphi_i - 1,340\rho_i + 2,359$	0,95		1251
Заложение откоса – 1:3,0				
5	$k(\varphi, \rho, C) = 158,480C_i + 0,068\varphi_i - 6,866\rho_i + 12,40$	0,85	3,10	525
10	$k(\varphi, \rho, C) = 80,600C_i + 0,071\varphi_i - 3,437\rho_i + 6,122$	0,81		586
15	$k(\varphi, \rho, C) = 55,961C_i + 0,069\varphi_i - 2,403\rho_i + 4,224$	0,83		605
20	$k(\varphi, \rho, C) = 42,271C_i + 0,068\varphi_i - 1,650\rho_i + 2,903$	0,83		1219

Полученные уравнения корреляционной связи коэффициента устойчивости позволяют на этапе проектирования оперативно оценить устойчивость дамбы заданного контура, либо управлять характеристиками грунта, подбирая значения, при которых устойчивость сооружения будет обеспечиваться.

4.2. Аппроксимация геометрических параметров дамбы прочностными характеристиками грунтов

Геометрические параметры дамб должны обеспечивать ее устойчивость, характеризующую коэффициентом устойчивости, являющимся критерием безопасности для этого сооружения и зависящим от физико-механических характеристик грунта.

Выдвинем гипотезу о связи геометрических параметров (высота h , угол откоса β) сооружения и физико-механических характеристик (сцепление C , угол внутреннего трения φ) грунта.

Высота h откосного сооружения, как правило, известна или ее можно установить исходя из условий эксплуатации дамбы. Угол откоса β (результативный показатель) подбирается до выполнения условия обеспечения устойчивого положения дамбы.

Плотность грунтов не оказывает значимого влияния на коэффициент устойчивости, поэтому при моделировании ее принимали равной среднему значению (таблица 2.18) и при различных сочетаниях прочностных характеристик грунта (факторный показатель: угол внутреннего трения, сцепление) определяли значение угла откоса, обеспечивающего устойчивость сооружения.

Промоделируем грунтовую дамбу (высота 5, 10, 15 и 20 м; ширина гребня – 15 м; плотность грунтов $\rho = 1,95 \text{ г/см}^3$). Задавая значения сцепления и угла внутреннего трения в интервале их реальных значений, подбираем угол откоса, при котором коэффициент устойчивости для пары прочностных свойств приблизится к единице. Результаты моделирования сведем в таблицу 4.4.

Таблица 4.4. Углы откоса и значения прочностных свойств грунтов для дамбы высотой 15 метров

Угол откоса β , градус	Сцепление C , т/м ²	Угол внутреннего трения φ , градус	Угол откоса β , градус	Сцепление C , т/м ²	Угол внутреннего трения φ , градус
20	0,5	10	25	1,5	4
25	0,5	16	30	1,5	8
...					
45	1,0	25	45	2,5	6
20	1,5	1	45	3,0	1

Полученный массив результативного (угол откоса β) и факторных (сцепление C и угол внутреннего трения φ) показателей обработаем методом корреляции и запишем в общем виде уравнение множественной регрессии

$$\beta(C_i; \varphi_i) = A_0 + A_1 C_i + A_2 \varphi_i. \quad (4.3)$$

Минимизируя сумму квадратов отклонений прогнозных значений от эмпирических функции (4.3), получим систему линейных уравнений

$$\begin{cases} \sum \beta_i = N A_0 + A_1 \sum C_i + A_2 \sum \varphi_i \\ \sum \varphi_i \beta_i = A_0 \sum \varphi_i + A_1 \sum \varphi_i C_i + A_2 \sum \varphi_i^2 \\ \sum C_i \beta_i = A_0 \sum C_i + A_1 \sum C_i^2 + A_2 \sum C_i \varphi_i \end{cases} \quad (4.4)$$

Вычислив коэффициенты системы уравнений (4.4), приходим к уравнениям множественной регрессии для анализируемых условий (таблица 4.5).

Таблица 4.5. Уравнение угла откоса грунтовых дамб различной высоты

Высота дамбы, м	Уравнение	R	Критерий Фишера	
			$F_{кр}$	F_{ϕ}
5	$\beta(C_i; \varphi_i) = 3553,758C_i + 1,343\varphi_i - 6,457$	0,91	3,7	644
10	$\beta(C_i; \varphi_i) = 1882,464C_i + 1,356\varphi_i - 7,869$	0,85		1385
15	$\beta(C_i; \varphi_i) = 1234,000C_i + 1,347\varphi_i - 7,510$	0,84		2064
20	$\beta(C_i; \varphi_i) = 947,002C_i + 1,361\varphi_i - 8,197$	0,80		2410

Результаты моделирования, выраженные уравнениями (таблица 4.5), можно представить также в виде номограмм (рисунок 4.2).

Следует отметить, что, используя уравнения связи, возможно получить величины угла откоса, применение которых нецелесообразно (более 40 градусов). В этой связи произведем ограничение диапазона изменения угла откоса наиболее часто встречающимися на практике значениями: от 20 до 40 градусов.

Таким образом, по уравнениям множественной регрессии (таблица 4.5) можно установить расчетный профиль дамбы по прочностным (сцепление C , угол внутреннего трения φ) характеристикам грунта.

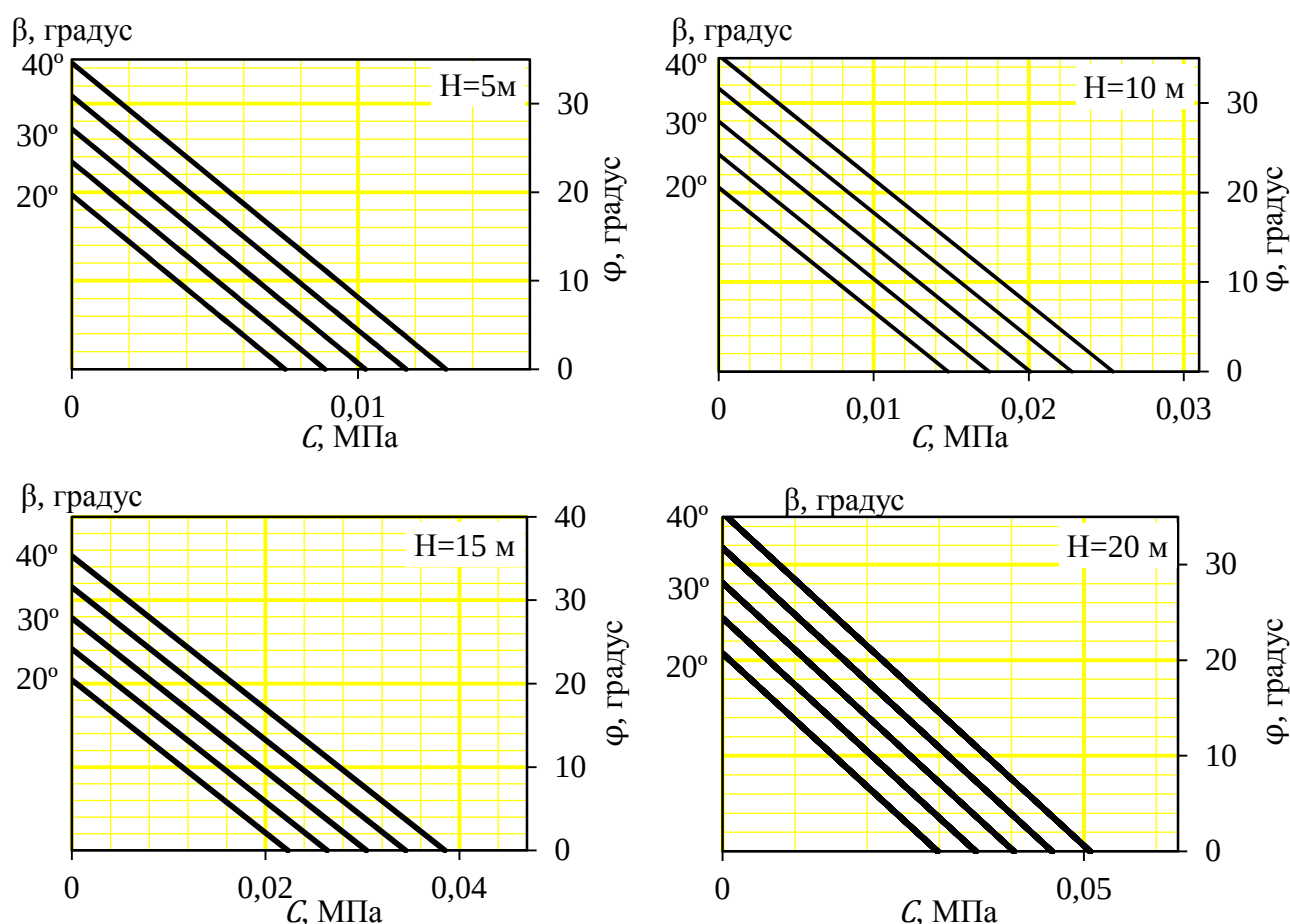


Рисунок 4.2. Номограммы определения угла откоса для дамб различной высоты

Уравнения (таблицы 4.3 и 4.5) представляют собой аналитический метод определения геометрических параметров дамбы. Поэтому для проверки результатов, полученных косвенным путем, необходимо выполнять поверочный расчет.

Одним из критериев безопасности грунтовой дамбы является обеспечение ее устойчивости, характеризуемой величиной коэффициента устойчивости (минимальное отношение обобщенных предельных реактивных сил сопротивления к активным сдвигающим силам). Суммирование сил производится, как правило, двумя расчетными методами: алгебраического сложения по круглоцилиндрической или плавной криволинейной поверхности скольжения, либо векторного сложения (многоугольника) сил.

В зависимости от угла наклона и типа грунтов выделяют следующие виды оснований дамб: *горизонтальное прочное* – представлено скальными, полускальными и песчано-гравелистыми грунтами, не имеющими четко выраженной слоистости, слабых контактов и слабых прослоек; *горизонтальное слабое* – сложено природными либо

техногенными глинистыми грунтами; *наклонное слоистое* – сложено грунтами, имеющими выраженную слоистость, слабые контакты или прослойки слабых грунтов.

Автором разработан алгоритм аналитического расчета сил, действующих на откос, который реализован в программе "Устойчивая насыпь" [111]. Сущность этого алгоритма заключается в следующем.

Основными параметрами для оценки устойчивости грунтовой дамбы являются: поверхность откосов, линия контакта с основанием, гребень, поверхность скольжения. В графическом виде указанные параметры в основном представляют собой прямые, реже кривые линии, находящиеся в одной плоскости. Для моделирования отдельных элементов дамбы воспользуемся прямоугольной (декартовой) системой координат. За начало условной системы координат примем нижнюю бровку низового откоса – точка 1 ($x_1=0, y_1=0$), ось абсцисс – совпадающей с линией горизонта (для горизонтального основания – линия контакта дамбы с основанием), тогда ось ординат будет отражать высотные отметки дамбы.

4.3. Моделирование напряженного состояния грунтовых дамб

4.3.1. Дамба на горизонтальном прочном основании

Модель насыпного сооружения изобразим в виде профиля (рисунок 4.3). Описание элементов дамбы, расположенной на горизонтальном прочном основании, представим уравнениями (таблица 4.6), которые выразим через параметры дамбы (высота, ширина гребня, коэффициенты заложения откоса, угол наклона основания).

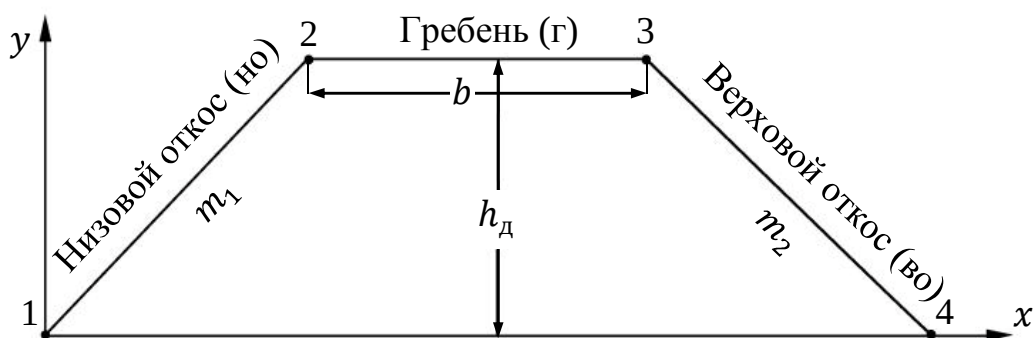


Рисунок 4.3. Профиль дамбы на горизонтальном прочном основании

Таблица 4.6. Уравнения элементов дамбы на горизонтальном прочном основании

Элемент	Уравнение	Переменные формул
Низовой откос	$y_i^{\text{но}} = \frac{x_i}{m_1}$	m_1, m_2 – коэффициенты заложения соответственно низового и верхового откосов; h_d – высота насыпного сооружения, м; b – ширина гребня, м; α – угол наклона основания, градус.
Гребень	$y_i^{\text{г}} = h_d$	
Верховой откос	$y_i^{\text{во}} = -\frac{x_i}{m_1} + \frac{m_2 h_d + b}{m_1} + h_d$	
Основание	$y_i = x_i \operatorname{tg} \alpha$	

Ограничим бесконечно протяженные линии на плоскости, выражаемые уравнениями элементов дамбы, характерными точками: нижние (1, 4) и верхние (2, 3) бровки низового и верхового откосов. Вычислим координаты характерных точек (2, 3, 4) относительно начала условной системы координат (точка 1) и построим профиль сооружения (рисунок 4.3).

Построение поверхности скольжения начнем с выбора ширины призмы возможного обрушения a , которая не имеет четкой зависимости от геометрических параметров или физико-механических свойств грунтов. Поэтому наиболее напряженную поверхность скольжения определим методом итераций – задавая через принятый шаг ширину призмы возможного обрушения a , получаем начало (точка 5) плавной криволинейной поверхности скольжения (рисунок 4.4). Для составления аналитического уравнения, описывающего форму потенциальной поверхности скольжения, из начала координат последовательно проведем к кривой множество отрезков, описывающихся уравнением вида

$$y_i = x_i \operatorname{tg} \alpha_i, \quad (4.5)$$

где α_i – угол наклона i -го отрезка, градус.

В уравнении (4.1) угол наклона отрезков α_i – величина, имеющая пределы от нуля до α_{1-5} , что соответствует изменению аргумента от x_1 до x_5 (рисунок 4.4). Приращение угла наклона $\Delta_{\text{пс}}$ выразим через изменение аргумента x_i :

$$\Delta_{\text{пс}} = \frac{\alpha_{1-5}}{x_5}, \quad (4.6)$$

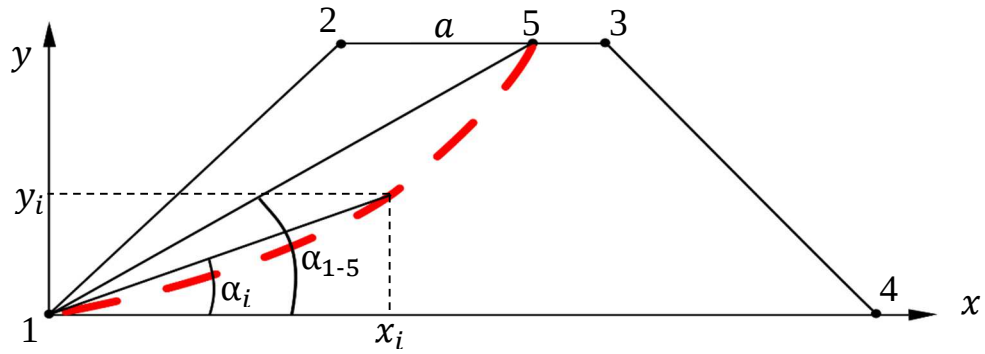


Рисунок 4.4. Схема построения поверхности скольжения в теле дамбы на горизонтальном прочном основании

где α_{1-5} – угол наклона прямой, проходящей через точки 1 и 5, градус; x_5 – абсцисса точки, соответствующей началу поверхности скольжения (точка 5).

Выражения (4.5) и (4.6) преобразуем в уравнение, описывающее положение поверхности скольжения в теле дамбы на горизонтальном прочном основании:

$$y_i = x_i \operatorname{tg}(\Delta_{\text{пс}} x_i). \quad (4.7)$$

Аналогично получим уравнение депрессионной кривой:

$$y_i = (x_i - x_{\text{вых}}) \operatorname{tg} \left[\operatorname{arctg} \frac{1}{m_2} - \Delta_{\text{дк}} (x_i - x_{\text{вых}}) \right], \quad (4.8)$$

$$\Delta_{\text{дк}} = \frac{\operatorname{arctg} \frac{1}{m_2} - \operatorname{arctg} \frac{y_{\text{вх}} - y_{\text{вых}}}{x_{\text{вх}} - x_{\text{вых}}}}{x_{\text{вх}} - x_{\text{вых}}}, \quad (4.9)$$

где m_2 – коэффициент заложения верхового откоса; $x_{\text{вх}}$ и $x_{\text{вых}}$ – абсцисса точек входа (со стороны верхового откоса) и выхода (в основание) депрессионной кривой (рисунок 4.5).

