

На правах рукописи



Абдулоев Алишер Бегмуратович

**ДЕФОРМАЦИОННАЯ АНИЗОТРОПИЯ ГАЛЕЧНИКА И ЕЕ УЧЕТ В
РАСЧЕТАХ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН**

2.1.6. Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва - 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Бестужева Александра Станиславовна

Официальные оппоненты: **Болдырев Геннадий Григорьевич**
доктор технических наук, профессор, ООО НПП «Геотек»,
директор по научной работе и инновациям

Хохлов Дмитрий Николаевич
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра «Гидротехнических и транспортных сооружений», доцент

Ведущая организация: Акционерное общество «Проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт «Гидропроект» имени С.Я. Жука».

Защита состоится 21 мая 2024 в 13:00 часов (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 9 студия «Открытая сеть».

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» и на сайте www.mgsu.ru

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



А.С. Бестужева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Строительство каменных и каменно-земляных плотин ведется в разных странах мира, в самых разнообразных геологических и топографических условиях, в том числе в районах с высокой сейсмичностью и низкими температурами. За счет использования местных строительных материалов эти плотины экономичны, а использование природных каменных галечниковых грунтов речной долины делает их надежными и долговечными. К числу каменно-земляных плотин относятся самые высокие плотины мира – Нурекская (Таджикистан -300 м), Тери (Индия-260 м), Оровилл (США-235), Кебан (Турция-210м) и многие другие.

Современные технологии позволяют придать галечниковым грунтам максимальную плотность, которая может достигать 23кН/м^3 , что позволяет добиться наиболее обжатого профиля плотины, однако при укатке такого материала возникает структурная анизотропия грунта. Так как более крупные частицы галечника имеют уплощенную форму, то при послойной укладке и уплотнении катками они ложатся горизонтально, ориентируясь большей площадью контакта вдоль направления уплотнения, что придает грунту наведенную слоистость. Подобная слоистость наблюдается и в плотинах из укатанного бетона, и при послойной укладке, и укатке глинистого грунта в ядре плотины. Естественно предположить, что и работа каждой отдельно взятой частицы галечника в теле плотины будет протекать по-разному в зависимости от направления действующей нагрузки, что придает в целом однородному материалу анизотропные свойства, проявляющиеся в различии фильтрационных и деформационных свойств по направлениям.

В грунтовых плотинах различие деформационных и прочностных характеристик грунта по направлениям слоистости ведет к перераспределению напряжений, учет этого фактора в расчетах напряженно-деформированного состояния и устойчивости откосов плотин позволяет повысить надежность обоснования их конструкций. В связи с этим, экспериментальное исследование анизотропных механических свойств гравийно-галечникового грунта и исследования влияние анизотропных свойств грунта на параметры устойчивости и прочности грунтовых плотин является актуальной темой научного исследования.

Степень разработанности темы исследования. В задачах геомеханики явления анизотропии физико-механических свойств грунтов, связанные с природной слоистостью, хорошо известны и описаны в работах В. Фойгт, И.В. Попов, П.М. Райтбурд, А.П. Клевезаль, И.С. Башинджагян, П.Д. Вулис, А.В. Степанов. В настоящее время в литературе мало данных об экспериментальных исследованиях деформационной анизотропии гравийно-галечниковых грунтов, имеются работы, проводимые в лаборатории геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством проф. Е.А. Вознесенского с

модельными крупнообломочными грунтами, весьма детально изучены вопросы деформационной анизотропии на примере глинистых грунтов в работах Franklin A.G., Graham J., Kirkgard M.M., Saada A.S., В.Х. Уорд, С.Ж. Самуэл, Л. Берден, А.К. Лоу, Р.Т. Холт А.К. Бугров, А.А. Исаков, В.М. Фурса, Г.Г. Болдырева, З.Г. Тер-Мартirosяна и др.

В практике плотиностроения гравийно-галечниковые грунты занимают особое место, т. к. упорные призмы высоких и сверхвысоких грунтовых плотин часто выполняются из галечниковых грунтов, отсыпаемых с послойным уплотнением до достижения заданной плотности.

Задача о распределении напряжений в основаниях с учетом анизотропных свойств грунтов имеет долгую историю исследований многочисленными учеными: Лехницкий С.Г., Зенкевич О., К. Вольф, Л. Барден, Абелев М.Ю., Болдырев Г.Г. и Идрисов И.Х., Голдштейн М.Н. и Лапкин В.Б., Набоков И.М., А.В. Школа, Мартиросяна З.Г., Коробова О.А. и др. Однако, отсутствуют данные о напряженно-деформированном состоянии грунтовых плотин с учетом анизотропных механических свойств грунтов тела плотины.

Исследования устойчивости склонов с учетом анизотропного строения грунтовых и скальных массивов даны в работах Зеркаль О.В., Фоменко И.К., Кремнева А.П., Вишнякова Н.Н., Седун Е.А. и других. В большинстве работ рассматриваются скальные массивы (склона) с разными углами напластования более слабых в прочностном отношении прослоек, линз, вдоль которых задаются отличные от всего массива параметры прочности материала. Однако, в грунтовых плотинах прочностные характеристики на поверхности сдвига зависят от напряженно-деформированного состояния грунта в сооружении и в настоящее время отсутствуют расчетные методы по оценке устойчивости откосов грунтовых плотин с учетом прочностной анизотропии грунтов тела плотины.

Объект исследования – каменные и каменно-земляные плотины.

Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние, прочность и устойчивости откосов грунтовых плотин с учетом деформационной и прочностной анизотропии гравийно-галечникового грунта в теле плотины.

Цель исследования. Целью диссертационной работы является разработка методики учета анизотропных свойств гравийно-галечникового грунта в расчетах прочности и устойчивости грунтовых плотин на основе экспериментального изучения механических свойств гравийно-галечникового грунта в условиях сложного напряженного состояния на разных траекториях нагружения.

Задачи исследования. Для достижения цели диссертационных исследований, были поставлены следующие задачи:

1. Разработка методики экспериментального исследования анизотропных механических

свойств гравийно-галечникового грунта;

2. Проведение экспериментальных исследований анизотропных свойств гравийно-галечникового грунта при различных условиях нагружений грунта в приборах: одомере, в вакуумном стабилонетре и в большом трехосном стабилонетре «АСИС».

3. Получение модулей деформации гравийно-галечникового грунта, послойно уложенного в тело плотины с горизонтальной ориентацией частиц: вдоль оси слоистости - E_{\parallel} и перпендикулярно оси слоистости - E_{\perp} и соответствующих им углов внутреннего трения - φ_{\parallel} и φ_{\perp} .

4. Получение зависимостей для коэффициентов анизотропии гравийно-галечникового грунта по параметру деформируемости $\eta = \frac{E_{\parallel}}{E_{\perp}} = f(\sigma)$ и по параметру прочности $\Psi = \frac{\varphi_{\parallel}}{\varphi_{\perp}} = f(\sigma)$.

5. Построение функциональных связей для углов сдвига галечникового грунта в теле плотины в зависимости от напряженно-деформированного состояния плотины и плотности укладки грунта.

6. Разработка методики учета прочностной анизотропии грунта в расчетах устойчивости откосов грунтовых плотин в ПК ОТКОС-22;

7. Построение номограмм с корректирующими коэффициентами $K_{кор}^{ан.}$ для учета анизотропии грунта в расчетах устойчивости откосов на основе серий расчетов плотин разной конструкции и разной высоты с заданными параметрами анизотропных свойств грунтов;

8. Проведение исследования напряженно-деформированного состояния Нурекской плотины по модели анизотропного грунта в ПК Plaxis и сопоставление результаты расчетов с результатами натуральных наблюдений.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана методика экспериментального исследования анизотропных свойств гравийно-галечникового грунта, уложенного в призмы грунтовых плотин на приборах: одомере, вакуумном стабилонетре, большом трехосном стабилонетре «АСИС».

2. Получены зависимости деформационных и прочностных характеристик гравийно-галечникового грунта по направлению вдоль оси слоистости и перпендикулярно оси слоистости в виде модулей деформации E_{\parallel} и E_{\perp} и углов внутреннего трения φ_{\parallel} и φ_{\perp} , а также коэффициентов анизотропии в виде функций $\eta = \frac{E_{\parallel}}{E_{\perp}} = f(\sigma)$ (коэффициент деформационной анизотропии) и $\Psi = \frac{\varphi_{\parallel}}{\varphi_{\perp}} = f(\sigma)$ (коэффициент прочностной анизотропии).