Метод алгебраического сложения сил подразумевает разбиение тела оползня на элементарные блоки, три границы которых прямые линии (боковые грани и линия откоса), а четвертая – кривая (поверхность скольжения). Принимая ширину элементарного блока постоянной и малой по величине, криволинейную поверхность скольжения заменим прямой, а элементарный блок изобразим в форме четырехугольника (рисунок 4.6).

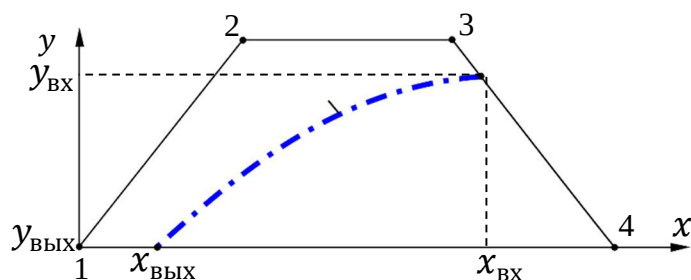


Рисунок 4.5. Схема расположения депрессионной кривой в теле дамбы

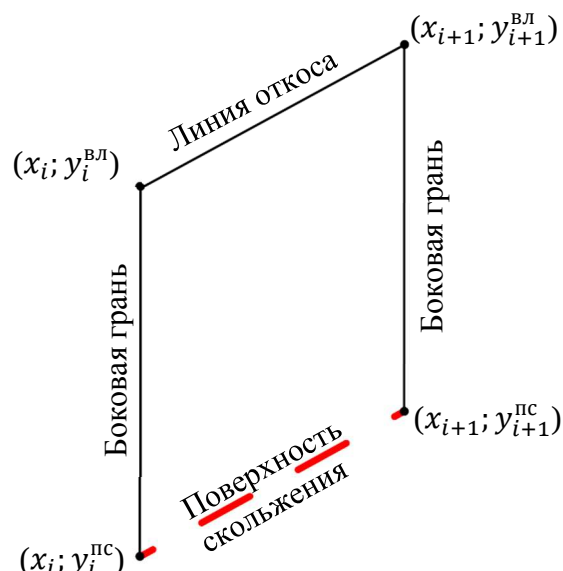


Рисунок 4.6. Схема блока

По известным координатам угловых точек установим геометрические параметры блока: площадь S_i , угол наклона основания α_i , длину поверхности скольжения l_i (таблица 4.7).

Таблица 4.7. Параметры элементарного блока

Параметр	Уравнение	Переменные формул
Площадь S_i	$S_i = 0,5(x_{i+1} - x_i) \times (y_i^{\text{ВЛ}} - y_i^{\text{НС}} + y_{i+1}^{\text{ВЛ}} - y_{i+1}^{\text{НС}})$	$y_{i+1}^{\text{ВЛ}}, y_i^{\text{ВЛ}}$ – последующая и предыдущая ординаты вышележащей линии (линия низового откоса или гребня); $y_{i+1}^{\text{НС}}, y_i^{\text{НС}}$ – последующая и предыдущая ординаты поверхности скольжения
Длина поверхности скольжения l_i	$l_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1}^{\text{НС}} - y_i^{\text{НС}})^2}$	
Угол наклона основания α_i	$\alpha_i = \arctg \frac{y_i^{\text{НС}} - y_{i+1}^{\text{НС}}}{x_i - x_{i+1}}$	

Коэффициент устойчивости по методу алгебраического сложения сил определим по известной формуле (1.1).

4.3.2. Дамба на горизонтальном слабом (водонасыщенном) основании

Модель дамбы на горизонтальном слабом основании аналогична модели дамбы на горизонтальном прочном основании (рисунок 4.3, таблица 4.6), различие лишь в форме и положении поверхности скольжения.

В рассматриваемом случае поверхность скольжения в массиве имеет круглоцилиндрическую, в основании плавную криволинейную формы.

Первоначально изобразим узловые точки (3, 4, 5, 6, 7) ломаной линии, в которых пересекаются смежные касательные к потенциальной поверхности скольжения (рисунок 4.7).

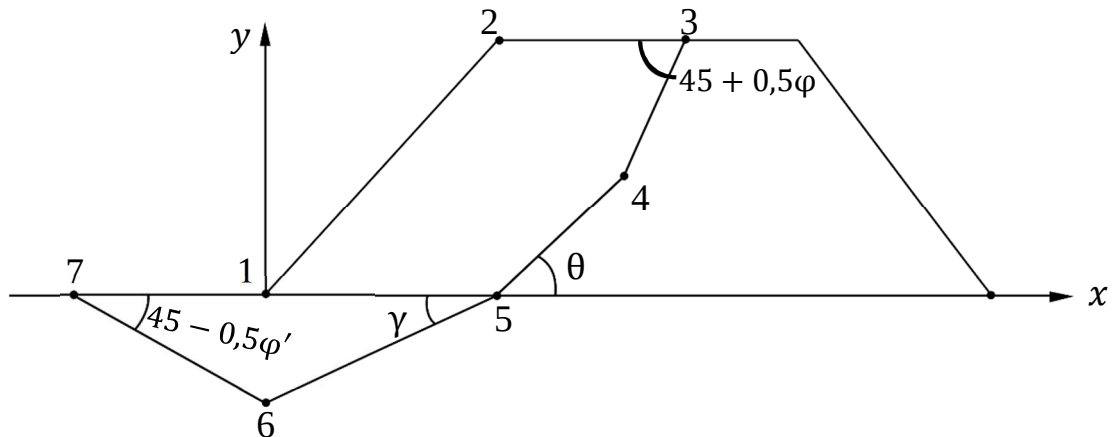


Рисунок 4.7. Изображение ломанной линии для построения поверхности скольжения в теле дамбы на слабом основании

Значения углов наклона в точке излома поверхности скольжения:

$$\theta = 45 + 0,5(\varphi - \varphi') - 0,5 \arcsin \frac{\sin \varphi'}{\sin \varphi}, \quad (4.10)$$

$$\gamma = 45 - 0,5 \arcsin \frac{\sin \varphi'}{\sin \varphi}, \quad (4.11)$$

где φ, φ' – углы внутреннего трения соответственно в массиве и основании, градус.

Поверхность скольжения в массиве имеет круглоцилиндрическую форму, поэтому длины l_{3-4} и l_{4-5} равны и могут быть вычислены по формуле

$$l_{3-4} = l_{4-5} = \frac{y_3}{\cos(45 - 0,5\varphi) + \sin \theta}. \quad (4.12)$$

Координаты узловых точек ломанной линии приведены в таблице 4.8.

Геометрический центр O_1 круглоцилиндрической поверхности скольжения в массиве определится на пересечении перпендикуляров, восстановленных к сторонам 3–4 и 4–5 соответственно из точек 3 и 5 (рисунок 4.8а).

Таблица 4.8. Координаты узловых точек ломанной линии

Номер точки	Уравнения координат	
	x	y
3	$h_d m_1 + a$	h_d
4	$x_3 - l_{3-4} \sin(45 - 0,5\varphi)$	$y_3 - l_{3-4} \cos(45 - 0,5\varphi)$
5	$x_4 - l_{4-5} \cos \theta$	0
6	0	$-x_5 \operatorname{tg} \gamma$
7	$\frac{-y_6}{\tan(45 - 0,5\varphi')}$	0

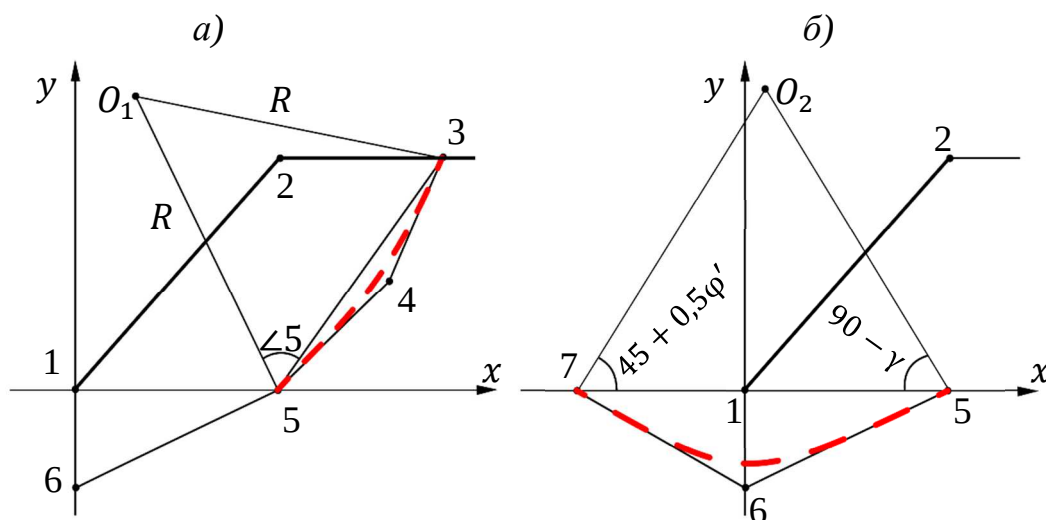


Рисунок 4.8. Форма поверхности скольжения для дамбы на горизонтальном слабом основании: в массиве (а) и основании (б).

Координаты центра окружности O_1 вычислим через радиус R и углы при вершинах O_1 и 5 треугольника 5-3- O_1 . Зная координаты точки O_1 и вид уравнения окружности в координатной форме, выведем аналитическое уравнение, описывающее поверхность скольжения в массиве (таблица 4.9).

Таблица 4.9. Параметры для вывода уравнения поверхности скольжения в массиве

Параметр	Уравнение
Угол $\angle 5$	$\angle 5 = 90 + \theta - \operatorname{arctg} \frac{y_3 - y_5}{x_3 - x_5}$
Угол $\angle O_1$	$\angle O_1 = 180 - 2\angle 5$
Радиус R	$R = \frac{l_{3-5} \sin \angle 5}{\sin \angle O_1}$
Абсцисса центра окружности x_{O_1}	$x_{O_1} = x_5 + R \cos(90 + \theta)$
Ордината центра окружности y_{O_1}	$y_{O_1} = y_5 + R \sin(90 + \theta)$
Уравнение поверхности скольжения	$y_i = y_{O_1} - \sqrt{R^2 - (x_i - x_{O_1})^2}$

Поверхность скольжения в основании имеет плавную криволинейную форму, радиус которой изменяется от l_{5-O_2} до l_{7-O_2} (рисунок 4.8б). Приращение радиуса Δ_R выразим формулой

$$\Delta_R = \frac{l_{7-O_2} - l_{5-O_2}}{l_{7-5}}. \quad (4.12)$$

Центр O_2 кривой расположен на пересечении перпендикуляров, восстановленных к сторонам 6–5 и 6–7 соответственно из точек 5 и 7. Вычислив углы при вершинах и длины сторон треугольника 7-5- O_2 :

$$\angle O_2 = 45 + \gamma - 0,5\varphi', \quad (4.13)$$

$$l_{7-5} = x_5 - x_7, \quad (4.14)$$

$$l_{5-O_2} = \frac{l_{7-5} \sin(45 + 0,5\varphi')}{\sin(45 + \gamma - 0,5\varphi')}, \quad (4.15)$$

$$l_{7-O_2} = \frac{l_{7-5} \sin(90 - \gamma)}{\sin(45 + \gamma - 0,5\varphi')}, \quad (4.16)$$

определим координаты центра O_2 плавной кривой:

$$x_{O_2} = x_5 + l_{5-O_2} \cos(90 + \gamma), \quad (4.17) \quad y_{O_2} = y_5 + l_{5-O_2} \sin(90 + \gamma). \quad (4.18)$$

После ряда геометрических преобразований по координатам центра окружности O_2 (4.17 и 4.18), приращению радиуса Δ_R (4.12) и уравнения окружности в координатной форме получим уравнение, описывающее форму поверхности скольжения в слабом основании:

$$y_i = y_{O_2} - \sqrt{\left(l_{5-O_2} + \Delta_R(l_{7-5} - x_i + x_7)\right)^2 - (x_i - x_{O_2})^2}. \quad (4.19)$$

Коэффициент устойчивости потенциальной поверхности скольжения, описываемой уравнением (4.19), вычисляется методом алгебраического сложения сил по формуле (1.1). Определение параметров элементарных блоков такое же, как для грунтовой дамбы на горизонтальном прочном основании (таблица 4.7).

$$x_6 = \frac{y_3 + x_3 \operatorname{tg}(45^\circ + 0,5\varphi)}{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg}(45^\circ + 0,5\varphi)}, \quad (4.21) \quad y_6 = x_6 \operatorname{tg} \alpha. \quad (4.22)$$

Без ущерба для точности длины l_{3-4} и l_{4-5} можно принять равными ($l_{3-4} = l_{4-5} = L$). В треугольнике 4-5-6 по теореме синусов определим:

$$L = \frac{l_{4-6} \sin(135 - 0,5\varphi + \alpha)}{\sin \theta}. \quad (4.23)$$

Длину l_{4-6} выразим через l_{3-6} :

$$l_{4-6} = l_{3-6} - L, \quad (4.24)$$

$$\text{где } l_{3-6} = \sqrt{(y_3 - y_6)^2 + (x_3 - x_6)^2}. \quad (4.25)$$

Учитывая (4.25), выражение (4.24) после преобразований примет вид:

$$L = \frac{l_{3-6} \sin(135 - 0,5\varphi + \alpha)}{\sin(135 - 0,5\varphi + \alpha) + \sin \theta}. \quad (4.26)$$

Координаты точек 4 и 5 относительно начала условной системы координат (точка 1) вычислим по формулам:

$$y_4 = y_3 + L \sin(45 + 0,5\varphi), \quad (4.27) \quad y_5 = y_4 + L \sin(\alpha + \theta), \quad (4.29)$$

$$x_4 = x_3 + L \cos(45 + 0,5\varphi), \quad (4.28) \quad x_5 = x_4 + L \cos(\alpha + \theta). \quad (4.30)$$

По теореме синусов установим значение радиуса R из треугольника 3-5- O_3 :

$$R = \frac{l_{3-5} \sin \angle 3}{\sin(180 - 2\angle 3)}, \quad (4.31)$$

$$\text{где } l_{3-5} = \sqrt{(y_3 - y_5)^2 + (x_3 - x_5)^2}, \quad (4.32)$$

$$\angle 3 = 45 + \operatorname{arctg} \frac{y_3 - y_5}{x_3 - x_5} - 0,5\varphi. \quad (4.33)$$

Координаты центра окружности O_3 :

$$x_{O_3} = x_3 + R \cos(135 + 0,5\varphi), \quad (4.34) \quad y_{O_3} = y_3 + R \sin(135 + 0,5\varphi). \quad (4.35)$$

Уравнение, характеризующее поверхность скольжения в массиве примет вид

$$y_i = y_{O_3} - \sqrt{R^2 - (x_i - x_{O_3})^2}. \quad (4.36)$$

Уравнение, описывающее поверхность скольжения в основании, аналогично уравнению (4.5).

Если $\angle 3 \geq 90^\circ$, то окружность вырождается в прямую линию, имеющую наклон к горизонту $45 + 0,5\varphi$. Таким образом, поверхность скольжения будет иметь форму ломаной линии, состоящей из двух прямых 1–5 и 5–3.

В этом случае координаты точки 5 определим по формулам

$$x_5 = \frac{y_3 - y_3 \operatorname{tg}(45 + 0,5\varphi)}{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg}(45 + 0,5\varphi)}, \quad (4.37) \quad y_5 = x_5 \operatorname{tg} \alpha. \quad (4.38)$$

Уравнение поверхности скольжения в массиве (прямая между точками 3 и 5):

$$y_i = x_i \operatorname{tg}(45 + 0,5\varphi) + y_3 - x_3 \operatorname{tg}(45 + 0,5\varphi). \quad (4.39)$$

Оценка устойчивости дамбы на наклонном слоистом основании выполняется методом векторного сложения (многоугольника) сил. Для удобства моделирования тело потенциального оползня разделим на три элементарных блока (рисунок 4.10).