3. Получены зависимости, позволяющие описать изменение прочностных свойств гравийно-галечникового грунта, послойно уложенного в тело грунтовой плотины, в

зависимости от его напряженно-деформированного состояния на площадке сдвига в диапазоне плотности $16 \div 22$ кН/м³ в виде функции $\varphi = f(\varphi_{\parallel}; \varphi_{\perp}; \gamma; \alpha)$.

4. Разработана методика учета прочностной анизотропии грунта в расчетах устойчивости откосов грунтовых плотин, реализованная в программном коде ПК ОТКОС - 22.

5. Построены номограммы корректирующих коэффициентов $K_{кор}^{ан.}$ для учета анизотропных свойств гравийно-галечникового грунта в расчетах устойчивости откосов грунтовых плотин разной конструкции (плотина с ядром, с диафрагмой, с экраном) и разной высоты (от 50м до 300м) для основного и особого сочетания нагрузок (сейсмических).

6. Проведено сопоставление результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния Нурекской плотины с учетом анизотропных свойств гравийно-галечникового грунта в ПК Plaxis-2D с данными натурных наблюдений.

Теоретическая значимость работы состоит в следующем:

1. На основе экспериментальных исследований доказано различие деформационных и прочностных свойств по взаимно перпендикулярным направлениям (горизонтальному и вертикальному) у гравийно-галечникового грунта, уложенного в тело грунтовой плотины, что относит этот грунт к трансверсально-изотропным грунтам.

2. Получены зависимости для коэффициентов деформационной и прочностной анизотропии: $\eta = f(\sigma)$ и $\Psi = f(\sigma)$ соответственно, согласно которым максимальный коэффициент деформационной анизотропии около 2-х получен при минимальных напряжениях, при этом максимальная разница в углах внутреннего трения составляет около $3^{\circ} \div 5^{\circ}$.

3. В численных исследованиях устойчивости откосов грунтовых плотин по ПК ОТКОС-22 выявлено, что учет анизотропных свойств гравийно-галечникового грунта ведет к снижению коэффициента надежности, что необходимо учитывать при проектировании плотин, в том числе с использованием разработанных в диссертации номограмм.

4. Использование полученных в экспериментах анизотропных характеристик гравийно-галечникового грунта в расчетах напряженно-деформированного состояния высокой грунтовой плотины в ПК Plaxis2D по модели анизотропного грунта «JR» доказало их адекватность при сопоставлении результатов расчетов с данными натурных наблюдений.

Практическая значимость работы состоит в том, что:

1. Полученные значения коэффициентов прочностной и деформационной анизотропии гравийно-галечникового грунта могут быть использованы в расчетах устойчивости и напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин по моделям трансверсально-изотропных грунтов.

2. Разработана методика учета прочностной анизотропии гравийно-галечникового грунта в расчетах устойчивости откосов грунтовой плотины с учетом особенностей ее конструкции и

напряженно-деформированного состояния.

3. Построены номограммы для определения корректирующего коэффициента анизотропии $K_H^{ан}$, позволяющего оценить устойчивость откосов плотин разной конструкции и разной высоты с учетом анизотропных свойств гравийно-галечникового грунта тела плотины, по формуле:

$$K_H^{ан} = K_H \cdot K_{кор}^{ан}.$$

4. Разработана усовершенствованная конструкция вакуумного стабилометра, которая может быть использована для определения механических свойств грунтов на траектории всестороннего сжатия при напряжениях до 1 кг/см².

5. Построен паспорт прочности для анизотропного гравийно-галечникового грунта модельного состава по результатам экспериментов на приборе трехосного сжатия.

Методология и методы исследования:

Экспериментальные исследования анизотропных механических свойств гравийно-галечникового грунта, уложенного послойно, с уплотнением проводились в лабораториях НИУ МГСУ «Динамика сооружений» и НОЦ «Геотехника» на сертифицированном оборудовании: универсальная электромеханическая машина “Instron 1000HDX” и автоматизированный испытательный комплекс «АСИС» (прибор трехосного испытания)

Численные исследования напряженно-деформированного состояния и устойчивость откосов грунтовых плотин выполнены в ПК «Откос-386» и ПК «ОТКОС-22», разработанных на кафедре Гидравлики и гидротехнического строительства НИУ МГСУ, в ПК Plaxis2D.

Степень достоверности результатов исследований, проведенных соискателем ученой степени, обусловлена: проведением экспериментальных исследований в лабораториях НИУ МГСУ «Динамика сооружений» и НОЦ «Геотехника» на сертифицированном оборудовании: универсальная электромеханическая машина “Instron 1000HDX” (Instron Corp., США, 2008 г.) и автоматизированный испытательный комплекс «АСИС» (Производитель ООО «НПП Геотек», Россия, 2015 г.); согласованностью результатов экспериментальных исследований крупнозернистого грунта с данными других авторов: Р. Дж. Марсала, А. К. Гупта, Л. Н. Рассказова, П. И. Гордиенко, Ю. К. Зарецкого, А. А. Кагана и др.; проведением численных исследований прочности и устойчивости грунтовой плотины с учетом полученных экспериментальных данных по сертифицированному ПК Plaxis-2D и ПК Откос-22; сопоставлением расчетных результатов с натурными данными наблюдений за осадками и смещениями Нурекской плотины.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментальное обоснование наличия деформационной и прочностной анизотропии у гравийно-галечникового грунта, укладываемого послойно с уплотнением в теле плотины, на основании проведенных исследований механических свойств грунта приборах: одометре, в

вакуумном стабилометре, в большом трехосном стабилометре «АСИС».

2. Методика получения зависимостей для прочностных характеристик гравийно-галечникового грунта в теле плотины в зависимости от плотности укладки грунта и напряженно-деформированного состояния плотины в виде графиков и диаграммы эллипса.

3. Методика учета прочностной анизотропии грунта в расчетах устойчивости откосов грунтовых плотин, позволяющая описать изменение прочностных свойств анизотропного гравийно-галечникового грунта, в зависимости от его напряженно-деформированного состояния с точки зрения величины нормальных напряжений на площадке сдвига и направления вектора главных напряжений σ_{\max} по отношению к оси слоистости грунта.

4. Методика построения номограмм с корректирующими коэффициентами $K_{\text{кор}}^{\text{ан}}$, позволяющая получить значения коэффициентов запаса устойчивости откосов с учетом прочностной анизотропии грунта для грунтовых плотин разной конструкции и разной высоты.

5. Сопоставление результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния Нурекской плотины с учетом анизотропных свойств гравийно-галечникового грунта в ПК Plaxis-2D с данными натурных наблюдений.

Личный вклад соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации, заключается: в формулировании задач и постановке экспериментов по теме исследования, разработке и создании конструкций приборов для испытаний грунта (одометра и вакуумного стабилометра), проведении экспериментальных исследований, обработке результатов экспериментов; в анализе и разработке методики расчета устойчивости откосов плотин с учетом прочностной анизотропии грунта, в проведении численных исследований устойчивости откосов по ПК Откос-22 и напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин по ПК Plaxis-2D с учетом анизотропных свойств грунтов, сопоставлении полученных результатов с данными других авторов и данными натурных наблюдений.

Степень достоверности результатов исследований, проведенных соискателем ученой степени, обусловлена: проведением экспериментальных исследований в лабораториях НИУ МГСУ «Динамика сооружений» и НОЦ «Геотехника» на сертифицированном оборудовании: универсальная электромеханическая машина “Instron 1000HDX” (Instron Corp., США, 2008 г.) и автоматизированный испытательный комплекс «АСИС» (Производитель ООО «НПП Геотек», Россия, 2015 г.); согласованностью результатов экспериментальных исследований крупнозернистого грунта с данными других авторов: Р. Дж. Марсала, А. К. Гупта, Л. Н. Рассказова, П. И. Гордиенко, Ю. К. Зарецкого, А. А. Кагана и др.; проведением численных исследований прочности и устойчивости грунтовой плотины с учетом полученных экспериментальных данных по сертифицированному ПК Plaxis-2D и ПК Откос-22; сопоставлением расчетных результатов с натурными данными наблюдений за осадками и смещениями Нурекской плотины.

Апробация результатов. Результаты исследований и основные научные положения диссертационной работы докладывались и получили положительную оценку на всероссийских и международных конференциях: Международная научная конференция «Строительство, Гидротехника и водные ресурсы» (CONMECHYDRO – 2020), г. Ташкент, 23-25 апреля 2020г.; II совместная Научно-практическая конференция ГБУ «ЦЭИИС» и ИПРИМ РАН. «Обеспечение качества, безопасности и экономичности строительства. Практика. Проблемы. Перспективы. Инновации» (г. Москва, 2019 г.); III – й Всероссийский научно-практический семинар «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства» (г. Москва, Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 2020 г.); IV – й Всероссийский научно-практический семинар «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства» (г. Москва, Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 2021 г.); XXVI Международная научная конференция «Строительство – формирование среды жизнедеятельности» (FORM-2023)), г. Ташкент, 26-28 апреля 2023г.; VI – й Всероссийский научно-практический семинар «Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства» (г. Москва, Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 2023 г.); 15 научно-техническая конференция ВНИИГ «Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии» (г. Санкт-Петербург, 2023 г.)