Уравнение боковой грани первого блока:

$$y_i = y_2 + (x_i - x_2) \operatorname{tg}(90 - \varphi + \alpha + \theta), \quad (4.40)$$

второго блока:

$$y_i = y_5 + (x_i - x_5) \operatorname{tg}(90 - \varphi + \alpha + \theta). \quad (4.41)$$

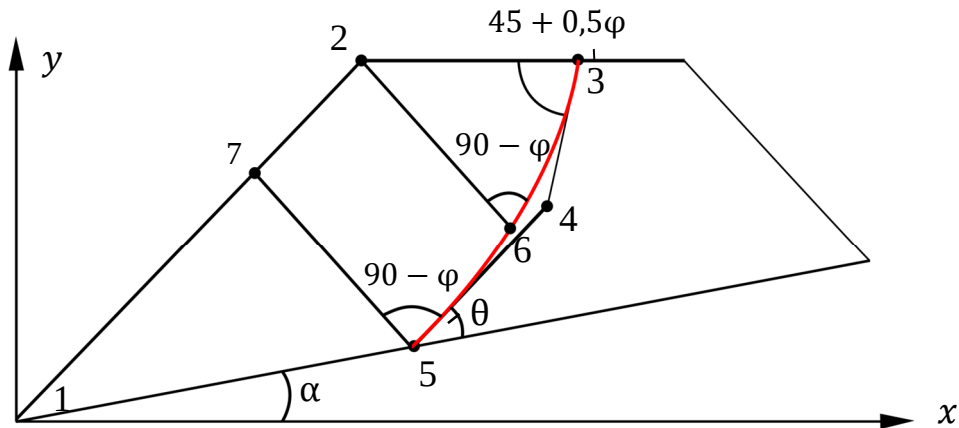


Рисунок 4.10. Разбивка тела оползня на элементарные блоки

Для определения параметров блоков установим координаты точек 6 и 7. Точка 6 находится на пересечении кривой поверхности скольжения и боковой границы первого блока. Приравняв ординаты точки 6, получаемые из уравнений (4.36) и (4.40), получим равенство:

$$y_{O_1} - \sqrt{R^2 - (x_6 - x_{O_1})^2} = y_2 + (x_6 - x_2) \operatorname{tg}(90 - \varphi + \alpha + \theta). \quad (4.42)$$

После преобразования (4.40) приходим к квадратному уравнению:

$$Ax_6^2 + Bx_6 + D = 0, \quad (4.43)$$

где коэффициенты квадратного уравнения A, B, D могут быть вычислены по формулам

$$A = 1 + \operatorname{tg}^2(90 - \varphi + \theta + \alpha), \quad (4.44)$$

$$B = -2([y_{O_1} - y_2 + x_2 \operatorname{tg}(90 - \varphi + \alpha + \theta)] \operatorname{tg}(90 - \varphi + \theta + \alpha) + x_{O_1}), \quad (4.45)$$

$$D = (y_{O_1} - y_2 + x_2 \operatorname{tg}(90 - \varphi + \alpha + \theta))^2 - R^2 + x_{O_1}^2. \quad (4.46)$$

Решив квадратное уравнение (4.43), установим координаты точки 6:

$$x_6 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AD}}{2A}, \quad (4.47)$$

$$y_6 = x_6 \operatorname{tg}(90 - \varphi + \alpha + \theta) + y_2 - x_2 \operatorname{tg}(90 - \varphi + \alpha + \theta). \quad (4.48)$$

Положение точки 7 определится из пересечения линии низового откоса и боковой границы второго блока:

$$y_5 + (x_7 - x_5) \operatorname{tg}(90 - \varphi + \alpha + \theta) = \frac{x_7}{m_1}, \quad (4.49)$$

$$x_7 = \frac{y_5 - x_5 \operatorname{tg}(90 - \varphi + \alpha + \theta)}{\frac{1}{m_1} - \operatorname{tg}(90 - \varphi + \alpha + \theta)}, \quad (4.50)$$

$$y_7 = y_5 + x_7 \operatorname{tg}(90 - \varphi + \alpha + \theta) - x_5 \operatorname{tg}(90 - \varphi + \alpha + \theta). \quad (4.52)$$

Геометрические параметры элементарных блоков и действующих на них сил приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10. Уравнения параметров элементарных блоков и нагрузок

Параметры блока	Уравнение	Переменные формул
Длина основания l_i	$l_{i\text{осн}} = \sqrt{(x_{i+1} - x)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$	$y_{i+1}^{\text{ВЛ}}, y_i^{\text{ВЛ}}$ – последующая и предыдущая ординаты вышележащей линии (линия низового откоса или гребня); y_{i+1}, y_i – последующая и предыдущая ординаты поверхности скольжения; ρ – плотность, г/см ³ , C – сцепление грунтов, т/м ²
Угол наклона основания α_i	$\alpha_i = \arctg \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i}$	
Длина боковой грани $l_{i\text{бок}}$	$l_{i\text{бок}} = \sqrt{(x_i^{\text{ВЛ}} - x_i)^2 + (y_i^{\text{ВЛ}} - y_i)^2}$	
Вес P_i	$P_i = S_i \rho$	
Силы сцепления по основанию $C_{i\text{осн}}$	$C_{i\text{осн}} = C l_{i\text{осн}}$	
Силы сцепления по боковой грани $C_{i\text{бок}}$	$C_{i\text{бок}} = C l_{i\text{бок}}$	
Площадь S_i	$S_i = 0,5[(x_i^{\text{ВЛ}} - x_i)(y_i^{\text{ВЛ}} + y_i) + (x_i - x_{i+1})(y_i + y_{i+1}) + (x_{i+1} - x_{i+1}^{\text{ВЛ}})(y_{i+1} + y_{i+1}^{\text{ВЛ}}) + (x_{i+1}^{\text{ВЛ}} - x_i^{\text{ВЛ}})(y_{i+1}^{\text{ВЛ}} + y_i^{\text{ВЛ}})]$	

Призма возможного обрушения делится на три элементарных блока, поэтому рассмотрим три вида многоугольников сил: первого, среднего и конечного блоков (рисунок 4.11).

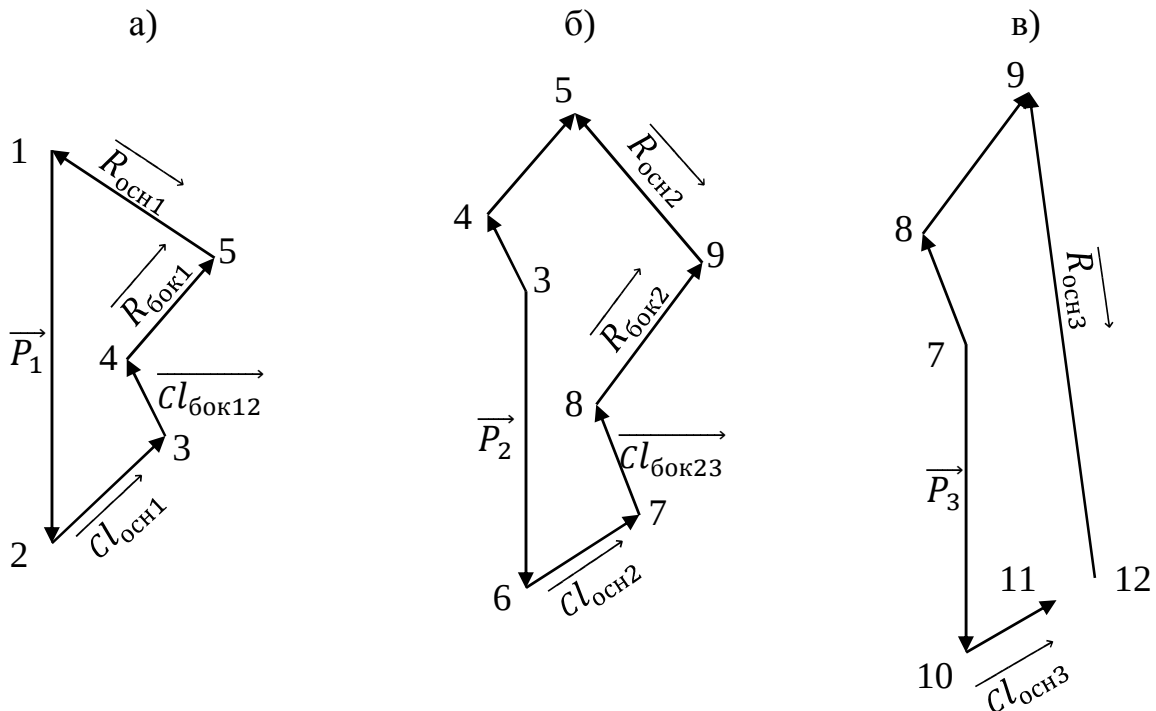


Рисунок 4.11. Многоугольники сил первого (а); среднего (б) и конечного (в) блоков

В расчет принимаются следующие силы, действующие на блок: $\vec{P}_i$ – вес (вектор направлен вертикально вниз); $\vec{Cl}_{оч1}$, $\vec{Cl}_{бок1}$ – силы сцепления, возникающие соответственно в основании и по боковой грани (направлены соответственно параллельно основанию либо боковой грани); $\vec{R}_{оч}$ – реакция со стороны основания (вектор отклонен от нормали к основанию на угол φ'), $\vec{R}_{бок}$ – реакция со стороны боковой грани (вектор отклонен от нормали к боковой грани на угол φ). Реакции являются равнодействующими сил трения и нормальной составляющей веса блока.

Выразим вектора сил в аналитическом виде через координаты угловых точек (1–12) многоугольника в условной системе координат (таблица 4.11).

Таблица 4.11. Координаты вершин многоугольников

№ точки	Координаты	
	x	y
Первый блок		
1	0	0
2	x_1	$y_1 - P_1$
3	$x_2 + Cl_{оч1} \cos \alpha_i$	$y_2 + Cl_{оч1} \sin \alpha_i$
4	$x_2 + Cl_{бок12} \cos(90 - \varphi + \theta + \alpha_i)$	$y_3 + Cl_{бок12} \sin(90 - \varphi + \theta + \alpha_i)$
5	$\frac{y_4 - x_4 \operatorname{tg}(\theta + \alpha)}{\operatorname{tg}(90 - \varphi + \alpha_i) - \operatorname{tg}(\theta - \alpha)}$	$x_4 \operatorname{tg}(90 - \varphi + \alpha_i)$
Средний блок		
6	x_3	$y_3 - P_i$
7	$x_6 + Cl_{оч2} \cos \alpha_i$	$y_6 + Cl_{оч2} \sin \alpha_i$
8	$x_7 + Cl_{бок23} \cos(90 - \varphi + \theta + \alpha_i)$	$y + Cl_{бок23} \sin(90 - \varphi + \theta + \alpha_i)$
9	$\frac{y_8 - x_8 \operatorname{tg}(\theta + \alpha) - y_5 + x_5 \operatorname{tg}(90 - \varphi + \alpha_i)}{\operatorname{tg}(90 - \varphi + \alpha_i) - \operatorname{tg}(\theta + \alpha)}$	$(x_5 - x_8) \operatorname{tg}(\theta + \alpha) + y_8$
Последний блок		
10	x_7	$y_7 - P_i$
11	$x_{10} + Cl_{оч3} \cos \alpha_i$	$y_{11} + Cl_{оч3} \sin \alpha_i$
12	$\frac{y_{11} - x_{11} \operatorname{tg} \alpha_i - y_9 + x_9 \operatorname{tg}(90 - \varphi' + \alpha_i)}{\operatorname{tg}(90 - \varphi' + \alpha_i) - \operatorname{tg} \alpha_i}$	$x_{10} \operatorname{tg} \alpha_i + y_{11} - y_{11} \operatorname{tg} \alpha_i$

Невязку Δ многоугольника сил определим по формуле

$$\Delta = \sqrt{(x_{11} - x_{12})^2 + (y_{11} - y_{12})^2}. \quad (4.53)$$

При равенстве координат точек 11 и 12 многоугольник сил замыкается (сооружение находится в состоянии равновесия), иначе вычисляем знак невязки Δ :

- *невязка положительна* при $x_{11} < x_{12}, y_{11} < y_{12}$, (координаты точки 12 больше координат точки 11) – насыпное сооружение находится в неустойчивом положении (сдвигающие силы больше удерживающих);
- *невязка отрицательна* при $x_{11} > x_{12}, y_{11} > y_{12}$, (координаты точки 12 меньше координат точки 11) – насыпное сооружение в устойчивом положении (удерживающие силы больше сдвигающих).

Приведенные выше рассуждения могут быть представлены в виде алгоритма аналитического метода прогноза устойчивости дамбы (рисунок 4.12) с учетом пространственной изменчивости прочностных свойств грунтов, заключающегося в следующем:

- Определяют физико-механические свойства грунта по материалам инженерно-геологических изысканий, при их отсутствии прогнозированием прочностных свойств (сцепление C , угол внутреннего трения β) по имеющимся физическим (таблица 3.12), либо по региональной таблице обобщенных значений (таблица 2.18).
- Методом корреляции аппроксимируются геометрические параметры (таблица 4.2) или критерий безопасности (коэффициент устойчивости) дамбы уравнениями первого порядка. Параметры дамбы корректируются с учетом пространственной изменчивости прочностных характеристик техногенных грунтов.
- Поиск наиболее напряженной поверхности скольжения включает выбор типа основания, моделирование напряженного состояния дамбы, аналитическое выражение поверхности скольжения, параметров блоков и нагрузок.

На основе разработанного алгоритма составлена программа для ЭВМ "Устойчивая насыпь" [111].

4.4. Расчет устойчивости грунтовой дамбы аналитическим методом

Пример аналитического метода расчета устойчивости дамбы (объект 17), расположенной на горизонтальном прочном основании и характеризуемой следующими параметрами: высота $h_d = 9,0$ м и коэффициент заложения откоса $m = 1,0$ (рисунок 4.13).

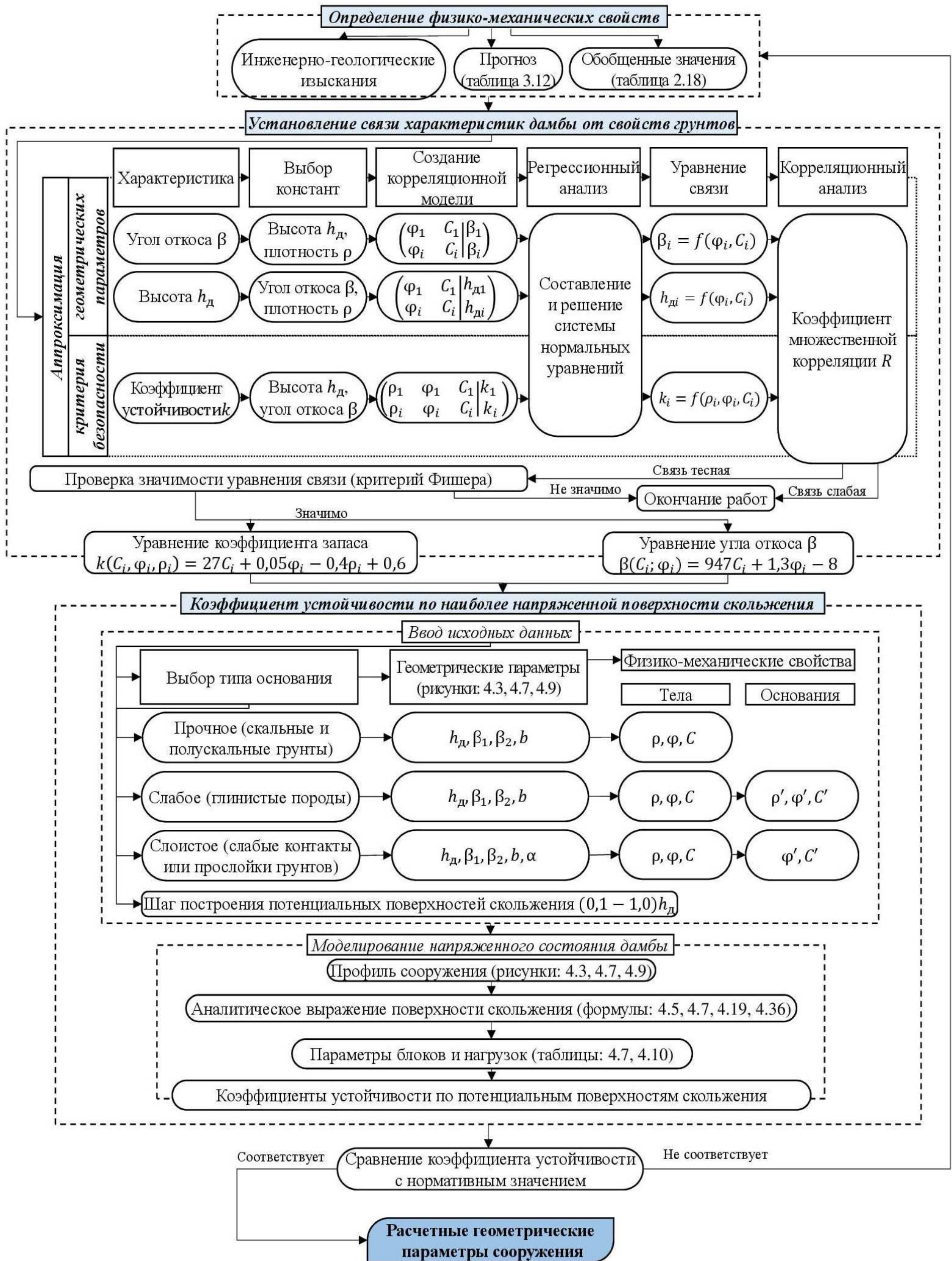
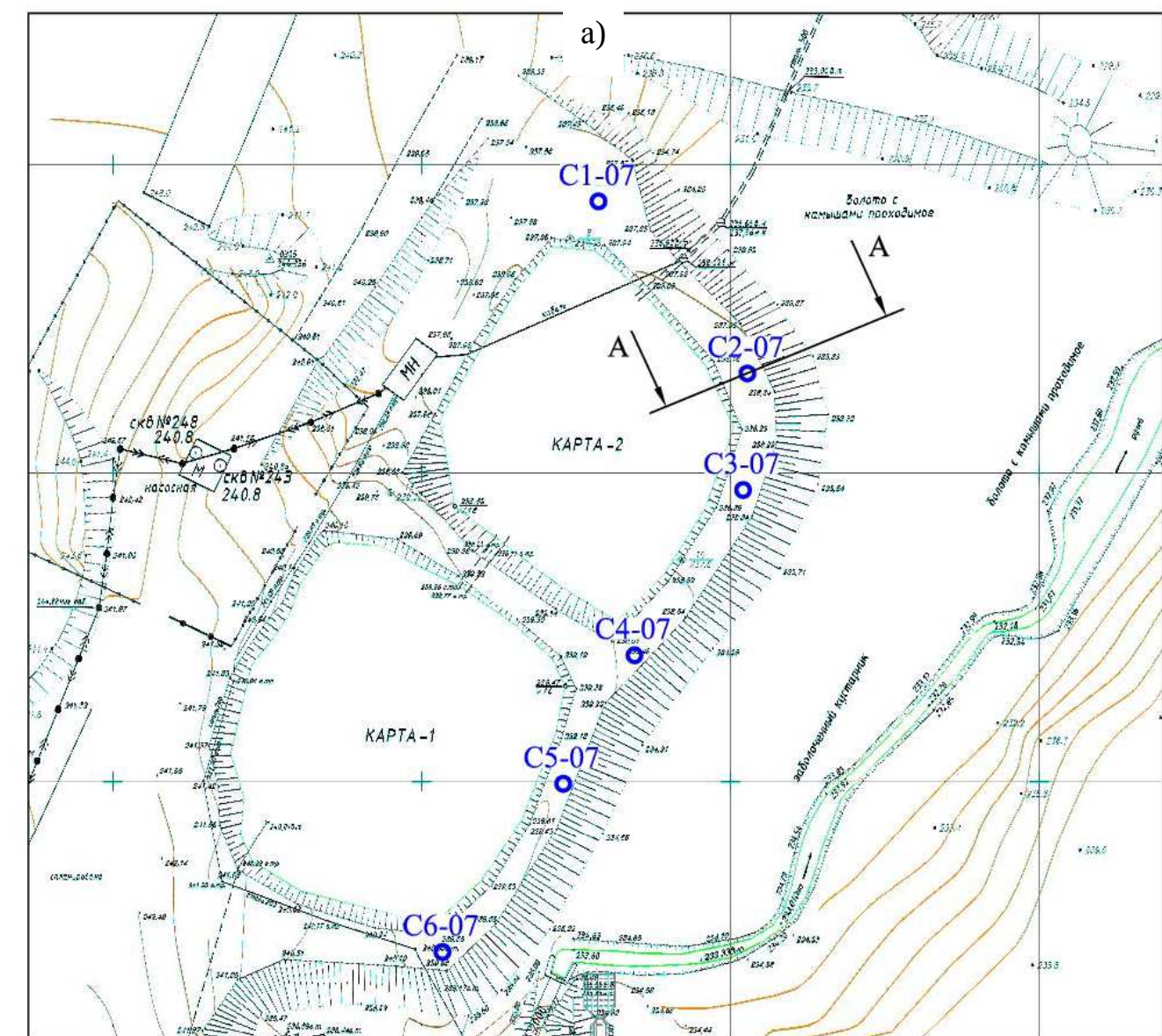
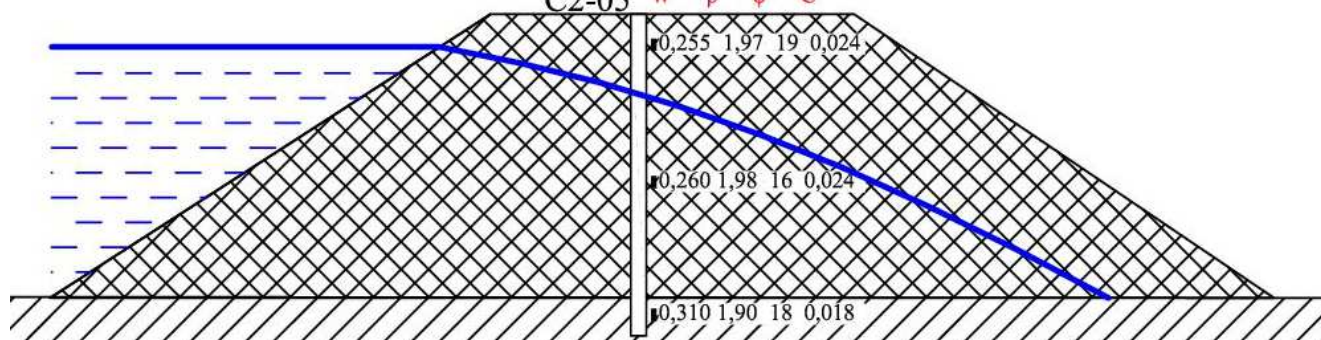