Публикации. Материалы диссертации изложены в 12 научных публикациях, из которых 4 работы опубликованы в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (Перечень рецензируемых научных изданий), 1 работа опубликована в журнале из международной базы цитирования Scopus и 7 публикаций в других научных журналах и изданиях.

Структура и объем диссертации: Диссертационная работа включает в себя: введение, пять глав, заключение и список литературы из 117 наименований. Объем диссертационной работы составляет 167 страниц, в том числе 101 рисунок и 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследований; дана оценка степени её разработанности; определены цели и задачи исследований; отмечены научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы; изложены основные положения, выносимые на защиту; отражены степень достоверности и апробация результатов; приведены сведения о структуре и объёме диссертации.

В **первой главе** обобщены результаты экспериментальных и теоретических

исследований деформационной и прочностной анизотропии грунтов. Приведены примеры расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтового основания и устойчивости склонов с учетом анизотропных механических свойств грунтов.

Анализ рассмотренных в обзоре работ показал, что о наличии анизотропных свойств скальных и нескальных грунтов было известно в 50-е годы прошлого века и эти вопросы исследовали ученые: С.Г. Лехницкий, О. Зенкевич, В. Фойгт, И.В. Попов, П.М. Райтбурд, А.П. Клевезаль., И.С. Башинджагян, П.Д. Вулис, А.В. Степанов, А.К. Бугров, А.И. Голубев, М.Ю. Абелев, Г.Г. Болдырев, В.М. Фурса, З.Г. Тер-Мартirosян, Ю.К. Зарецкий, М.Н. Гольдштейн, И.М. Набоков, А.В. Школа, Коробова О.А. и др. Вопросы деформационной и прочностной анизотропии хорошо изучены на примере глинистых грунтов, однако в настоящее время в литературе отсутствуют работы, посвященные экспериментальным исследованиям по определению анизотропных механических свойств гравийно-галечниковых грунтов (ГГГ). Также, отсутствуют методы учета анизотропных свойств ГГГ в расчетах НДС и в расчетах устойчивости откосов грунтовых плотин.

Во второй главе приводятся результаты экспериментальных исследований ГГГ в двухштамповом одометре и в вакуумном стабилометре. Целью экспериментальных исследований в рамках диссертационной работы, являлось выявление деформационной анизотропии ГГГ, крупные частицы которых (10÷60 мм) различаются максимальным и минимальным размером сторон более чем в 2 раза. Для этого частицы грунта укладывались в рабочей камере одометра вручную с горизонтальным расположением частиц (горизонтальная слоистость) и с вертикальным расположением частиц (вертикальная слоистость) с засыпкой между ними частиц размером менее 10 мм и с соблюдением заданной плотности образцов 21,5 кН/м³. Параметр деформационной анизотропии в экспериментах может быть определен как:

$$\eta = \frac{\varepsilon_y^Г}{\varepsilon_y^В} \quad \text{или} \quad \eta = \frac{E_{\parallel}}{E_{\perp}} \quad (1)$$

Где: $\varepsilon_y^Г$, E_{\perp} – относительная деформация и модуль деформации перпендикулярные оси слоистости; $\varepsilon_y^В$, E_{\parallel} – относительная деформация и модуль деформации вдоль направления оси слоистости.

Схема проведения экспериментов и конструкция двухштампового одометра при определении модулей деформации E_{\perp} и E_{\parallel} показаны на рис. 1.

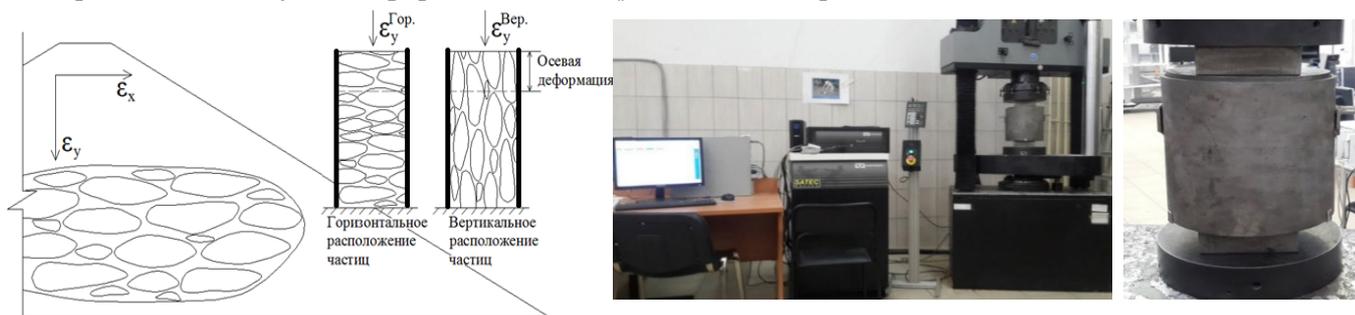
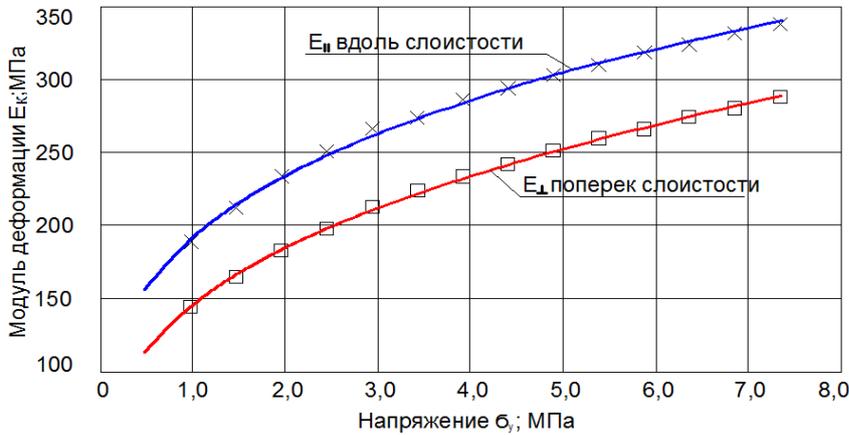


Рисунок 1 – Схема проведения эксперимента и двухштамповый одометр

Модуль деформации E_k (секущий модуль) по данным компрессионных испытаний в заданном интервале напряжений $\Delta\sigma$ вычисляется по формулам (ГОСТ 12248-2010; ГОСТ 12248.4-2020):

$$E_k = E_{oed} \cdot \beta \quad (2)$$

Где $E_{oed} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$ – одометрический модуль деформации, $\beta=0,8$ – коэффициент, учитывающий отсутствие поперечного расширения грунта в компрессионном приборе.



Зависимость компрессионных модулей деформации от напряжений $E_k = f(\sigma)$ для различных схем укладки приведены на рис. 2.

Рисунок 2 – Зависимость компрессионных модулей деформации от вертикального давления $E_k = f(\sigma)$

Для исследования деформационной анизотропии в условиях всестороннего сжатия при малых давлениях, была разработана усовершенствованная конструкция вакуумного прибора под руководством заслуженного деятеля науки, профессора, д.т.н. Л.Н. Рассказова (рис. 3).