Рисунок 4.12. Алгоритм аналитического метода прогноза устойчивости



б) по линии А-А

C2-05 W p φ C



Условные обозначения

■ - место отбора монолитов;

W - естественная влажность, д.е.;

p - плотность, г/см³;

φ - угол внутреннего трения, градус;

C - сцепление, МПа;

■ - насыпной грунт (суглинок);

■ - грунт основания (суглинок).

Рисунок 4.12. План (а) и поперечный разрез (б) грунтовой дамбы объекта 17

Физико-механические свойства грунтов (таблица 4.12) принимались: по результатам инженерно-геологических изысканий (колонка 2); прогнозом прочностных по физическим при $W = 0,260$ (колонка 3) и обобщенные для Кузбасса (колонка 4).

Таблица 4.12. Физико-механические свойства грунтов дамбы (объект 17)

Обозначения свойств	Свойства грунтов		
	по изысканиям	прогнозные	обобщенные
1	2	3	4
φ , град.	18	19	20
C , МПа	0,021	0,022	0,025
ρ , г/см ³	1,92	1,98	1,98

При известных параметрах, используя корреляционную связь коэффициента устойчивости от характеристик грунта, интерполяцией вычислим его величину для свойств, определенных по материалам инженерно-геологических изысканий (таблица 4.13).

Таблица 4.13. Расчет коэффициента устойчивости по корреляционной связи

Высота дамбы, м	Расчет $k(\varphi, \rho, C)$	Коэффициент устойчивости k	
		промежуточный	итоговый
Заложение откоса – 1:1,0			
5	$70,336 \cdot 0,021 + 0,029 \cdot 18 - 2,748 \cdot 1,92 + 5,059$	1,78	1,27
10	$35,863 \cdot 0,021 + 0,028 \cdot 18 - 1,290 \cdot 1,92 + 2,366$	1,15	

Значения коэффициентов устойчивости, определенные с использованием корреляционной связи для свойств грунта, принятых прогнозом прочностных от физических характеристик и обобщенными для условий Кузбасса, приведены в таблице 4.14 (столбец 7).

Поиск наиболее напряженной поверхности скольжения начинаем с выбора типа основания – прочное. Задаем шаг построения потенциальных поверхностей скольжения a . По исходным параметрам дамбы, используя аналитические уравнения (таблица 4.6, формула 4.7), строим ее графическую модель, семейство потенциальных поверхностей скольжения (рисунок 4.13). Затем определяем параметры

блоков и действующие нагрузки (таблица 4.7, формула 1.1). В результате получаем множество коэффициентов устойчивости, из которых выбираем минимальный, характеризующий наиболее напряженную поверхность скольжения (таблица 4.14, столбец 8).

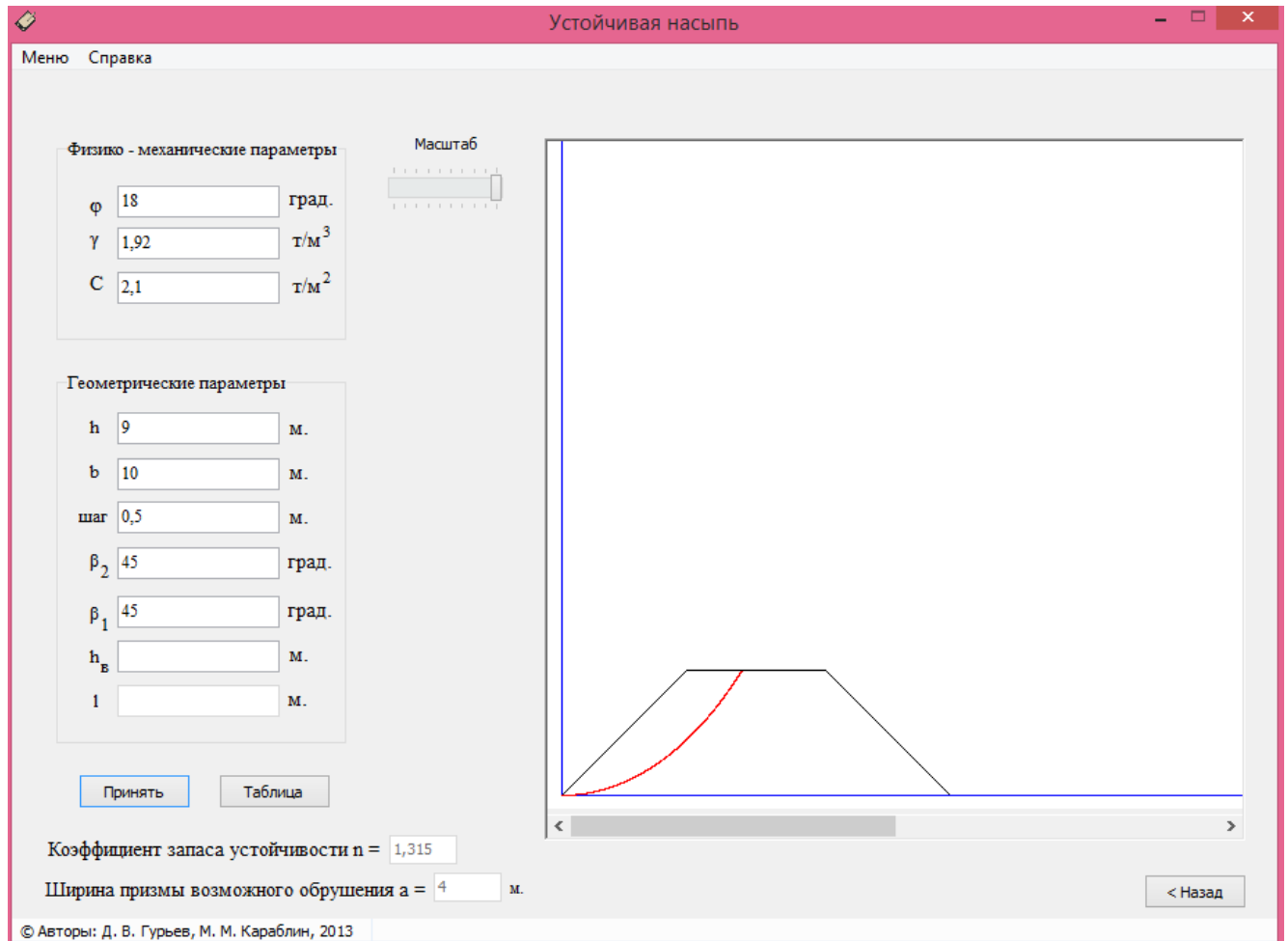


Рисунок 4.13. Пример расчета коэффициента запаса аналитическим способом, реализованным в программе для ЭВМ "Устойчивая насыпь"

Результаты аналогичных расчетов для дамб объектов 9, 13, 14 и 16 (см. таблицу 2.1; рисунки 2.1, 2.2, 2.7, 3.6) сведены в таблицу 4.14.

Анализом результатов расчета, приведенных в таблице 4.14, установлено следующее:

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

Таблица 4.14. Прогноз устойчивости грунтовых дамб Кузбасса

Шифр объекта	Свойства			Параметры дамбы		Коэффициент устойчивости, определенный	
	по изысканиям	прогнозные	обобщенные	высота h_d , м	заложение откоса	по корреляционной связи	аналитическим методом
1	2	3	4	5	6	7	8
9	20 ²³	20	20 0,025 1,98	12,7	1:2,4	1,91 ²⁴	2,14
	0,023	0,031				2,25	2,52
	1,98	1,98				1,99	2,23
13	20	20		9,0	1:2,0	1,98	2,00
	0,023	0,024				2,01	2,05
	1,99	1,98				2,10	2,07
14	20	21		7,5	1:2,9	5,38	5,34
	0,041	0,047				5,95	5,70
	1,94	1,98				3,35	3,29
16	21	21		6	1:1,7	3,27	3,15
	0,030	0,043				4,23	4,13
	1,98	1,98				2,67	2,72
17	18	19		9,0	1:1,0	1,27	1,31
	0,021	0,022				1,35	1,39
	1,92	1,98				1,41	1,43

– на этапе эксплуатации дамбы оценку устойчивости необходимо 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 при расчете получается несколько заниженный коэффициент устойчивости, что сработает в дополнительный запас устойчивости дамбы.

Оценка устойчивости дамбы объекта 9 по программе для ЭВМ "Устойчивая насыпь", разработанной автором на основе аналитического метода, а также другими программами, используемыми в настоящее время (таблица 4.15), показала, что расхождение коэффициентов устойчивости находится в пределах погрешности округления. Следовательно, для инженерных расчетов может использоваться любая из приведенных программ, в том числе разработанная автором.

²³ Первое число в ячейке соответствует углу внутреннего трения, градус; второе – сцеплению, МПа; третье – плотности, т/м³.

²⁴ Первое число в ячейке соответствует коэффициенту устойчивости, определенному по материалам инженерно-геологических изысканий; второе – по прогнозным прочностным характеристикам; третье – по обобщенным свойствам.

Таблица 4.15. Результаты расчета коэффициента устойчивости насыпных дамб

Условия расчета	Используемые программы				
	Geo-Stab	Geo5	Slope/W	Slide	Устойчивая насыпь
Боковые силы горизонтальны, меняют уклон от блока к блоку – метод <i>В. Феллениуса</i>	2,26	2,25	–	2,20	–
Силы основания нормально направлены, а касательные равны нулю – метод <i>А. Бишона</i>	2,25	2,29	1,69	2,29	–
Выполняется равновесие горизонтальных сил, равновесие моментов не обеспечивается – метод <i>Н. Янбу</i>	2,10	–	2,07	2,13	–
Касательные составляющие сил являются функцией от нормальных – метод <i>Н. Р. Моргенштеран – В. Е. Прайса</i>	2,22	–	2,21	2,22	–
Поверхность скольжения предопределена структурной неоднородностью массива – метод <i>Г. М. Шахунянца</i>	2,20	2,26	–	–	–
Постоянный угол наклона боковых сил – метод <i>Е. Спенсера</i>	–	2,29	2,21	2,25	–
Отсутствие неблагоприятно ориентированных поверхностей ослабления – метод <i>алгебраического сложения сил</i>	–	–	–	–	2,27

4.5. Выводы по главе 4

1. Основным путем сокращения трудоемкости прогноза устойчивости грунтовой дамбы является переход от графоаналитических методов к аналитическим – по уравнениям корреляционной связи, позволяющим учитывать пространственную изменчивость прочностных свойств грунтового массива.

2. Алгоритм аналитического метода прогноза устойчивости дамбы включает: определение физико-механических свойств грунтов, аппроксимацию геометрических параметров либо критерия безопасности (коэффициент устойчивости) прочностными характеристиками грунтов; отыскание наиболее напряженной поверхности скольжения и обоснование геометрических параметров дамбы с учетом пространственной изменчивости прочностных свойств техногенных грунтов.

3. 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.

Разработанный аналитический метод прогноза устойчивости дамб реализован проектными институтами ОАО «Кузбассгипрошахт» и ООО «Сибгеопроект» при проектировании следующих объектов: дамба очистных сооружений (АО "УК "Кузбассразрезуголь" "Бачатский угольный разрез"), дамба очистных сооружений участка "Семеновский" (АО "Разрез Шестаки"), дамба очистных сооружений (участок открытых горных работ "Разрез Караканский Западный" ЗАО "Шахта Беловская"), защитные дамбы р. Большой Бачат (ООО "Шахта Чертинская-Коксовая"), плотина Северная (ПЕ "Разрез Заречный" Разрезуправления АО "СУЭК-Кузбасс"), ограждающая дамба отстойника карьерных и ливневых вод на реке Большая Коровиха (АО "УК "Кузбассразрезуголь" "Талдинский угольный разрез"), что подтверждается Актами внедрения (Приложение 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно квалификационной работой, в которой изложены научно-обоснованные технические решения по аналитическому методу прогноза устойчивости грунтовых дамб, 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 ($\rho = 1,77\text{--}2,19 \text{ г/см}^3$), несколько больший (до 15 %) диапазон угла внутреннего трения ($\varphi = 11^\circ\text{--}35^\circ$) и весьма значимое (до 69 %) варьирование значений сцепления ($C = 0,009\text{--}0,113 \text{ МПа}$). Диапазон фактических характеристик грунта обширнее рекомендуемых 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 ($\rho = 1,98 \text{ г/см}^3$) и угла внутреннего трения ($\varphi = 20^\circ$), модальное – сцепления ($C = 0,025 \text{ МПа}$).