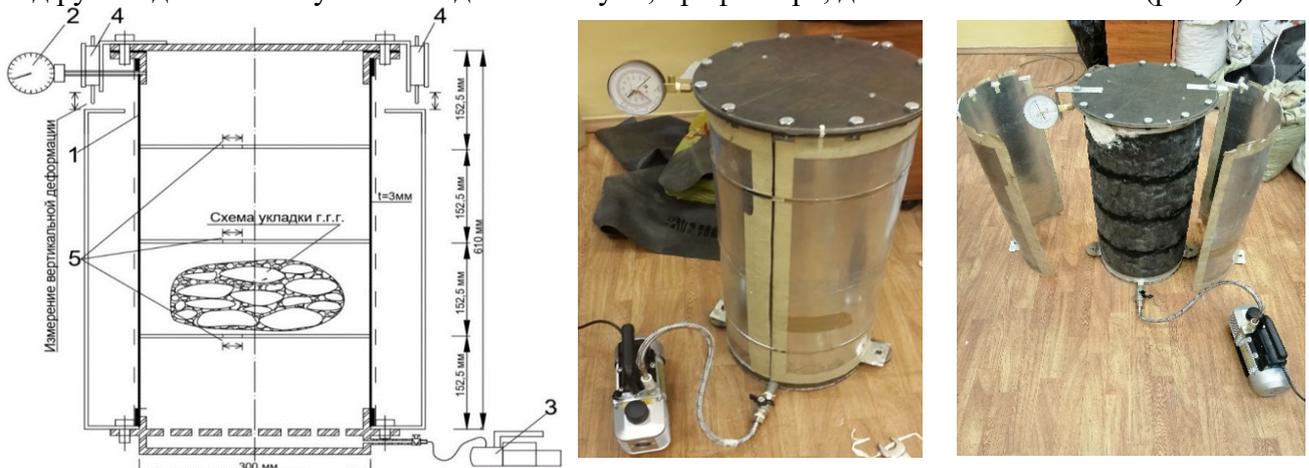


Рисунок 3 – Конструкция и фотография вакуумного прибора

1-Резиновая оболочка, 2-Вакууметр, 3-Вакуумный насос, 4-Индикаторы часового типа для измерения вертикальных деформаций, 5-Пояса для измерения радиальных деформаций

В отличие от компрессионных испытаний, в вакуумном стабилометре имеется возможность замера не только вертикальных, но и горизонтальных деформаций. При всестороннем обжатии (на ступенях обжатия с шагом $\Delta\sigma = 0,1 \text{ кг/см}^2$) относительные деформации ε_1 и $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ дают возможность из одного эксперимента получить коэффициент анизотропии согласно (1). Обработка экспериментов с построением функций касательного и секущего модулей деформации в зависимости от действующих напряжений (рис.4), позволяет получить коэффициент анизотропии для касательного и секущего модуля деформации.

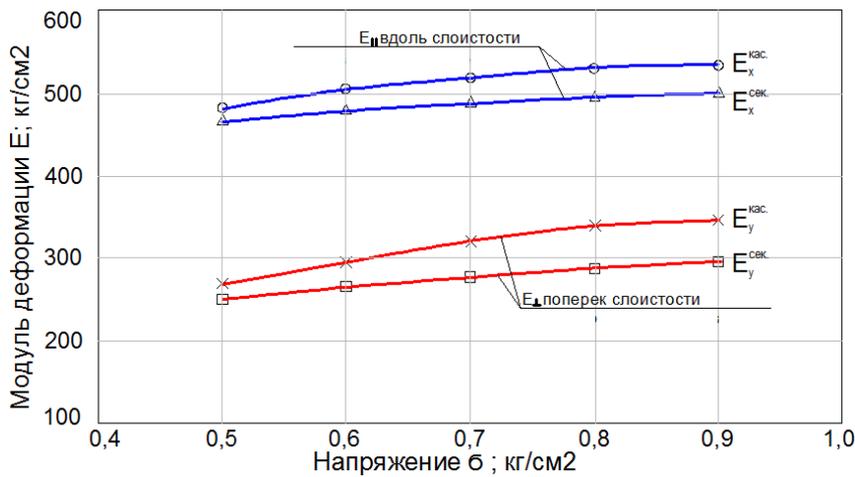


Рисунок 4 – Зависимости модулей деформации от напряжений $E_{сек.} = f(\sigma)$ и $E_{кас.} = f(\sigma)$

касательного модулей деформации грунта в диапазоне напряжений от $\sigma=0,04$ МПа (вакуумный стабилометр) до $\sigma=7,34$ МПа (одометр).

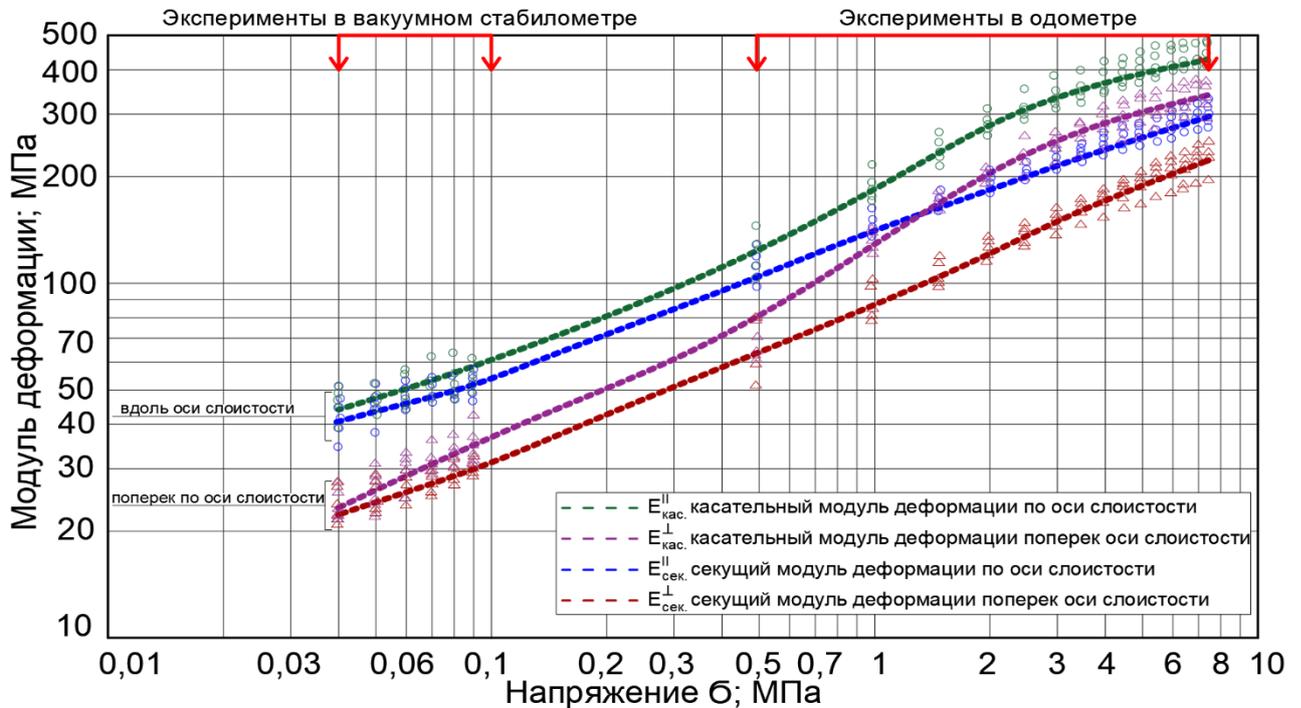


Рисунок 5 – Совмещенные зависимости $E_{кас.} = f(\sigma)$ $E_{сек.} = f(\sigma)$ компрессионных и вакуумных экспериментов в логарифмической шкале

По результатам экспериментов в одометре и в вакуумном стабилометре получено, что ГГГ, послойно уложенные в теле грунтовой плотины, обладают свойством деформационной анизотропии. Эти грунты более деформируемы по направлению, перпендикулярному оси слоистости, чем по направлению, параллельному оси слоистости: $\varepsilon_y^Г > \varepsilon_y^Б$ и, соответственно, $E_{||} > E_{\perp}$. Максимальный коэффициент деформационной анизотропии η получен в диапазоне малых напряжений (вакуумный стабилометр), где он меняется от $\eta_{max} = 1,9 \div 1,7$. С увеличением напряжений $\sigma=0,49 \div 7,34$ МПа (одометр) коэффициент анизотропии снижается до $\eta_{min}=1,6 \div 1,3$ соответственно.

Поскольку эксперименты в одометре и в вакуумном стабилометре проведены с одним и тем же грунтом, с одинаковой плотностью, то результаты экспериментов можно представить на объединенном графике (рис.5), который позволяет предположить возможное изменение функций секущего и

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований на большом трехосном приборе «АСИС» (рис. 6) с рабочей камерой диаметром 300 мм и высотой 600 мм. Эксперименты в стабилометре проводились по схеме первичного обжатия грунта гидростатическим давлением с последующим доведением образца до разрушения за счет роста вертикальной нагрузки (стандартная схема НН испытания). Испытания проводились в серии с разным уровнем гидростатического давления и с разной схемой укладки частиц.