2. На практике зачастую имеются материалы исследования гранулометрического состава и физических свойств грунтов (плотность, влажность), которые связаны с прочностными характеристиками, необходимыми для оценки устойчивости дамбы. Отыскание регрессионного уравнения, характеризуемого минимальной средней квадратической погрешностью и наиболее адекватно описывающего зависимость между физическими и прочностными характеристиками грунтов, основано на минимизации суммы квадратов отклонений S эмпирических y_i от прогнозируемых значений $\hat{y}_i$ прочностных свойств. Прочностные характеристики (угол

внутреннего трения φ и сцепление C) 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 свойств (сцепление C , угол внутреннего трения β) по имеющимся физическим либо региональной таблице обобщенных значений; аппроксимацию уравнением первого порядка геометрических параметров либо критерия безопасности (коэффициент устойчивости) прочностными характеристиками 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 диссертационного исследования 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП II-15-74. Основания зданий и сооружений. – Москва: Стройиздат, 1975.
2. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений – Москва: Институт ОАО "НИЦ "Строительство", 2011.
3. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть III: Правила производства работ в районах распространения специфических грунтов. – Москва: ПНИИИС Госстроя России, 2000.
4. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть I: Общие правила производства работ. – Москва : ПНИИИС Госстроя России, 1997.
5. Черняк, Э. Р. Будущее за региональными таблицами нормативных и расчетных показателей механических свойств грунтов / Э. Р. Черняк // Инженерные изыскания. – 2011. – № 9. – С. 4–8.
6. Руководство по составлению региональных таблиц нормативных и расчетных показателей свойств грунтов / ПНИИИС Госстроя СССР. – Москва: Стройиздат, 1981.
7. Правила обеспечения устойчивости откосов на угольных разрезах – Санкт-Петербург: ВНИМИ, 1998. – 208 с.
8. Саваренский, Ф. П. Инженерная геология / Ф. П. Саваренский. – Москва ; Ленинград: ОНТИ НКТП СССР, 1937. – 443 с.
9. Коломенский, Н. В. Инженерная геология: учебник для геолого-разведочных техникумов: в 2 ч. Часть 1: Грунтоведение / Н. В. Коломенский. – Москва : Государственное издательство геологической литературы, 1951. – 284 с.
10. Приклонский, В. А. Изучение физических свойств и химического состава подземных вод. – 2 изд. / В. А. Приклонский. – Москва : Грунтоведение, 1935 – 52 с.
11. Попов, И. В. Памяти Виктора Александровича Приклонского / И. В. Попов, И. М. Горькова, Ф. В. Котлов // Изв. АН СССР. Сер. геологическая. – 1959. – № 9.

12. Ломтадзе, В. Д. Инженерная геология. Инженерная петрология / В. Д. Ломтадзе. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Недра, 1984. – 511 с.
13. Ломтадзе, В. Д. Инженерная геология. Инженерная геодинамика / В. Д. Ломтадзе. – Ленинград : Недра, 1977. – 479 с.
14. Ломтадзе, В. Д. Инженерная геология. Специальная инженерная геология: учеб. пособие для вузов / В. Д. Ломтадзе. – Ленинград : Недра, 1978. – 496 с.
15. Ломтадзе, В. Д. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых: учебник для вузов / В. Д. Ломтадзе. – Ленинград : Недра, 1986. – 272 с.
16. Ломтадзе, В. Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований: учебное пособие для вузов. / В. Д. Ломтадзе. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Недра, 1990. – 328 с.
17. Ломтадзе, В. Д. Словарь по инженерной геологии / В. Д. Ломтадзе. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский горный ин-т, 1999. – 360 с.
18. Цытович, Н. А. Механика грунтов: краткий курс / Н. А. Цытович. – 6-е изд. – Москва : Либроком, 2011.
19. Чеботарев, Г. П. Механика грунтов, основания и земляные сооружения / Г. П. Чеботарев. – Москва : Либроком, 2009. – 616 с.
20. Месчан, С. Р. Начальная и длительная прочность глинистых грунтов / С. Р. Месчан. – Москва : Недра, 1978. – 207 с.
21. Месчан, Степан Рубенович / Известия Национальной Академии Наук Армении – №1. – 2013. – С. 67–68.
22. Гольдштейн, М. Н. Механические свойства грунтов / М. Н. Гольдштейн. – Изд. 2-е перераб. – Москва : Стройиздат, 1971. – 368 с.
23. Петренко, В. Д. Памяти профессора Михаила Наумовича Гольдштейна (к 100-летию со дня рождения) / В. Д. Петренко // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2010. – № 32. – С. 7–9.
24. Попов, И. В. Инженерная геология / И. В. Попов. – Москва : Госгеолиздат, 1951. – 444 с.
25. Лысенко, М. П. Состав и физико-механические свойства грунтов / М. П. Лысенко. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Недра, 1980. – с. 272.

26. Сергеев, Е. М. Грунтоведение: учебн. – Изд. 2-е, перераб. / Е. М. Сергеев. – Москва : Изд-во МГУ, 1959. – 426 с.
27. Воспоминания об академике Е. М. Сергееве (к 90-летию со дня рождения) / под ред. В. И. Осипова, В. Т. Трофимова. – Москва : ГЕОС, 2004.
28. Гальперин, А. М. Техногенные массивы и охрана окружающей среды / А. М. Гальперин, В. Ферстер, Х.-Ю. Шеф. – Москва : МГГУ, 1997. – 534 с.
29. Котлов, Ф. В. Изменение геологической среды под влиянием деятельности человека / Ф. В. Котлов. – Москва : Недра, 1978.
30. Прогноз прочностных свойств углевмещающих горных пород Кузбасса / В. А. Шаламанов, Г. Г. Штумпф, В. В. Першин; Кузбас. гос. техн. ун-т. Томск : Издательство Томского университета, 1995. – 160 с.
31. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна: справочник / Г. Г. Штумпф [и др.]. – Москва : Недра, 1994. – 447 с.
32. Прогнозирование структурно-прочностных характеристик вскрышных пород разрезов / А. С. Ташкинов, И. А. Паначев, В. М. Мазаев. Уголь. 1982. – № 9. – С. 55–57.
33. Terzaghi, K. Theoretical Soil Mechanics / K. Terzaghi. – New York : John Wiley and Sons, 1943.
34. Skempton, A. W. A Bibliographical Catalogue of the [Skempton] Collection of Works on Soil Mechanics 1764–1950 / A. W. Skempton. – London : Imperial College, 1981.
35. Bjerrum, L. Problems of Soil Mechanics and Construction on Soft Clays / L. Bjerrum // State-of-the-Art Report, Proc. 8th Int. conf. SMFE. – Moscow, 1971. – P. 31–53.
36. Zaruba, Q. Engineering Geology / Q. Zarub, V. Mencl. – Amsterdam, Prague : Elsevier Science, 1969. – 205 p.
37. Устройство для отбора почвы : пат. 2525080 Рос. Федерация: МПК E02D1/04G01N1/04 / Н. И. Богатырев, В. И. Терпелец, Н. С. Баракин, Е. Е. Баракина; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "Кубанский государственный аграрный университет"; заявл. 02.07.13; опубл. 10.08.14.

38. Пробоотборник: пат. 2484207 Рос. Федерация: МПК E02D1/04G01N1/04 / А. М. Хисматулина, А. В. Жуков, Ю. А. Жукова, И. Г. Кабанов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "Дальневосточный федеральный университет"; заявл. 26.12.11; опубл. 10.06.13.

39. Устройство для измерения деформаций грунтов: пат. 2529214 Рос. Федерация: МПК E02D1/02 / С. М. Жданова, А. Ф. Серенко, А. В. Шулатов, Л. Ю. Однопозов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "Дальневосточный государственный университет путей сообщения"; заявл. 03.04.13; опубл. 27.09.14.

40. Устройство для комплексного определения физических и механических свойств грунтов в полевых условиях: пат. 2510440 Рос. Федерация: МПК E02D1/08 / Г. Г. Болдырев, Е. Г. Болдырева, И. Х. Идрисов, А. И. Елатонцев, О. А. Виноградов; заявитель и патентообладатель ООО "НПП "Геотек"; заявл. 23.05.12; опубл. 27.03.14.

41. Устройство для комплексного зондирования грунтов: пат. 2333314 Рос. Федерация: МПК E02D1/00 / Р. К. Зиновьев, П. К. Кузьмин, Н. Р. Зиновьев; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Российский университет дружбы народов"; заявл. 12.04.06; опубл. 10.09.08.

42. Устройство для комплексного зондирования грунтов: пат. 2025559 Рос. Федерация: МПК E02D1/00 / Гальперин А. М., Зайцев В. С., Хейфиц В. З., Петрашень И. Р., Зиновьев Р. К., Кириченко Ю. В., Комкин Б. И., Павленко В. М.; патентообладатель: Московский государственный горный университет, Малое производственное предприятие "Диагностика гидротехнических, энергетических и других ответственных сооружений"; заявл. 20.07.93; опубл. 30.12.94.

43. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Часть I: Общие правила производства работ. – Москва : ПНИИИС Госстроя России, 2000.

44. ГОСТ 19912-2001. Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием. – Москва : ГУП ЦПП, 2001.

45. Парамонов, В. Н. Область применимости статического зондирования грунтов основания / В. Н. Парамонов, Л. К. Тихомирова // Реконструкция городов и геотехническое строительство. – № 1. – 2001.
46. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. – Москва : Институт ОАО "НИЦ "Строительство", 2011.
47. Бахаева, С. П. Прогноз устойчивости откосных сооружений угольных разрезов / С. П. Бахаева, С. М. Простов, Н. А. Смирнов. – Томск : Изд-во Том. ун-та, 2015. – 368 с.
48. Кутепов, Ю. И. Методика и технические средства гидрогеомеханического мониторинга безопасности промышленных гидротехнических сооружений / Ю. И. Кутепов, Н. А. Кутепова, Г. Л. Мильман // Инженерные изыскания. – 2009. – № 5. – С. 42–48.
49. ГОСТ 5180-84. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – Москва : ПНИИИС Госстроя СССР, 1984.
50. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. – Москва : Институт ОАО "НИЦ "Строительство", 2011.
51. Простов, С. М. Прогноз физико-механических свойств намывного массива по данным электрических зондирований / С. М. Простов, С. П. Бахаева, Н. А. Смирнов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2015. – № 1. – С. 69–78.
52. Крячко, О. Ю. Управление отвалами открытых горных работ / О. Ю. Крячко. – Москва : Недра, 1980. – 254 с.
53. Грязнов, Т. А. Оценка показателей свойств пород полевыми методами / Т. А. Грязнов. – Москва : Недра, 1984.
54. Лебедев, В. И. Полевые методы инженерно-геологических изысканий / В. И. Лебедев, В. В. Ильичев, К. П. Шевцов, А. Т. Индюков. – Москва : Недра, 1988.
55. Круподеров, В. С. Пенетрационный каротаж при инженерно-геологических исследованиях / В. С. Круподеров, В. А. Титянин // ГИАБ. – № 1. – 2007.

56. Чугаев, Р. Р. Расчёт устойчивости земляных откосов и бетонных плотин на нескальном основании по методу круглоцилиндрических поверхностей обрушения / Р. Р. Чугаев. – Москва : ГЭИ, 1963. – 144 с.
57. Morgenstern, N. The analysis of the stability of general slip surfaces. / N. Morgenstern, V. E. Price // *Geotechnique*. – 1965. – № 1. – P. 79–93.
58. Spencer, E. A method of analysis of the stability of embankment assuming parallel inter-slice forces / E. Spencer // *Geotechnique*. – Vol. 17. – 1967. – Pp. 11.
59. Janbu, N. Application of composite slip surface for stability analysis / N. Janbu // *Proceedings of the European Conference on Stability of Earth Slopes, Stockholm*. – Vol. 3. – 1954. – P. 43–49.
60. Касымканова, Х. М. Анализ методов оценки устойчивости прибортовых массивов карьеров / Х. М. Касымканова // *Вестник КГУСТА*. – 2013. – № 1. – С. 37–42.
61. Жабко, А. В. Теория расчета устойчивости откосов и оснований. Анализ, характеристика и классификация существующих методов расчета устойчивости откосов / А. В. Жабко // *Известия Уральского государственного горного университета*. – 2016. – № 2. – С. 42–46.
62. Azzous, A. S. Three-Dimensional Stability of Slopes / A. S. Azzous, M. M. Baligh // *Research Report R 78-8, Order 595 / Department of Civil Engineering; Massachusetts Institute of Technology*. – Cambridge, 1978.
63. Bishop, A. W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes / A. W. Bishop // *Geotechnique*. – 1955. – № 5. – P. 7–17.
64. Desai, C. S. Mixed finite element procedure for Soil–Structure interaction and construction sequences / C. S. Desai, J. G. Lightner // *Inter. J. for Numerical Methods in Engineering*. – 1985. – № 5. – P. 801–824.
65. Garber, M. Extreme-value problems of limiting equilibrium / M. Garber, R. Baker // *Proc. Amer. Soc. Civil Engrs*. – 1979. – № 105. – P. 1155–1170.
66. Ghugh, A. K. Variable factor of safety in Slopes stability analysis / A. K. Ghugh // *Geotechnique*. – 1986. – № 1. – P. 57–64.

67. Hennes, R. G. Analysis and control of Landslides / R. G. Hennes. – Univ. of Washington Eng. Experiment Sta., Seattle; Washington, 1936. – P. 104–131.
68. Keizo, U. Three-dimensional Stability analysis of cohesive slopes // Proc. Jap., Soc. Civil Engineering. – 1985. – № 364. – P. 153–159.
69. Makoto, S. Probabilistic finite element method for slopes stability analysis / S. Makoto, J. Kiyoshi // Proc. Jap., Soc. Civil Engineering. – 1985. – № 364. – P. 199–208.
70. Narajan, C. G. P. Nonlocal variation method in stability analysis / C. G. P. Narajan, V. P. Bhatkar, T. Ramanurthy // J. of the Geotechn. Engineering Division. – 1982. – № 10. – P. 1443–1459.
71. Palladino, D. J. Slope Failures in an Overconsolidated Clay / D. J. Palladino, R. B. Peck // Geotechnique. – 1972. – № 4. – P. 563–595.
72. Sarma, S. Stability analysis of embankments and Slopes / S. Sarma // Journal of Geotechn. Engineering Division. – 1979. – № 12. – P. 1511–1524.
73. Smith, T. W. Slide and Correction / T. W. Smith, R. A. Forsyth // J. of Soil Mechanics and Foundations division. – 1984. – № 2. – P. 541–564.
74. Tschebotarioff, G. P. Soil Mechanics. Foundations and Earth Structures / G. P. Tschebotarioff. – New York, 1958. – 718 p.
75. Бахаева, С. П. Расчет устойчивости откосов при открытой геотехнологии : учеб. пособие / С. П. Бахаева; ФГБОУ ВПО "Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева". – Кемерово, 2011. – 158 с.
76. Тарасов, Е. Б. Разработка методики оценки устойчивости насыпных и намывных дамб: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е. Б. Тарасов. – Екатеринбург, 2007.
77. Прогноз устойчивости отвала вскрышных пород на намывном основании / Р. Г. Клейменов [и др.] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2008. – № 3. – С. 12–14.
78. Бабелло, В. А. Оценка устойчивости откосов отвалов вскрышных пород экспериментально-аналитическим методом / А. В. Бабелло, В. А. Стетюха, Ю. М. Овешников, В. Ю. Галинов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2001. – № 8. – С. 175–178.

79. Тер-Мартirosян, З. Г. Расчет напряженно-деформированного состояния массивов многофазных грунтов / З. Г. Тер-Мартirosян, Д. М. Ахпателов. – Москва : МИСИ, 1982.
80. Заворина, Е. Н. Прогноз устойчивости отвалов угольных разрезов с учетом влияния уплотняющей нагрузки на свойства насыпных пород: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Е. Н. Заворина. – Кемерово : КузГТУ, 2011.
81. Добров, Э. М. Механика грунтов / Э. М. Добров. – Москва : Академия, 2008. – 272 с.
82. Емельянова, Е. П. Сравнительный метод оценки устойчивости склонов и прогноза оползней / Е. П. Емельянова. – Москва : Недра, 1971 – 102 с.
83. Золотарев, Г. С. Методика инженерно-геологических исследований / Г. С. Золотарев. – Москва : Изд-во МГУ, 1990. – 384 с.
84. Маслов, Н. Н. Основы механики грунтов и инженерной геологии / Н. Н. Маслов. – Москва : Высшая школа, 1968.
85. Цветков, В. К. Расчет устойчивости откосов и склонов / В. К. Цветков. – Волгоград : Нижне-Волжское кн. изд-во, 1979. – 238 с.
86. Шадунц, К. Ш. Формирование и механизм развития оползней-потоков в глинистых породах: автореф. дис. ... д. г.-м. н. / К. Ш. Шадунц // / Моск. ун-т им. М. В. Ломоносова. Геол. фак. Каф. грунтоведения и инж. геологии. – Москва, 1976. – 40 с.
87. Шахунянц, Г. М. Расчет устойчивости склонов и откосов против скольжения пород / Г. М. Шахунянц // Материалы совещания по вопросам изучения оползней и мер борьбы с ними. – Киев : изд-во Киевского ун-та, 1964.
88. Шахунянц, Г. М. К вопросу выбора рациональных методов расчета склонов / Г. М. Шахунянц // Сборник трудов северокавказского семинара "Оползни и борьба с ними". – Ставрополь, 1964.
89. Указания по методам гидрогеомеханического обоснования оптимальных параметров гидроотвалов и отвалов на слабых основаниях. Ч. I: Изучение гидрогеомеханических условий строительства, эксплуатации и рекультивации отвальных сооружений. – Ленинград : ВНИМИ, 1989. – 56 с.