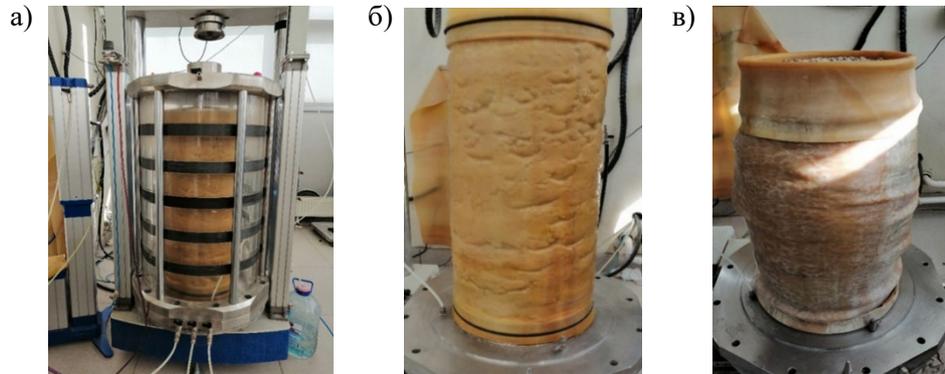


Рисунок 6 – а) Рабочая камера трехосного прибора, б) вид образца до испытания; в) вид образца после испытания

Результаты экспериментов представлены на рис.7 в виде функций изменения осевых и

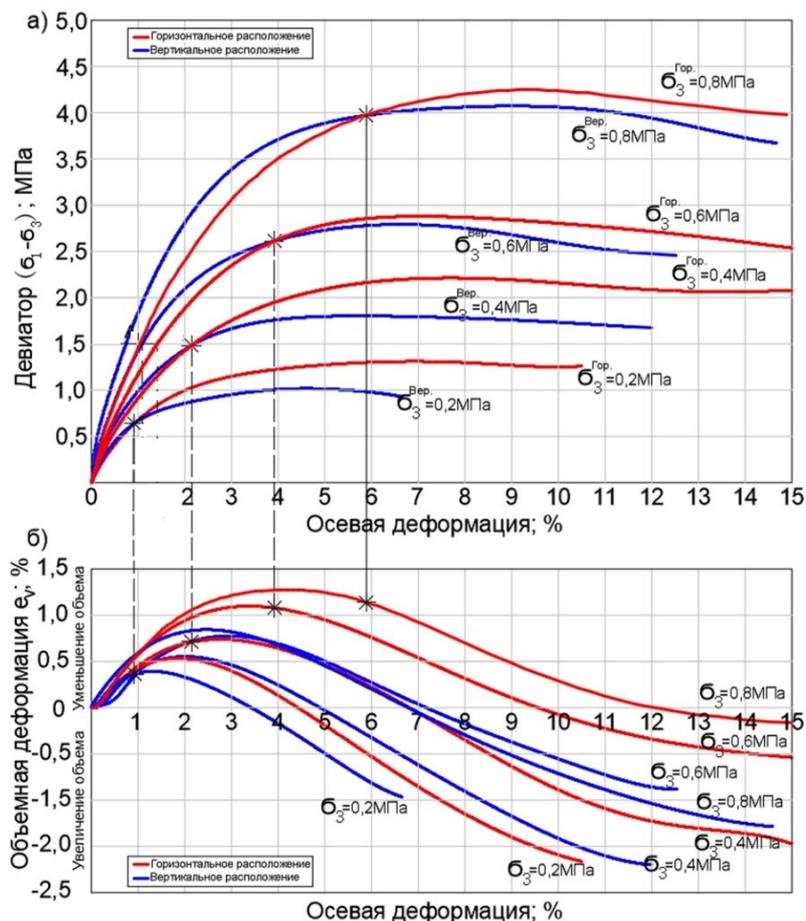


Рисунок 7 –Зависимости для функций осевых и объемных деформаций: а) $\epsilon_y^r = f(\sigma_1 - \sigma_3)$, $\epsilon_y^b = f(\sigma_1 - \sigma_3)$; б) $e_v^r = f(\epsilon_y^r)$, $e_v^b = f(\epsilon_y^b)$

объемных деформаций в процессе девиаторного нагружения. На начальном этапе нагружения деформации образца с горизонтальным расположением частиц превышают деформации образца с вертикальным расположением частиц, но этот характер деформирования присущ только этапу уплотнения грунта, после достижения максимальной плотности (обозначено «*» рис. 7), что соответствует минимальному объему образца, характер деформирования образцов деформирования образцов изменяется. Для образцов с вертикальным расположением частиц разуплотнение протекает быстрее, и их кривая

деформирования располагается ниже, чем у грунта с горизонтальным расположением частиц, что говорит о том, что модуль деформации на этапе разуплотнения у грунта с горизонтальной слоистостью выше, чем с вертикальной.

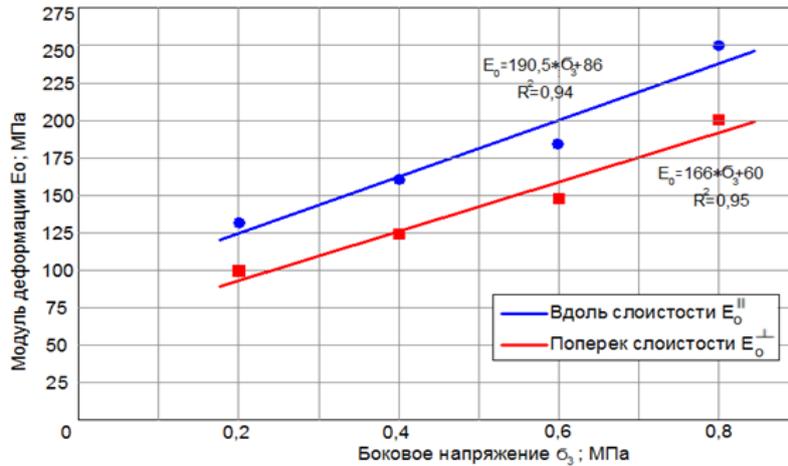


Рисунок 8 – Зависимости начальных модулей деформации от боковых напряжений $E_0 = f(\sigma_3)$ горизонтальным расположением частиц (E_{\perp}). Соотношение начальных модулей для опытов с боковым обжатием $\sigma_3 = 0,2 \div 0,8$ МПа получено $\eta = 1,32 \div 1,25$.

Согласно (ГОСТ 12248.3-2020) были построены круги Мора в пространстве главных напряжений σ_1 и σ_3 для обеих схем укладки грунта и построены экспериментальные зависимости изменения углов сдвига в зависимости от действующих нормальных напряжений на площадке сдвига (рис. 9). Для экспериментальных кривых были подобраны зависимости в виде функций квадратного полинома вида:

$$\varphi(E, \sigma_n) = \begin{cases} \varphi_{\perp} = 2,1\sigma_n^2 - 8,5\sigma_n + 51,8 \\ \varphi_{\parallel} = 1,2\sigma_n^2 - 5,1\sigma_n + 47,2 \end{cases} \quad (3)$$

Где: E - признак направления при оценке параметра прочности в зависимости от направления главного напряжения.

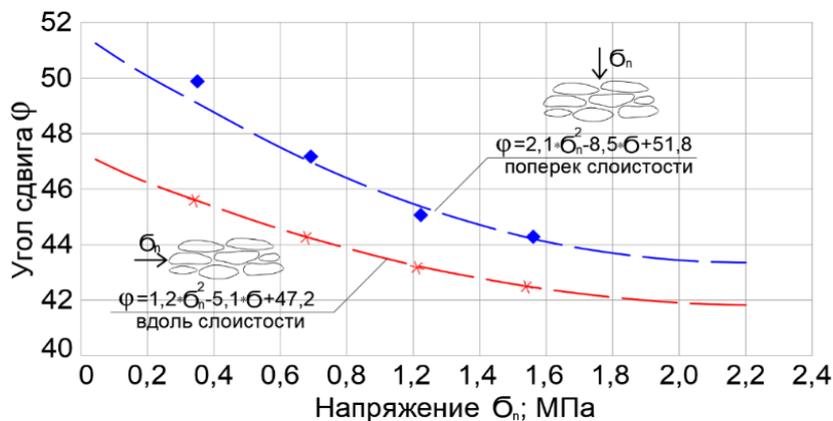


Рисунок 9 – Экспериментальные зависимости изменения углов сдвига от действующих нормальных напряжений $\varphi = f(\sigma_n)$ при плотности укладки ГГГ 21,5 кН/м³

Зависимости начальных модулей деформации от боковых напряжений $E_0 = f(\sigma_3)$ для различных схем укладки, приведены на рис. 8, что свидетельствует о том, что модуль деформации для образцов с вертикальным расположением

частиц в рабочей камере (E_{\parallel}) больше, чем в экспериментах с

горизонтальным расположением частиц (E_{\perp}).

Соотношение начальных модулей для опытов с боковым обжатием $\sigma_3 = 0,2 \div 0,8$ МПа получено $\eta = 1,32 \div 1,25$.

Согласно (ГОСТ 12248.3-2020) были построены круги Мора в пространстве главных напряжений σ_1 и σ_3 для обеих схем укладки грунта и построены экспериментальные зависимости изменения углов сдвига в зависимости от действующих нормальных напряжений на площадке сдвига (рис. 9). Для экспериментальных кривых были подобраны зависимости в виде функций квадратного полинома вида:

$$\varphi(E, \sigma_n) = \begin{cases} \varphi_{\perp} = 2,1\sigma_n^2 - 8,5\sigma_n + 51,8 \\ \varphi_{\parallel} = 1,2\sigma_n^2 - 5,1\sigma_n + 47,2 \end{cases} \quad (3)$$

Где: E - признак направления при оценке параметра прочности в зависимости от направления главного напряжения.

Для описания зависимости углов сдвига грунта от плотности его сложения были использованы результаты опытов с гравийным грунтом А.А. Кагана, в которых диапазон изменения плотности грунта составляет от 16 кН/м³ до 21 кН/м³, для которых функции

углов сдвига могут быть аппроксимированы также квадратичными полиномами вида:

$$\begin{cases} \varphi_{\gamma_{max}}(\sigma) = 1,7\sigma^2 - 11,9\sigma + 56,2 - \text{при максимальной плотности } \gamma = 21 \text{ кН/м}^3 \\ \varphi_{\gamma_{min}}(\sigma) = 2,5\sigma^2 - 11,5\sigma + 41,7 - \text{при минимальной плотности } \gamma = 16 \text{ кН/м}^3 \end{cases} \quad (4)$$

Используя функции А.А. Кагана зависимости угла сдвига от плотности, можно получить градиент изменения угла сдвига по плотности для разного уровня напряжений, что, применяя к результатам экспериментальных зависимостей для разной ориентации частиц, позволяет построить функции изменения углов сдвига грунта в зависимости от ориентации частиц, плотности и уровня действующих напряжений $\varphi(\varepsilon, \sigma, \gamma)$. Полученные кривые изменения углов сдвига в диапазоне плотности 16÷22 кН/м³ приведены на рис. 10 – для горизонтально уложенного грунта и на рис. 11 – для вертикально уложенного грунта.

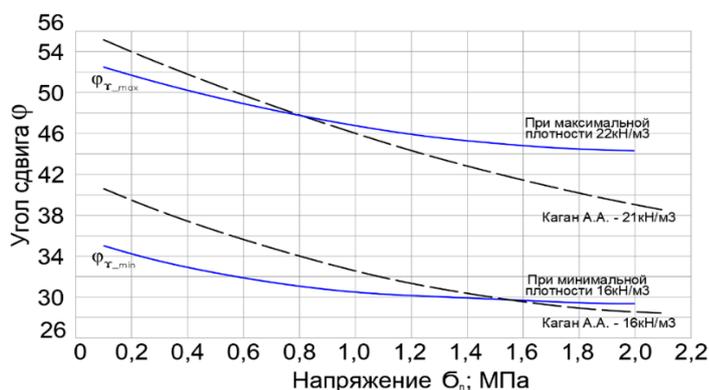


Рисунок 10 – Зависимость

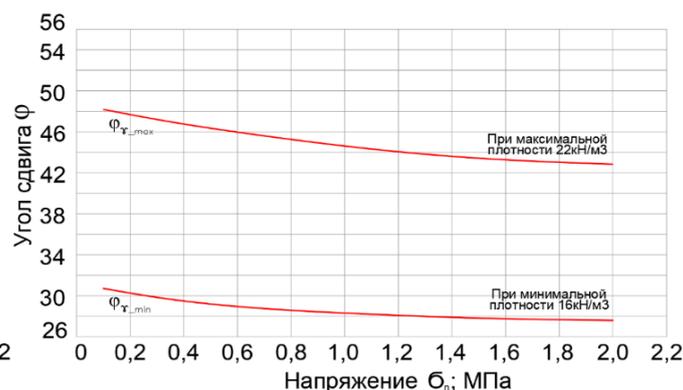
 $\varphi_{\gamma_{max}}$ и $\varphi_{\gamma_{min}} = f(\sigma, \gamma)$ поперек слоистости


Рисунок 11 – Зависимость

 $\varphi_{\gamma_{max}}$ и $\varphi_{\gamma_{min}} = f(\sigma, \gamma)$ вдоль слоистости

Наличие верхней и нижней кривой для углов сдвига грунта с разной ориентацией частиц позволяет получить расчетные значения углов сдвига в зависимости от заданного уровня напряжений и заданной плотности грунта по интерполяционной формуле:

$$\varphi(\varepsilon, \sigma, \gamma) = \varphi_{\gamma_{min}}^{\varepsilon}(\sigma) + \frac{[\varphi_{\gamma_{max}}^{\varepsilon}(\sigma) - \varphi_{\gamma_{min}}^{\varepsilon}(\sigma)]}{[\gamma_{max} - \gamma_{min}]} \cdot (\gamma - \gamma_{min}) \quad (5)$$

где: $\varphi_{\gamma_{max}}^{\varepsilon}, \varphi_{\gamma_{min}}^{\varepsilon}$ – значения углов сдвига определяемых при γ_{max} и γ_{min} ; γ – заданная плотность грунта, при которой необходимо определить угол сдвига при заданном напряжении.

В четвёртой главе приводятся результаты исследований влияния прочностной анизотропии ГГГ на устойчивость откосов грунтовых плотин. При проведении экспериментов с разной ориентацией частиц относительно главного напряжения, которое всегда было вертикальным, были получены значения углов сдвига ГГГ для случая, когда ось слоистости совпадала с направлением главного напряжения ($\varphi_{\parallel} = \varphi_{min}$) и, когда ось слоистости была перпендикулярна направлению главного напряжения ($\varphi_{\perp} = \varphi_{max}$).

Определение углов сдвига ГГГ для случая, когда ось слоистости грунта составляет некоторый угол α по отношению к направлению главного напряжения, получено выражение на основе канонического уравнения эллипса (рис.12):

прочностной анизотропии были внесены изменения в программный комплекс «ОТКОС-22», разработанный к.т.н. Бестужевой А.С. на языке Delphi 10. Расчет устойчивости откосов в ПК «ОТКОС-22» выполняется по методу кругло-цилиндрических поверхностей обрушения К. Терцаги, где производится автоматический поиск наиболее опасной поверхности обрушения ($K_n^{ан} min$).

Были проведены расчеты плотин разных конструкций и разной высоты с учетом и без учета анизотропного различия прочностных характеристик материала. На основе проведенных расчетов были получены корректирующие коэффициенты ($K_{кор}^{ан}$) для учета анизотропных свойств ГГГ в расчетах устойчивости откосов различных типов плотин по формуле:

$$K_{кор}^{ан} = \frac{K_n^{ан}}{K_n} \quad (7)$$

где: $K_n^{ан}$ – коэффициент запаса устойчивости откосов плотины в расчете с учетом свойств прочностной анизотропии ГГГ; K_n – коэффициент запаса устойчивости откосов плотины в расчетах без учета анизотропных свойств грунта.

Проведены серия расчетов устойчивости откосов грунтовых плотин из ГГГ разных типов, конструкции, высоты и плотности укладки с учетом прочностной анизотропии в программе «ОТКОС-22» как при основном, так и при особом сочетании нагрузок. По результатам этих расчетов, для учета прочностной анизотропии ГГГ в расчетах устойчивости откосов грунтовых плотин из галечникового грунта были построены номограммы с корректирующими коэффициентами $K_{кор}^{ан}$. Интерфейс программного комплекса с расчетом представлены на рис. 15 для каменно-насыпной плотины с диафрагмой 200 - метровой высоты с заложением откосов 1:2,4.