90. Освоение техногенных массивов на горных предприятиях / А. М. Гальперин [и др.]. – Москва : Горная книга, 2012. – 336 с.
91. Фисенко, Г. Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов / Г. Л. Фисенко. – 2-е изд. перераб. и доп. – Москва : Недра, 1965. – 378 с.
92. Фадеев, А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А. Б. Фадеев. – Москва : Недра, 1987. – 221 с.
93. Зверинский, В. Н. Определение параметров однородных и многослойных откосов / В. Н. Зверинский, Л. К. Либерман // Устойчивость откосов на карьерах. – Белгород ;Орджоникидзе, 1974.
94. Исомов, Р. Д. Оценка и прогноз устойчивости прибортового массива карьера с учетом особенностей его напряженного состояния: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Р. Д. Исомов // Москва: МГД им. А. А. Скочинского, 1988. – 16 с.
95. Федоренко, Е. В. Метод расчета устойчивости путем снижения прочностных характеристик / Е. В. Федоренко // Транспорт РФ. – 2013. – № 6. – С. 24–26.
96. GeoSoft разработка и продажа программ для геотехнических расчетов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.geo-soft.ru/> (дата обращения: 19.08.2015).
97. GEO Программы для геотехнических расчетов. – Режим доступа: <http://www.finesoftware.ru/> (дата обращения: 24.07.2015).
98. GEO-SLOPE. Software tools for geotechnical solutions. – Режим доступа: <http://www.geo-slope.com/> (дата обращения: 30.07.2015).
99. PLAXIS. – Режим доступа: <http://www.plaxis.ru/> (дата обращения: 30.07.2015).
100. ROCSCIENCE. – Режим доступа: <http://www.rocscience.com/> (дата обращения: 10.08.2015).
101. GenIDE32. – Режим доступа: <http://www.femsoft.ru/> (дата обращения: 2.08).
102. 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.

103. СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. – Москва : Минрегион России, 2012.
104. 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.
105. Покровский, Г. И. Исследования по физике грунтов / Г. И. Покровский. – Москва ; Ленинград : Главстройпром, 1937. – 136 с.
106. Статистика / И. И. Елисеева [и др.]; под ред. И. И. Елисеевой. – Москва : Проспект, 2010. – 448 с.
107. Рыжов, П. А. Математическая статистика в горном деле / П. А. Рыжов. – Москва : Высшая школа, 1973. – 287 с.
108. Мюллер, П. Таблицы по математической статистике / П. Мюллер, П. Нойман, Р. Шторм; пер. с нем. и предисл. В. М. Ивановой. – Москва : Финансы и статистика, 1982. – 278 с.
109. Гурьев, Д. В. Обобщение характеристик дисперсных грунтов техногенных массивов на примере Кузбасса / Д. В. Гурьев // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 3. – С. 31–36.
110. Михайлова, Т. В. Обоснование точности маркшейдерского мониторинга грунтовых дамб накопителей жидких отходов горнопромышленных предприятий: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Т. В. Михайлова. – Екатеринбург : УГГУ. – 2013.
111. Свидетельство № 2015617755 о государственной регистрации программы для ЭВМ "Устойчивая насыпь" / Гурьев Д. В., Караблин М. М.; заявл. 23.04.2015; № 2015613416; зарегистр. 22.07.2015.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Физико-механические характеристики техногенных суглинистых грунтов дамб
для условий Кузбасса

Таблица П.1.1

Наименование предприятия	Карьер "Каменушинский"
Наименование объекта	Дамба хвостохранилища
Организация, выполнившая изыскания	ООО "Геотехника"
Дата изысканий	февраль 2007 г.
Район расположения	Гурьевский

Тип грунта	Глу- бина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Скв. 3											
Сугл.	2	22	0,015	1,60	0,147	0,317	0,226	0,091	-0,87	0,93	0,43
Сугл.	4	19	0,015	1,56	0,215	0,395	0,272	0,123	-0,46	1,11	0,52
Сугл.	6	23	0,018	1,80	0,186	0,336	0,220	0,116	-0,29	0,78	0,64
Сугл.	8	23	0,020	1,85	0,184	0,307	0,218	0,089	-0,38	0,72	0,69
Сугл.	10	21	0,010	1,70	0,158	0,303	0,216	0,087	-0,67	0,83	0,51
Сугл.	12	22	0,023	1,87	0,247	0,314	0,228	0,086	0,22	0,79	0,84
Сугл.	15	23	0,033	2,02	0,229	0,303	0,204	0,099	0,25	0,64	0,97
Скв. 4											
Сугл.	2	21	0,010	1,75	0,164	0,296	0,213	0,083	-0,59	0,79	0,56
Сугл.	2	21	0,020	1,90	0,194	0,308	0,214	0,094	-0,21	0,69	0,76
Сугл.	2	22	0,022	1,97	0,218	0,321	0,224	0,097	-0,06	0,66	0,88
Сугл.	4	22	0,042	1,99	0,242	0,336	0,237	0,099	0,05	0,68	0,96
Сугл.	2	22	0,030	1,99	0,260	0,346	0,241	0,105	0,18	0,71	0,99
Скв. 5											
Сугл.	2	21	0,012	1,76	0,188	0,296	0,206	0,090	-0,20	0,82	0,62
Сугл.	4	21	0,018	1,92	0,290	0,338	0,239	0,099	0,52	0,81	0,97
Сугл.	6	22	0,022	1,93	0,298	0,332	0,239	0,093	0,63	0,81	0,99
Сугл.	8 ²⁵	21	0,027	1,93	0,304	0,356	0,252	0,104	0,50	0,82	1,00
Сугл.	10	22	0,023	1,95	0,288	0,351	0,238	0,113	0,44	0,78	0,99
Сугл.	12	23	0,033	2,02	0,227	0,290	0,206	0,084	0,25	0,63	0,96
Сугл.	15	23	0,067	2,00	0,262	0,384	0,244	0,140	0,13	0,72	0,99
Скв. 6											
Сугл.	2	22	0,015	1,69	0,145	0,304	0,208	0,096	-0,66	0,82	0,47
Сугл.	4	23	0,020	1,78	0,187	0,326	0,227	0,099	-0,40	0,79	0,63
Скв. 7											
Сугл.	3	19	0,012	1,96	0,279	0,300	0,209	0,091	0,77	0,76	0,99
Сугл.	6	19	0,015	1,98	0,267	0,307	0,210	0,097	0,59	0,72	1,00
Сугл.	9	22	0,023	1,98	0,274	0,346	0,232	0,114	0,37	0,74	1,00
Сугл.	12	23	0,053	2,03	0,235	0,356	0,236	0,120	-0,01	0,64	0,99
Сугл.	15	23	0,040	2,02	0,256	0,380	0,234	0,146	0,15	0,69	1,00
Скв. 9											
Сугл.	3	22	0,030	2,01	0,218	0,285	0,195	0,090	0,26	0,63	0,93

²⁵ Курсивом показаны свойства грунтов, находящихся ниже депрессионной кривой

Тип грунта	Глубина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Сугл.	6	21	0,018	2,05	0,225	0,287	0,196	0,091	0,32	0,61	1,00
Сугл.	9	21	0,012	2,04	0,235	0,291	0,195	0,096	0,42	0,63	1,00
Сугл.	12	21	0,027	1,99	0,264	0,322	0,227	0,095	0,39	0,71	1,00
Скв. 11											
Сугл.	6	34	0,080	2,19	0,151	0,354	0,230	0,124	-0,64	0,42	0,96
Скв. 12											
Сугл.	3	34	0,080	2,19	0,151	0,354	0,230	0,124	-0,64	0,42	0,96
Сугл.	6	23	0,033	1,98	0,260	0,348	0,228	0,120	0,27	0,73	0,97
Сугл.	9	23	0,027	2,05	0,238	0,320	0,210	0,110	0,25	0,63	1,02
Сугл.	12	30	0,046	1,98	0,272	0,395	0,287	0,108	-0,14	0,73	1,00
Сугл.	15	35	0,073	2,05	0,228	0,363	0,276	0,087	-0,55	0,61	1,00

Таблица П.1.2

Наименование предприятия	Кемеровская ГРЭС
Наименование объекта	Дамба золошлакоотвала
Организация, выполнившая изыскания	ООО "Геотехника"
Дата изыскания	декабрь 2006 г.
Район расположения	Кемеровский

Тип грунта	Глу- бина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Скв. С-1а											
Сугл.	4	24	0,047	2,09	0,110	0,263	0,178	0,085	-0,80	0,42	0,71
Сугл.	6	22	0,023	2,11	0,230	0,298	0,212	0,086	0,21	0,68	0,91
Сугл.	8	25	0,027	1,97	0,174	0,274	0,186	0,088	-0,14	0,51	0,92
Сугл.	10	23	0,020	2,09	0,218	0,345	0,207	0,138	0,08	0,64	0,93
Сугл.	12	21	0,007	2,11	0,252	0,294	0,198	0,096	0,56	0,68	1,00
Скв. С-1а-н											
Сугл.	2	19	0,033	1,93	0,265	0,444	0,274	0,170	-0,05	0,77	0,93
Сугл.	4	18	0,012	1,92	0,323	0,390	0,250	0,140	0,52	0,87	1,00
Скв. С-1-1											
Сугл.	2	24	0,043	2,03	0,156	0,402	0,262	0,140	-0,76	0,55	0,77
Сугл.	4	23	0,033	1,98	0,159	0,309	0,216	0,093	-0,61	0,57	0,74
Сугл.	6	22	0,013	1,96	0,262	0,318	0,229	0,089	0,37	0,73	0,96
Сугл.	8	21	0,012	1,96	0,235	0,303	0,208	0,095	0,28	0,69	0,91
Сугл.	10	24	0,015	1,98	0,231	0,303	0,209	0,094	0,23	0,67	0,92
Сугл.	12	22	0,013	1,91	0,284	0,390	0,249	0,141	0,25	0,83	0,93
Скв. С-2-1											
Сугл.	2	23	0,028	1,95	0,140	0,282	0,204	0,078	-0,82	0,57	0,66
Сугл.	6	23	0,067	2,04	0,126	0,280	0,210	0,070	-1,20	0,49	0,68
Сугл.	8	23	0,018	1,99	0,250	0,300	0,221	0,079	0,37	0,68	0,98
Скв. С-3-1											
Сугл.	7	21	0,018	1,94	0,294	0,333	0,218	0,115	0,66	0,80	0,99

Тип грунта	Глубина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Сугл.	10	23	0,018	1,94	0,263	0,339	0,220	0,119	0,36	0,76	0,94
Скв. С-4-1											
Сугл.	2	23	0,032	2,02	0,182	0,298	0,205	0,093	-0,25	0,57	0,85
Сугл.	6	23	0,033	1,98	0,255	0,358	0,254	0,104	0,01	0,71	0,97
Сугл.	10	23	0,018	1,87	0,231	0,379	0,231	0,148	0,00	0,79	0,79
Скв. С-1-1н											
Сугл.	2	19	0,015	1,94	0,277	0,367	0,244	0,123	0,27	0,78	0,96
Сугл.	4	19	0,008	1,94	0,249	0,297	0,204	0,093	0,48	0,73	0,92
Скв. С-3а											
Сугл.	5	21	0,053	2,03	0,196	0,302	0,208	0,094	-0,13	0,58	0,90
Скв. ШЗп4											
Сугл.	1	22	0,023	1,91	0,255	0,399	0,245	0,154	0,06	0,79	0,88
Скв. С-5-1											
Сугл.	7	23	0,027	1,99	0,231	0,326	0,213	0,113	0,16	0,67	0,93
Сугл.	11	35	0,013	1,98	0,239	-	-	-	-	0,66	0,96
Скв. С-6-1											
Сугл.	4	23	0,018	1,90	0,284	0,375	0,254	0,121	0,25	0,84	0,92
Сугл.	6	24	0,022	1,95	0,272	0,388	0,260	0,128	0,09	0,77	0,96
Сугл.	8	27	0,015	1,95	0,235	0,299	0,211	0,088	0,27	0,70	0,90
Сугл.	10	23	0,057	2,01	0,235	0,421	0,260	0,161	-0,16	0,66	0,96

Таблица П.1.3

Наименование предприятия	Коксохимический завод
Наименование объекта	Дамба накопителя
Организация, выполнившая изыскания	ООО "Геотехника"
Дата изыскания	2004 г.
Район расположения	Ленинск-Кузнецкий

Тип грунта	Глу- бина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Скв. С-1											
Сугл.	2	22	0,010	1,87	0,250	0,300	0,200	0,100	0,50	0,80	0,84
Сугл.	5	18	0,011	1,76	0,340	0,390	0,250	0,140	0,64	1,07	0,86
Сугл.	8	16	0,015	1,97	0,240	0,290	0,190	0,100	0,50	0,70	0,93
Сугл.	11	17	0,030	1,99	0,250	0,320	0,200	0,120	0,42	0,70	0,97
Сугл.	14	16	0,018	1,91	0,280	0,330	0,210	0,120	0,58	0,81	0,93
Сугл.	17	22	0,030	1,96	0,280	0,360	0,220	0,140	0,43	0,78	0,98
Сугл.	20	20	0,017	1,93	0,280	0,340	0,210	0,130	0,54	0,80	0,95
Скв. С-2											
Сугл.	3	24	0,023	1,95	0,190	0,280	0,180	0,100	0,10	0,64	0,80
Сугл.	6	17	0,015	1,96	0,220	0,260	0,170	0,090	0,56	0,67	0,88
Сугл.	9	19	0,035	1,97	0,210	0,340	0,200	0,140	0,07	0,67	0,85

Тип грунта	Глубина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Сугл.	12	20	0,053	2,00	0,260	0,370	0,230	0,140	0,21	0,71	0,99
Сугл.	16	23	0,038	1,98	0,260	0,350	0,220	0,130	0,31	0,72	0,97
Сугл.	20	21	0,047	1,95	0,260	0,340	0,220	0,120	0,33	0,74	0,94
Скв. С-3											
Сугл.	2	14	0,008	1,62	0,170	0,300	0,200	0,100	-0,30	0,94	0,49
Сугл.	5	23	0,022	1,97	0,170	0,280	0,180	0,100	-0,10	0,60	0,77
Сугл.	9	18	0,021	2,02	0,210	0,280	0,180	0,100	0,30	0,61	0,92
Сугл.	12	22	0,005	1,95	0,230	0,270	0,180	0,090	0,56	0,70	0,89
Сугл.	14	19	0,010	1,98	0,250	0,280	0,180	0,100	0,70	0,70	0,96
Сугл.	16	17	0,040	1,98	0,250	0,360	0,230	0,130	0,15	0,71	0,95
Сугл.	18	16	0,037	1,96	0,260	0,350	0,230	0,120	0,25	0,74	0,95
Сугл.	20	20	0,033	1,96	0,260	0,310	0,210	0,100	0,50	0,73	0,96
Скв. С-4											
Сугл.	2	17	0,030	1,95	0,180	0,270	0,170	0,100	0,20	0,63	0,77
Сугл.	3	18	0,027	1,86	0,270	0,360	0,230	0,130	0,46	0,85	0,86
Сугл.	5	22	0,020	1,87	0,200	0,250	0,180	0,070	0,71	0,72	0,74
Сугл.	8	22	0,008	1,97	0,250	0,280	0,180	0,100	0,83	0,71	0,95
Сугл.	11	22	0,040	1,98	0,260	0,350	0,220	0,130	0,31	0,72	0,97
Сугл.	14	24	0,023	1,93	0,290	0,370	0,240	0,130	0,38	0,81	0,97
Сугл.	17	19	0,045	1,95	0,250	0,350	0,220	0,130	0,23	0,74	0,92
Сугл.	20	19	0,057	1,97	0,250	0,360	0,230	0,130	0,15	0,72	0,94

Таблица П.1.4

Наименование предприятия	МУП "Котельные и тепловые сети"
Наименование объекта	Дамба золошлакоотвала
Организация, выполнившая изыскания	ООО "Геотехника"
Дата изыскания	май 2007 г.
Район расположения	Междуреченский

Тип грунта	Глу- бина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Скв. 1											
Сугл.	7	19	0,015	1,91	0,286	0,315	0,228	0,087	0,67	0,81	0,95
Скв. 2											
Сугл.	1,5	21	0,012	1,95	0,248	0,359	0,246	0,113	0,02	0,73	0,92

Таблица П.1.5

Наименование предприятия	ОАО "Ново – Кемеровская ТЭЦ"
Наименование объекта	Дамба золошлакоотвала
Организация, выполнившая изыскания	ООО "Геотехника"
Дата изыскания	2004 г.
Район расположения	Кемеровский

Тип грунта	Глу- бина, м	Физико-механические свойства грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Скв. С-100											
Сугл.	2	19	0,060	2,01	0,223	0,365	0,234	0,131	-0,08	0,65	0,93
Скв. 53а											
Сугл.	10	21	0,013	1,93	0,306	0,351	0,252	0,099	0,55	0,82	1,00
Скв. 56а											
Сугл.	2	15	0,009	1,82	0,390	0,471	0,309	0,162	0,50	1,08	0,98
Скв. 57а											
Сугл.	4	21	0,027	1,93	0,293	0,397	0,257	0,140	0,26	0,82	0,97
Скв. 05											
Сугл.	2	17	0,015	1,84	0,307	0,406	0,270	0,136	0,27	0,93	0,90
Сугл.	4	21	0,018	1,86	0,300	0,388	0,258	0,130	0,32	0,89	0,91
Скв. 35											
Сугл.	2	17	0,008	1,80	0,374	0,469	0,329	0,140	0,32	1,05	0,96
Скв. 36											
Сугл.	2	17	0,029	1,89	0,306	0,420	0,268	0,152	0,25	0,86	0,96
Скв. 37											
Сугл.	2	18	0,027	1,86	0,318	0,420	0,260	0,160	0,36	0,91	0,94
Скв. 38											
Сугл.	5	19	0,012	1,95	0,292	0,341	0,238	0,103	0,52	0,79	1,00
Скв. 39											
Сугл.	3	19	0,027	1,95	0,274	0,365	0,234	0,131	0,31	0,78	0,96
Скв. 40											
Сугл.	2	22	0,029	1,90	0,299	0,402	0,256	0,146	0,29	0,86	0,95
Скв. 42											
Сугл.	2	19	0,023	1,82	0,313	0,413	0,262	0,151	0,34	0,93	0,90
Скв. 43											
Сугл.	5	17	0,015	1,90	0,336	0,408	0,263	0,145	0,50	0,91	1,00
Скв. 44											
Сугл.	3	18	0,020	1,90	0,325	0,402	0,257	0,145	0,47	0,90	0,99
Скв. 45											
Сугл.	2	28	0,023	1,92	0,279	0,352	0,251	0,101	0,28	0,79	0,95
Сугл.	4	22	0,013	1,90	0,317	0,411	0,286	0,125	0,25	0,87	0,98
Скв. 47											
Сугл.	4	19	0,008	1,84	0,382	0,436	0,303	0,133	0,59	1,04	1,00
Скв. 48											
Сугл.	2	25	0,007	1,80	0,440	0,522	0,357	0,165	0,50	1,18	1,00
Сугл.	5	22	0,014	1,93	0,312	0,416	0,261	0,155	0,33	0,85	1,00
Скв. 49											
Сугл.	3	23	0,009	1,84	0,374	0,491	0,322	0,169	0,31	1,04	0,98
Сугл.	5	23	0,017	1,91	0,337	0,440	0,274	0,166	0,38	0,91	1,00

Тип грунта	Глу- бина, м	Физико-механические свойства грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Скв. 51											
Сугл.	5	25	0,016	1,99	0,260	0,292	0,222	0,070	0,54	0,69	1,00
Скв. 52											
Сугл.	6	23	0,015	1,92	0,317	0,405	0,278	0,127	0,31	0,87	1,00
Скв. 53											
Сугл.	3	23	0,018	1,91	0,322	0,360	0,238	0,122	0,69	0,88	1,00
Скв. 54											
Сугл.	2	27	0,005	1,83	0,396	0,478	0,315	0,163	0,50	1,06	1,00
Сугл.	5	22	0,015	1,91	0,332	0,447	0,292	0,155	0,26	0,90	1,00
Скв. 55											
Сугл.	10	19	0,012	1,93	0,303	0,341	0,239	0,102	0,63	0,82	1,00
Скв. 59											
Сугл.	10	21	0,013	1,92	0,307	0,351	0,260	0,091	0,52	0,83	0,99
Скв. 61											
Сугл.	8	21	0,013	1,86	0,290	0,338	0,222	0,116	0,59	0,87	0,90
Скв. 65											
Сугл.	8	20	0,014	1,94	0,289	0,318	0,247	0,071	0,59	0,78	0,99
Скв. 67											
Сугл.	8	18	0,017	1,88	0,337	0,375	0,269	0,106	0,64	0,92	0,99
Сугл.	9	22	0,012	1,89	0,340	0,396	0,268	0,128	0,56	0,92	1,00
Скв. 69											
Сугл.	9	19	0,008	1,76	0,324	0,402	0,290	0,112	0,30	1,03	0,85
Сугл.	10	21	0,027	1,96	0,290	0,378	0,250	0,128	0,31	0,78	1,00
Скв. 71											
Сугл.	9	18	0,014	1,86	0,315	0,358	0,260	0,098	0,56	0,90	0,94
Скв. 80											
Сугл.	7	28	0,010	1,84	0,326	0,423	0,312	0,111	0,13	0,95	0,93
Сугл.	9	21	0,018	1,91	0,308	0,402	0,266	0,136	0,31	0,86	0,98
Сугл.	10	22	0,026	1,95	0,293	0,381	0,263	0,118	0,25	0,79	1,00

Таблица П.1.6

Наименование предприятия	ЗАО "Салаирский химический комбинат"
Наименование объекта	Дамба хвостохранилища
Организация, выполнившая изыскания	ООО "Геотехника"
Дата изыскания	август 2006 г.
Район расположения	Гурьевский

Тип грунта	Глубина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Скв. 1											
Сугл.	18	27	0,015	2,00	0,105	0,242	0,272	0,195	-0,077	0,61	0,66
Скв. 5											
Сугл.	18	19	0,023	1,99	0,353	0,270	0,314	0,200	0,114	0,61	0,74

Таблица П.1.7

Наименование предприятия	Разрез "Сартакинский"
Наименование объекта	Ограждающая дамба
Организация, выполнившая изыскания	ООО "Геотехника"
Дата изыскания	2004 г.
Район расположения	Беловский

Тип грунта	Глу- бина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Скв. С-1											
Сугл.	9	21	0,032	1,92	0,230	0,290	0,200	0,09	0,33	0,72	0,86
Сугл.	12	24	0,035	1,90	0,200	0,280	0,180	0,10	0,20	0,70	0,77
Сугл.	15	18	0,040	1,96	0,220	0,270	0,180	0,09	0,44	0,67	0,88
Сугл.	18	22	0,030	1,88	0,290	0,360	0,240	0,12	0,42	0,85	0,92
Сугл.	21	25	0,041	1,83	0,320	0,400	0,280	0,12	0,33	0,95	0,91
Сугл.	24	22	0,030	1,98	0,250	0,300	0,200	0,10	0,50	0,70	0,96
Сугл.	27	20	0,037	1,93	0,280	0,360	0,230	0,13	0,38	0,80	0,95
Сугл.	30	23	0,031	1,94	0,270	0,330	0,220	0,11	0,45	0,77	0,95
Сугл.	33	24	0,023	1,98	0,260	0,310	0,220	0,09	0,44	0,71	0,98
Сугл.	36	17	0,040	1,98	0,250	0,300	0,200	0,10	0,50	0,70	0,96
Сугл.	39	27	0,030	1,95	0,280	0,350	0,240	0,11	0,36	0,77	0,98
Сугл.	42	22	0,052	2,00	0,250	0,330	0,230	0,10	0,20	0,68	0,99
Скв. С-2											
Сугл.	20	23	0,038	1,90	0,260	0,330	0,220	0,11	0,36	0,79	0,89
Сугл.	23	22	0,025	1,95	0,260	0,310	0,210	0,10	0,50	0,74	0,95
Сугл.	26	22	0,030	1,99	0,270	0,310	0,220	0,09	0,56	0,72	1,00
Сугл.	29	22	0,030	1,95	0,260	0,320	0,220	0,10	0,40	0,74	0,95
Сугл.	32	17	0,040	1,97	0,250	0,300	0,220	0,08	0,38	0,70	0,96
Сугл.	36	33	0,007	1,93	0,230	0,260	0,180	0,08	0,63	0,71	0,87
Скв. С-3											
Сугл.	10	23	0,015	1,97	0,240	0,290	0,200	0,09	0,67	0,72	0,97
Сугл.	20	22	0,058	1,98	0,220	0,400	0,250	0,15	-0,13	0,74	0,99
Сугл.	25	22	0,025	1,94	0,210	0,390	0,250	0,14	-0,21	0,79	0,96
Сугл.	30	22	0,023	1,93	0,230	0,340	0,240	0,10	-0,40	0,78	0,96
Сугл.	38	17	0,031	1,98	0,190	0,310	0,220	0,09	-0,44	0,71	0,98
Сугл.	42	33	0,030	1,99	0,230	0,320	0,220	0,10	0,46	0,72	1,00

Таблица П.1.8

Наименование предприятия	ОАО "ЦОФ Абашевская"
Наименование объекта	Дамба флотохвостохранилища
Организация, выполнившая изыскания	ООО "Геотехника"
Дата изыскания	ноябрь 2007 г.
Район расположения	Новокузнецкий

Тип грунта	Глу- бина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
		Скв. С-1									
Сугл.	30	29	0,010	2,01	0,240	0,320	0,200	0,120	0,33	0,67	0,97
		Скв. С-2									
Сугл.	32	21	0,023	1,94	0,270	0,350	0,200	0,150	0,47	0,78	0,94
		Скв. С-3									
Сугл.	31	18	0,021	1,84	0,330	0,420	0,260	0,160	0,44	0,96	0,93
		Скв. С-4									
Сугл.	32	21	0,021	1,99	0,260	0,330	0,190	0,140	0,50	0,72	0,98

Таблица П.1.9

Наименование предприятия	ОАО "ЦОФ Березовская"
Наименование объекта	Дамба гидроотвала
Организация, выполнившая изыскания	ООО "Геотехника"
Дата изыскания	февраль 2011 г.
Район расположения	Кемеровский

Тип грунта	Глу- бина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Скв. С-1											
Сугл.	2	23	0,037	1,89	0,284	0,380	0,276	0,104	0,08	0,83	0,92
Сугл.	4	19	0,017	1,77	0,359	0,418	0,293	0,125	0,53	1,08	0,90
Сугл.	5	18	0,011	1,96	0,289	0,346	0,218	0,128	0,55	0,78	1,00
Сугл.	6	14	0,008	1,87	0,340	0,353	0,235	0,118	0,89	0,93	0,98
Сугл.	7	19	0,012	1,98	0,270	0,325	0,195	0,130	0,58	0,74	0,99
Сугл.	8	22	0,022	1,97	0,270	0,338	0,243	0,095	0,28	0,73	0,99
Сугл.	10	18	0,083	2,02	0,240	0,411	0,267	0,144	-0,19	0,67	0,98
Сугл.	12	23	0,067	2,05	0,227	0,375	0,235	0,140	-0,06	0,63	0,98
Сугл.	14	22	0,072	2,08	0,201	0,293	0,203	0,090	-0,02	0,55	0,98
Сугл.	15	25	0,070	2,05	0,197	0,322	0,208	0,114	-0,10	0,58	0,92
Скв. С-3											
Сугл.	10	19	0,045	1,99	0,252	0,359	0,235	0,124	0,14	0,70	0,97
Сугл.	12	21	0,070	2,04	0,243	0,363	0,235	0,128	0,06	0,65	1,00
Сугл.	18	18	0,042	1,98	0,259	0,360	0,229	0,131	0,23	0,72	0,97
Сугл.	23	21	0,025	1,99	0,265	0,335	0,231	0,104	0,33	0,71	1,00
Сугл.	25	21	0,020	1,99	0,268	0,340	0,225	0,115	0,37	0,72	1,00
Сугл.	28	22	0,010	2,00	0,252	0,300	0,200	0,100	0,52	0,69	0,99
Сугл.	30	21	0,012	1,93	0,275	0,316	0,204	0,112	0,63	0,78	0,95
Сугл.	32	20	0,011	1,98	0,271	0,313	0,199	0,114	0,63	0,73	1,00
Скв. С-4											
Сугл.	12	18	0,073	2,04	0,210	0,371	0,235	0,136	0,18	0,61	0,93
Сугл.	15	28	0,067	2,07	0,212	0,359	0,233	0,126	0,17	0,59	0,98
Сугл.	17	19	0,023	1,93	0,298	0,365	0,256	0,109	0,39	0,82	0,99
Скв. С-5											
Сугл.	23	19	0,023	1,93	0,282	0,361	0,245	0,116	0,32	0,79	0,96
Сугл.	25	24	0,028	2,01	0,253	0,336	0,222	0,114	0,27	0,68	1,00

Таблица П.1.10

Наименование предприятия	ПО "Водоконал"
Наименование объекта	Дамба на р. Кара-Чумыш
Организация, выполнившая изыскания	ООО "Геотехника"
Дата изыскания	февраль 2006 г.
Район расположения	Прокопьевский

Тип грунта	Глубина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Скв. 1											
Сугл.	3	17	0,023	1,96	0,284	0,317	0,220	0,097	0,66	0,76	1,00
Скв. 2											
Сугл.	2	27	0,077	2,05	0,201	0,320	0,200	0,120	0,01	0,57	0,94
Сугл.	4	28	0,117	2,12	0,197	0,374	0,245	0,129	-0,38	0,53	1,00
Скв. 3											
Сугл.	3	11	0,005	1,88	0,338	0,345	0,230	0,115	0,94	0,94	0,97
Скв. 4											
Сугл.	6	24	0,080	2,09	0,217	0,432	0,266	0,166	-0,30	0,6	1,00
Сугл.	13	22	0,047	2,08	0,212	0,322	0,229	0,093	-0,18	0,57	1,00
Скв. 5											
Сугл.	3	15	0,043	1,84	0,333	0,544	0,377	0,167	-0,26	0,94	0,95
Скв. 6											
Сугл.	4	15	0,108	2,12	0,200	0,378	0,236	0,142	-0,25	0,54	1,00
Сугл.	11	11	0,069	2,04	0,232	0,363	0,225	0,138	0,05	0,64	0,99
Сугл.	18	18	0,113	2,13	0,187	0,333	0,222	0,111	-0,32	0,50	1,00
Сугл.	20,6	14	0,064	2,08	0,209	0,32	0,231	0,089	-0,25	0,56	1,00
Скв. 7											
Сугл.	6	15	0,035	2,00	0,255	0,336	0,232	0,104	0,22	0,68	1,00
Скв. 8											
Сугл.	5	21	0,067	2,12	0,188	0,313	0,213	0,100	-0,25	0,51	1,00
Сугл.	10	18	0,093	2,10	0,200	0,331	0,222	0,109	-0,20	0,54	0,99
Сугл.	15	17	0,090	2,10	0,203	0,341	0,213	0,128	-0,08	0,55	1,00

Таблица П.1.11

Наименование предприятия	ЗАО "Черниговец"
Наименование объекта	Дамба илонакопителя (Красный городок)
Организация, выполнившая изыскания	ЗАО "Спецфундаментстрой"
Дата изыскания	март 2003 г.
Район расположения	Кемеровский

Тип грунта	Глу- бина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r

Скв. 1

Тип грунта	Глу- бина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Сугл.	4	32	0,019	1,95	0,230	0,290	0,210	0,080	0,250	0,685	0,9
Сугл.	8	24	0,030	2,02	0,240	0,330	0,210	0,120	0,250	0,669	0,98
Сугл.	12	19	0,050	2,01	0,250	0,380	0,250	0,130	0,000	0,679	1,00
<i>Сугл.</i>	<i>15</i>	<i>22</i>	<i>0,056</i>	<i>2,06</i>	<i>0,230</i>	<i>0,360</i>	<i>0,220</i>	<i>0,140</i>	<i>0,070</i>	<i>0,635</i>	<i>0,99</i>
<i>Сугл.</i>	<i>18</i>	<i>19</i>	<i>0,020</i>	<i>1,95</i>	<i>0,300</i>	<i>0,380</i>	<i>0,250</i>	<i>0,130</i>	<i>0,380</i>	<i>0,832</i>	<i>0,98</i>
<i>Сугл.</i>	<i>19</i>	18	<i>0,045</i>	<i>1,93</i>	<i>0,290</i>	<i>0,380</i>	<i>0,250</i>	<i>0,130</i>	<i>0,310</i>	<i>0,832</i>	<i>0,95</i>
Скв. 2											
Сугл.	3,5	7	0,018	1,93	0,240	0,340	0,210	0,130	0,230	0,744	0,88
Сугл.	6,5	16	0,056	2,04	0,230	0,310	0,210	0,100	0,200	0,327	0,99
Сугл.	9	18	0,075	2,00	0,240	0,360	0,220	0,140	0,140	0,696	0,94
Сугл.	11,5	23	0,065	1,96	0,250	0,380	0,230	0,150	0,130	0,739	0,92

Таблица П.1.12

Наименование предприятия	ЗАО "Черниговец"
Наименование объекта	Дамба шламохранилища
Организация, выполнившая изыскания	ООО "Геотехника"
Дата изыскания	декабрь 2010 г.
Район расположения	Кемеровский

Тип грунта	Глу- бина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Скв. 2											
Сугл.	2	19	0,090	1,96	0,191	0,367	0,209	0,158	-0,11	0,65	0,80
Сугл.	4	22	0,090	2,04	0,244	0,423	0,253	0,170	-0,05	0,66	1,00
Сугл.	6	23	0,025	2,00	0,257	0,350	0,220	0,130	0,28	0,71	0,99
<i>Сугл.</i>	<i>8</i>	<i>22</i>	<i>0,030</i>	<i>1,98</i>	<i>0,258</i>	<i>0,345</i>	<i>0,231</i>	<i>0,114</i>	<i>0,24</i>	<i>0,71</i>	<i>0,98</i>

Таблица П.1.13

Наименование предприятия	Западно-Сибирская ТЭЦ
Наименование объекта	Дамба пруда-охладителя
Организация, выполнившая изыскания	ООО "Геотехника"
Дата изыскания	апрель 2005 г.
Район расположения	Новокузнецкий

Тип грунта	Глу- бина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Скв. 1											
Сугл.	4	23	0,020	1,99	0,264	0,375	0,225	0,150	0,26	0,73	0,99
Сугл.	6	21	0,020	1,97	0,275	0,377	0,231	0,146	0,30	0,76	0,98
Скв. 2											
Сугл.	2	22	0,040	2,09	0,181	0,278	0,186	0,092	-0,05	0,52	0,94
Сугл.	4	21	0,027	1,95	0,244	0,332	0,210	0,122	0,28	0,72	0,91
Сугл.	6	22	0,017	1,94	0,285	0,396	0,244	0,152	0,27	0,8	0,97
Скв. 3											

Тип грунта	Глубина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Сугл.	5	21	0,027	1,9	0,325	0,415	0,270	0,145	0,38	0,9	0,99
Скв. 4											
Сугл.	2	22	0,033	2,05							
Сугл.	4	19	0,030	1,88	0,214	0,357	0,212	0,145	0,01	0,61	0,95
Сугл.	6	25	0,023	1,98	0,331	0,425	0,279	0,146	0,36	0,93	0,97
Сугл.	8	23	0,009	1,9	0,280	0,430	0,287	0,143	-0,05	0,76	1,00
Скв. 5											
Сугл.	2	19	0,060	2,14	0,158	0,273	0,163	0,110	-0,05	0,46	0,93
Сугл.	4	18	0,070	2,12	0,197	0,336	0,199	0,137	-0,01	0,54	1,00
Сугл.	6	23	0,067	2,14	0,182	0,310	0,189	0,121	-0,06	0,49	1,00
Сугл.	8	21	0,013	1,93	0,300	0,319	0,220	0,099	0,81	0,81	0,99
Скв. 6											
Сугл.	4	19	0,028	1,93	0,318	0,453	0,272	0,181	0,25	0,87	1,00
Сугл.	6	21	0,027	1,90							
Скв. 7											
Сугл.	2	18	0,043	2,04	0,192	0,302	0,185	0,117	0,06	0,58	0,90
Сугл.	4	19	0,023	2,03	0,242	0,332	0,204	0,128	0,30	0,66	1,00
Сугл.	6	18	0,005	2,00	0,257	0,406	0,243	0,163	0,12	0,71	0,98
Сугл.	8	18	0,018	1,97	0,278	0,329	0,209	0,12	0,57	0,75	1,00
Скв. 8											
Сугл.	2	22	0,050	2,00	0,218	0,379	0,217	0,162	0,01	0,66	0,90
Сугл.	4	19	0,043	2,05	0,205	0,321	0,190	0,131	0,11	0,59	0,94
Сугл.	7	19	0,012	2,02	0,219	0,266	0,169	0,097	0,52	0,62	0,95
Скв. 9											
Сугл.	2	23	0,040	2,10	0,163	0,240	0,160	0,08	0,04	0,48	0,90
Сугл.	4	25	0,083	2,13	0,173	0,302	0,192	0,11	-0,11	0,49	0,96
Сугл.	6	19	0,023	2,00	0,256	0,325	0,206	0,119	0,44	0,7	0,99

Таблица П.1.14

Наименование предприятия	ОАО "Гурьевский металлургический завод"
Наименование объекта	Плотина гидроузла на реке Малый Бачат
Орган, выполнивший изыскания	ООО "Геотехника"
Дата изыскания	февраль 2004 г.
Район расположения	Гурьевский

Тип грунта	Глубина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Скв. 1											
Сугл.	2	23	0,045	1,90	0,240	0,380	0,23	0,15	0,07	0,78	0,84
Сугл.	4	19	0,067	2,01	0,240	0,370	0,23	0,14	0,07	0,68	0,96
Сугл.	6	15	0,032	1,92	0,250	0,340	0,22	0,12	0,25	0,76	0,89
Сугл.	8	20	0,049	1,92	0,180	0,290	0,19	0,10	-0,10	0,65	0,74
Сугл.	10	22	0,010	1,88	0,270	0,330	0,22	0,11	0,45	0,82	0,88
Скв. 2											
Сугл.	2	23	0,048	1,93	0,170	0,320	0,20	0,12	-0,25	0,64	0,72
Сугл.	4	20	0,049	1,81	0,330	0,360	0,24	0,12	0,75	0,98	0,91
Сугл.	6	20	0,049	1,95	0,240	0,320	0,21	0,11	0,27	0,72	0,90
Сугл.	8	21	0,053	2,03	0,180	0,320	0,20	0,12	-0,17	0,57	0,85

Тип грунта	Глубина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Сугл.	10	20	0,049	2,00	0,190	0,320	0,21	0,11	-0,18	0,61	0,85
Сугл.	12	20	0,049	2,00	0,180	0,310	0,20	0,11	-0,18	0,59	0,82
Сугл.	14	20	0,049	2,00	0,180	0,330	0,21	0,12	-0,25	0,59	0,82
Сугл.	16	17	0,015	1,99	0,250	0,280	0,19	0,09	0,67	0,69	0,98
Сугл.	18	22	0,015	1,91	0,290	0,290	0,19	0,10	1,00	0,82	0,96

Таблица П.1.15

Наименование предприятия	"Шахта Абашевская"
Наименование объекта	Дамба первичного отстойника
Орган, выполнивший изыскания	ООО "Стройизыскания"
Дата изыскания	май 2004 г.
Район расположения	Новокузнецкий

Тип грунта	Глу- бина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Скв. 1											
Сугл.	12	33	0,013	1,93	0,10	0,24	0,16	0,08	-0,88	0,53	0,51
Сугл.	18	28	0,078	1,56	0,13	0,25	0,16	0,09	-0,33	0,95	0,37
Сугл.	21	25	0,022	2,03	0,23	0,26	0,18	0,08	0,66	0,62	0,99
Скв. 2											
Сугл.	12	18	0,052	2,00	0,24	0,35	0,21	0,14	0,21	0,69	0,95
Сугл.	22	20	0,050	2,01	0,23	0,35	0,22	0,13	0,18	0,66	0,95
Сугл.	23	26	0,028	1,96	0,26	0,33	0,21	0,12	0,42	0,74	0,95

Таблица П.1.16

Наименование предприятия	ОАО "Шахта Заречная"
Наименование объекта	Дамба отстойника шахтных вод
Организация, выполнившая изыскания	ООО "Геотехника"
Дата изыскания	апрель 2005 г.
Район расположения	Ленинск-Кузнецкий

Тип грунта	Глу- бина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Скв. 1											
Сугл.	2	29	0,062	1,92	0,186	0,321	0,232	0,089	-0,52	0,66	0,76
Сугл.	4	21	0,013	1,94	0,272	0,310	0,204	0,106	0,64	0,77	0,95
Сугл.	6	22	0,014	1,94	0,261	0,313	0,199	0,114	0,54	0,76	0,93
Сугл.	7	19	0,030	2,02	0,232	0,322	0,194	0,128	0,31	0,65	0,96
Сугл.	10	21	0,023	2,03	0,231	0,299	0,199	0,100	0,32	0,64	0,97
Сугл.	12	18	0,053	2,02	0,195	0,406	0,246	0,160	-0,32	0,62	0,87
Скв. 2											
Сугл.	2	22	0,022	1,95	0,227	0,295	0,195	0,100	0,32	0,69	0,88
Сугл.	6	23	0,027	1,99	0,246	0,342	0,213	0,129	0,26	0,70	0,96
Сугл.	8	19	0,030	1,98	0,213	0,311	0,206	0,105	0,07	0,65	0,88
Сугл.	12	18	0,080	2,03	0,181	0,431	0,261	0,170	-0,47	0,59	0,83
Скв. 3											
Сугл.	2	17	0,023	1,97	0,232	0,299	0,192	0,107	0,37	0,68	0,91
Сугл.	6	19	0,030	1,99	0,224	0,314	0,191	0,123	0,27	0,66	0,92

Тип грунта	Глубина, м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Сугл.	8	19	0,060	2,01	0,201	0,310	0,196	0,114	0,04	0,61	0,88
Сугл.	12	18	0,067	1,98	0,241	0,385	0,242	0,143	-0,01	0,7	0,93
Скв. 4											
Сугл.	4	23	0,140	2,06	0,161	0,319	0,196	0,123	-0,28	0,53	0,83
Сугл.	6	19	0,047	1,96	0,197	0,307	0,195	0,112	0,02	0,65	0,82
Сугл.	10	18	0,070	2,05	0,234	0,360	0,236	0,124	-0,02	0,63	1,00
Сугл.	15	25	0,100	2,11	0,196	0,428	0,258	0,170	-0,36	0,56	0,96
Скв. 5											
Сугл.	4	25	0,067	2,03	0,165	0,347	0,206	0,141	-0,29	0,56	0,80
Сугл.	6	19	0,028	1,94	0,234	0,312	0,197	0,115	0,32	0,72	0,88
Сугл.	8	18	0,013	1,87	0,272	0,314	0,208	0,106	0,60	0,84	0,88
Сугл.	10	21	0,053	1,96	0,233	0,420	0,254	0,166	-0,13	0,72	0,89

Таблица П.1.17

Наименование предприятия	ОАО "Шахта Полосухинская"
Наименование объекта	Дамба отстойника шахтных вод
Организация, выполнившая изыскания	ООО "Геотехника"
Дата изыскания	октябрь 2007 г.
Район расположения	Ленинск-Кузнецкий

Тип грунта	Глу- бина м	Физико-механические характеристики грунтов по скважинам									
		φ	C	ρ	W	W_l	W_p	I_p	I_l	e	S_r
Скв. 1											
Сугл.	3	16	0,024	1,99	0,240	0,35	0,200	0,15	0,27	0,69	0,94
Сугл.	5	19	0,023	1,96	0,280	0,38	0,230	0,15	0,33	0,78	0,98
Скв.2											
Сугл.	3	19	0,024	1,97	0,255	0,37	0,210	0,16	0,28	0,74	0,94
Сугл.	6	16	0,024	1,98	0,260	0,40	0,230	0,17	0,18	0,74	0,96
Сугл.	12	18	0,018	1,90	0,310	0,42	0,265	0,16	0,28	0,89	0,96
Скв. 3											
Сугл.	2	17	0,026	2,00	0,230	0,43	0,230	0,20	0	0,69	0,92
Сугл.	5	18	0,015	1,94	0,260	0,31	0,180	0,13	0,62	0,76	0,93
Скв. 4											
Сугл.	6	16	0,027	1,87	0,320	0,42	0,250	0,17	0,41	0,93	0,94
Сугл.	8	18	0,018	1,94	0,270	0,39	0,220	0,17	0,29	0,79	0,94
Скв.5											
Сугл.	8	17	0,029	1,95	0,280	0,45	0,280	0,17	0	0,79	0,97
Сугл.	10	18	0,018	1,91	0,290	0,36	0,210	0,15	0,53	0,84	0,94
Скв.6											
Сугл.	5	19	0,024	1,91	0,295	0,41	0,240	0,17	0,32	0,85	0,95
Сугл.	8	17	0,016	1,93	0,300	0,36	0,210	0,15	0,60	0,83	0,98

Таблица П.1.18

Наименование предприятия	ОАО "Кузбассразрезуголь" "Кедровский угольный разрез"
Наименование объекта	Гидроотвал №3
Организация, выполнившая изыскания	ООО "Геотехника"

Район расположения	Кемерово
--------------------	----------

Глубина, м	ρ , г/см ³	φ , градус	C , МПа
Скв №4-94			
4	1,75		
10	1,93	27	
15	1,95	33	0,004
18	1,94	25	0,008
24	1,97	24	0,013
27	2,03	28	0,010
34	1,96	24	
37	1,92	24	
40	1,80	-	-
Скв. 2-04			
3	1,97		
6	2,04		
9	2,08		
12	1,99		
15	2,07		
18	2,07		
21	2,00		
22	2,05		
24	1,86	27	0,023
27	1,96	19	0,014
30	1,85	19	0,019
33	1,89	10	0,023
36	1,85	10	0,050

Акты внедрения результатов исследований



Открытое акционерное общество
«Кузбасский головной институт по проектированию
угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий»

ОАО «КУЗБАССГИПРОШАХТ»



Management
System
ISO 9001:2008
www.tuv.com
ID 9105048804

650000, г. Кемерово
ул. Н. Островского, 34
E-mail: KGSN@KGSN.ru
www.KGSN.ru
приёмная ☎ (3842) 58-56-56
канцелярия ☎ (3842) 58-42-78
☎ (3842) 58-01-30

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ОАО "Кузбассгипрошахт"

В. Н. Каталицкий

_____ 2016 г.



**Акт внедрения
результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Гурьева Дмитрия Витальевича**

Настоящим актом подтверждаем, что обобщенные физико-механические характеристики дисперсных связных техногенно перемещенных природных суглинистых грунтов для условий Кемеровской области апробированы специалистами ОАО «Кузбассгипрошахт» на этапе предварительных оценок устойчивости грунтовых дамб.

Поверочные расчеты сдвигающих и удерживающих сил, действующих на откос грунтовой дамбы, выполнялись с использованием ПО «Устойчивая насыпь», разработанной Гурьевым Д. В. и Караблыным М. М. и имеющей свидетельство о государственной регистрации №2015617755 от 22.07.2015.

На основании изложенного выше считаем, что исследования, выполненные Д. В. Гурьевым, позволяют ускорить и повысить качество проектирования грунтовой дамбы за счет использования обобщенных физико-механических характеристик грунтов и ПО "Устойчивая насыпь". Методические рекомендации «Обобщение физико-механических характеристик техногенных глинистых грунтов» рекомендованы для использования в работе.

И.О. начальника отдела сантехники и
гидромеханизации

И.Б. Астафьева

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ООО "Геотехника"

В. Н. Сахаров

" 08 " июня 2016г.

М.П.

**Акт внедрения результатов исследований
соискателя ученой степени кандидата технических наук
Гурьева Д. В.**

Комиссия в составе: председатель комиссии – Сахаров В.Н., директор; члены комиссии – Минтянов Ю.В., главный геолог; Сахаров Е.В., начальник отдела экологии, настоящим актом подтверждает факт внедрения методики обобщения физико-механических характеристик дисперсных связных техногенно перемещенных природных глинистых грунтов, представленной в диссертационной работе *Гурьева Дмитрия Витальевича*.

Разработанный алгоритм используется для обработки собственных материалов изысканий по дисперсным связным глинистым грунтам другого геолого-генетического типа и разработки региональных таблиц. Обобщение характеристик грунта позволяет оценить вновь полученные результаты изысканий и выявить "ураганные" значения.

Результаты исследований Д. В. Гурьева, реализованные в виде алгоритма по обобщению физико – механических свойств дисперсных связных техногенно перемещенных природных глинистых грунтов и региональной таблицы характеристик техногенного грунта дамб, сложенных суглинком, представляют интерес для изыскательских организаций.

Члены комиссии: _____ В.Н. Сахаров

_____ Ю.В. Минтянов

_____ Е.В. Сахаров



УТВЕРЖДАЮ:

Директор

ООО «СГП-недра»

А.А. Агафонов

« 23 » июня 2016 г.

**АКТ**

об использовании результатов исследований,
выполненных в диссертационной работе на соискание ученой степени кандидата
технических наук *Гурьева Дмитрия Витальевича*

Номограммы для определения угла откоса грунтовой дамбы апробированы Инжиниринговой компанией ООО «СГП-недра» при разработке проектной документации для ОАО «УК «Кузбассразрезуголь» «Талдинский угольный разрез» в части проектирования ограждающей дамбы отстойника карьерных и ливневых вод на реке Большая Коровиха.

Поверочные расчеты сдвигающих и удерживающих сил, действующих на низовой откос дамбы, выполненные с использованием программы «Устойчивая насыпь» (подтвержденной Свидетельством о государственной регистрации №2015617755 от 22.07.2015), показали хорошую сходимость с результатами расчетов, произведенных специалистами Инжиниринговой компании ООО «СГП-недра».

Считаем, что результаты исследований, представленные в диссертационной работе Д. В. Гурьева и реализованные в виде номограмм для определения угла откоса грунтовой дамбы и программы «Устойчивая насыпь», представляют практический интерес для проектных организаций и позволят существенно сократить время для выбора оптимальных параметров дамб накопителей жидких отходов.

Начальник маркшейдерского отдела
ООО «СГП-недра»

Т. В. Поршнева

ИНН/КПП 4205086863/420501001
р/сч 407 028 100 120 300 006 03
филиал ОАО Банк ВТБ в г.Красноярск
к/сч 301 018 102 000 000 007 77
БИК 040 407 777

ООО «СГП-недра»
650066, Россия, Кемерово,
пр. Октябрьский 28 б
тф +7(3842) 45-16-16, 44-14-63
nedra@sgp.su www.sgp.su