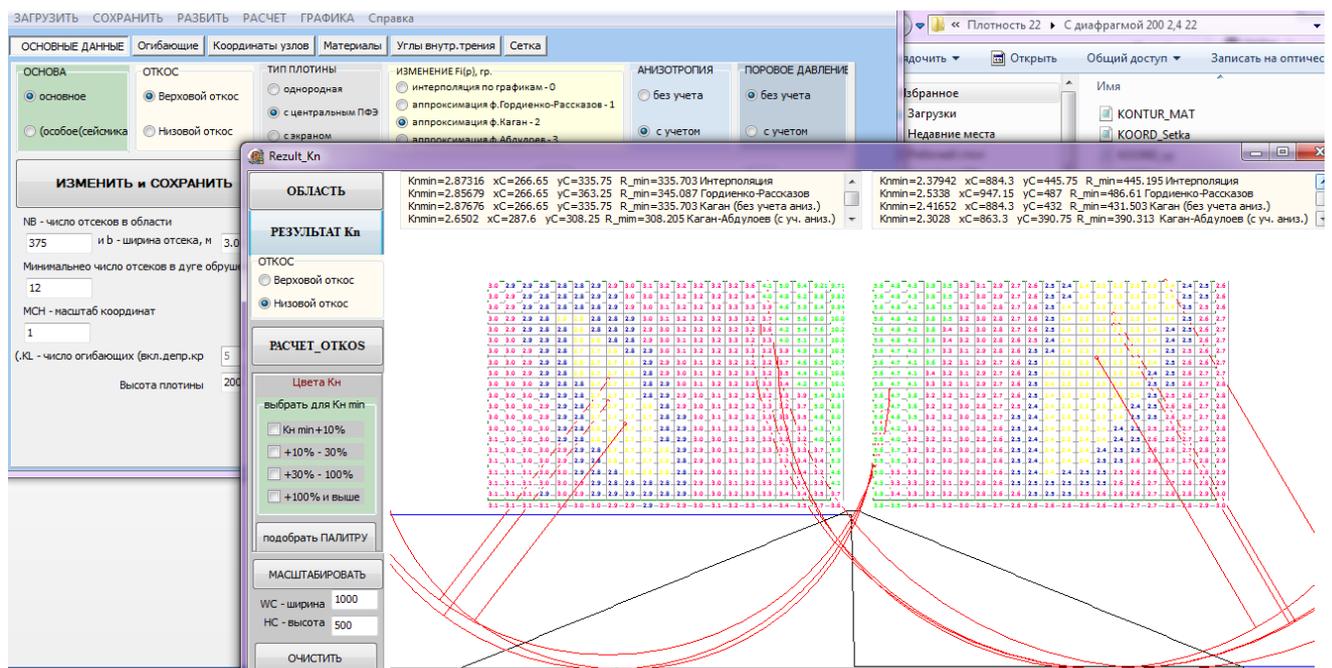


Рисунок 15 – Расчет устойчивости откосов плотины с учетом и без учета прочностной анизотропии для плотины 200-м высоты

Получено, что корректирующий коэффициент анизотропии $K_{кор}^{ан.}$ зависит от типа плотины, высоты плотины и от плотности укладки грунта в теле плотины. С увеличением высоты и плотности укладки, влияние прочностной анизотропии увеличивается. Например, для плотины с экраном, высотой 100 м и плотности укладки 22 кН/м³ корректирующий коэффициент анизотропии получено $K_{кор}^{ан.}=0,937$, а при высоте плотины 300 м и плотности укладки 22 кН/м³ корректирующий коэффициент анизотропии равняется $K_{кор}^{ан.}=0,896$ (рис. 16). Аналогичные результаты получены для низового откоса плотины с экраном (рис. 17). Номограммы для плотины с центральным противофильтрационным элементом (с диафрагмой, с центральным ядром) приведены на рис. 18 – для верхового откоса и на рис. 19 – для низового откоса.

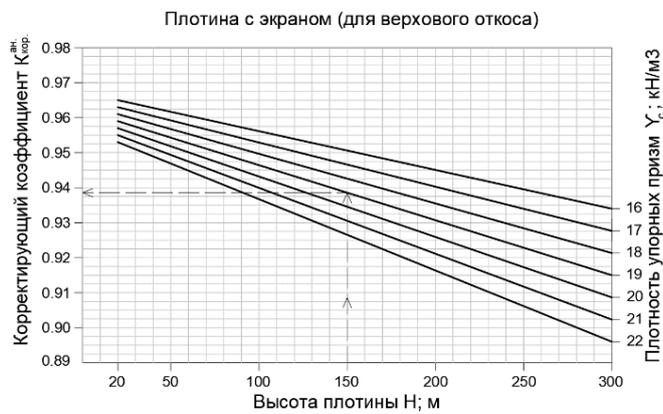


Рисунок 16 – $K_{кор}^{ан.}$ для плотины с экраном (для верхового откоса)

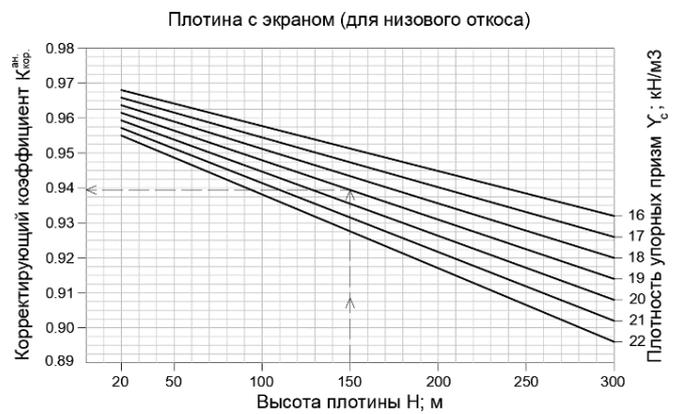


Рисунок 17 – $K_{кор}^{ан.}$ для плотины с экраном (для низового откоса)

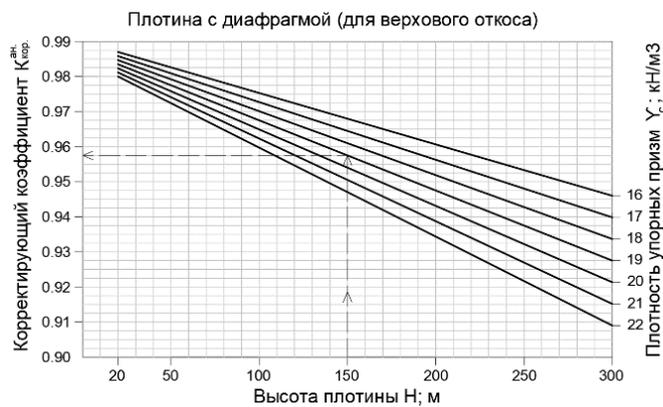


Рисунок 18 – $K_{кор}^{ан.}$ для плотины с центральным противофильтрационным элементом (для верхового откоса)

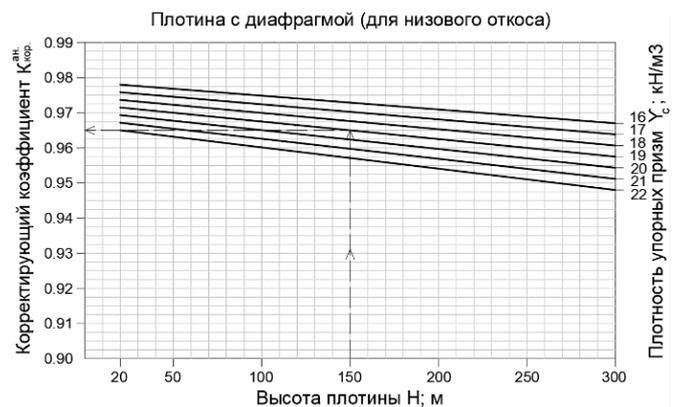


Рисунок 19 – $K_{кор}^{ан.}$ для плотины с центральным противофильтрационным элементом (для низового откоса)

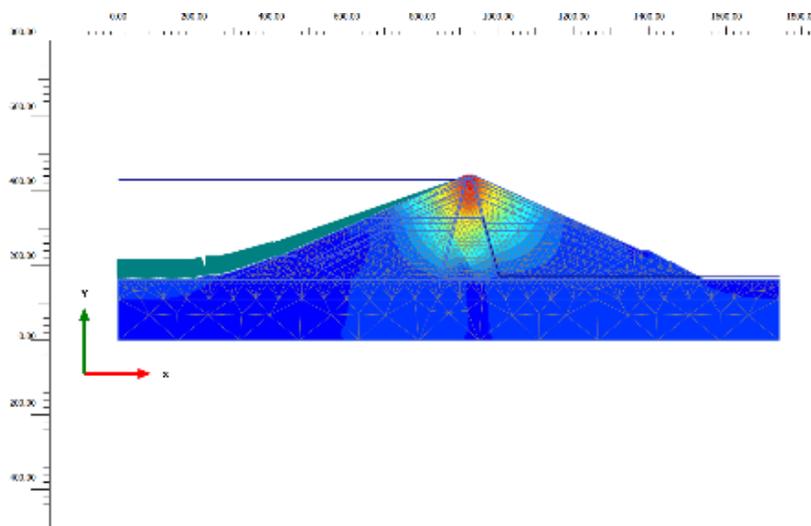
Для учета прочностной анизотропии ГГГ в расчетах устойчивости откосов грунтовых плотин как при основном, так и при особом сочетании нагрузок в зависимости от типа, высоты и плотности укладки грунта, можно воспользоваться формулой:

$$K_n^{ан} = K_{кор.}^{ан} \cdot K_n \quad (8)$$

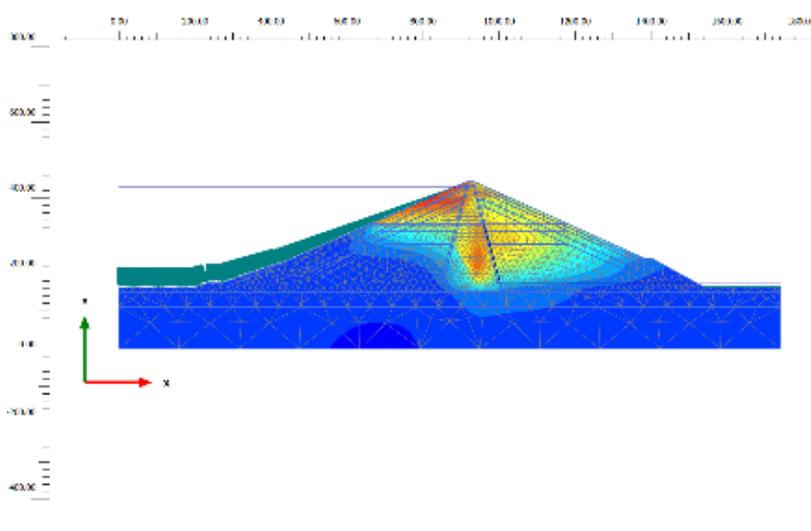
Где: $K_n^{ан}$ - коэффициент устойчивости откосов грунтовых плотин с учетом анизотропии; $K_{кор.}^{ан}$ – корректирующий коэффициент для учета прочностной анизотропии в расчетах устойчивости откосов; K_n - коэффициент устойчивости откосов грунтовых плотин без учета анизотропии.

Согласно полученным номограммам, влияние прочностной анизотропии проявляется в снижении коэффициентов запаса устойчивости на 3% ÷ 11% в зависимости от типа, плотности укладки и высоты грунтовых плотин.

В пятой главе приводятся результаты численных исследований влияния прочностной анизотропии ГГГ в расчетах НДС и прочности ядра на трещинообразование высоких каменно-земляных плотин. Поскольку имеются результаты натуральных наблюдений за осадками Нурекской плотины в годы ее строительства в период с 1975 по 1979 года, то для сопоставления



а) Total displacements u_y
Maximum value = 0.03052 m (Element 730 at Node 18199)
Minimum value = -2.908 m (Element 275 at Node 151)



б) Total displacements u_x
Maximum value = 1.337 m (Element 207 at Node 1233)
Minimum value = -1.981*10⁻³ m (Element 2440 at Node 18000)

Рисунок 20 – НДС плотины на 6-этапе строительства (JR изотропный расчет): а) осадки U_y ; б) смещения U_x

расчетных значений с натурными данными, расчеты НДС проводились для Нурекской плотины. Расчеты проводились в программном комплексе Plaxis в плоской постановке с учетом характерных этапов строительства и наполнения. При численном исследовании сопоставлены грунтовые модели, применяемые в расчетах: модель Кулона-Мора (МК), модель «трещиноватой скалы» (JR) для изотропных грунтов и модель JR для анизотропных грунтов. Полученные результаты осадок и смещений для 6-го этапа расчета показаны на рис. 20 – для изотропного расчета и на рис. 21 – для анизотропного расчета.

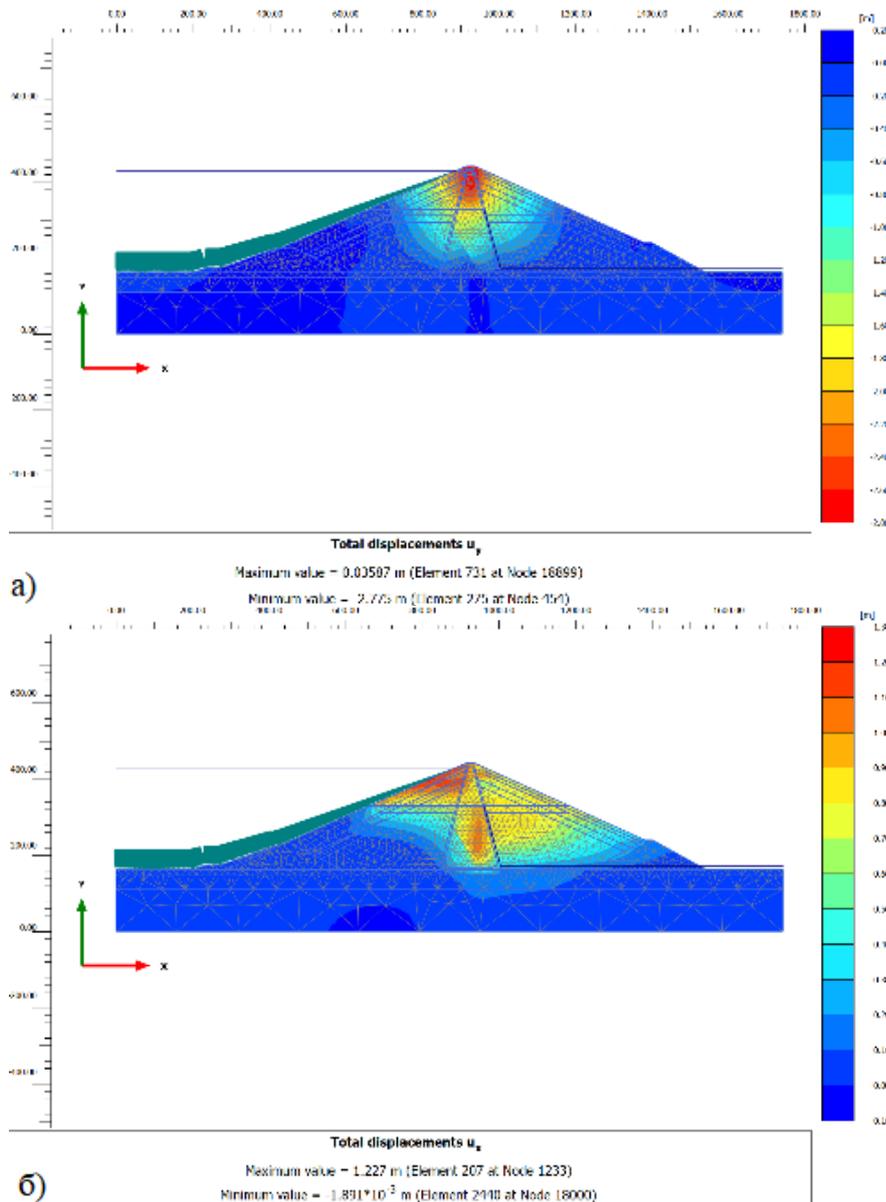


Рисунок 21 – НДС плотины на 6-этапе строительства (JR анизотропный расчет): а) осадки U_y ; б) смещения U_x

расчету (где: $E_x = E_y$; $\varphi_x = \varphi_y$) и $U_y=3,45$ м по анизотропному расчету (где: $E_x \neq E_y$; $\varphi_x \neq \varphi_y$). На 1978 г. величина осадок по натурным данным на отметке 203,31 м составляют $U_y=2,62$ м. Расчетное значение осадок на 5-этапе расчета на отметке $U_y=203,31$ м получены $U_y=3,05$ м - для изотропного расчета и $U_y=2,90$ м - для анизотропного расчета.

Максимальное горизонтальное смещение по оси ядра плотины по натурным данным в 1979 г. на отм. 122,0 м равно $U_x=93$ см, а по расчетам смещения на отм. 122,0 м по оси ядра плотины, получены $U_x=120$ см – без учета анизотропии и $U_x=114$ см - по расчетам с учетом анизотропии. На отметке 203,31 м по натурным данным значение максимального смещения равно $U_x=36,5$ см, а расчетные значения осадки на отметке 203,31 м получены $U_x=850$ см для изотропного расчета и $U_x=813$ см для анизотропного расчета (рис. 22).

Результаты расчетов показывают, что учет анизотропных механических характеристик ГГГ, уложенного в упорные призмы плотины, ведет к уменьшению расчетных величин осадок и смещений в плотине. При этом для 300-метровой плотины величина максимальной

осадки уменьшается на $2,4 \div 4,6\%$ и максимальное смещение уменьшится на $4,2 \div 8,3\%$.

По данным натурных наблюдений, максимальная величина осадки в 1975 г. на отм 122,0 м равняется $U_y=3,31$ м. Максимальные осадки по результатам расчетов 3-го этапа на отм. 122,0 м получены $U_y=3,60$ м по изотропному

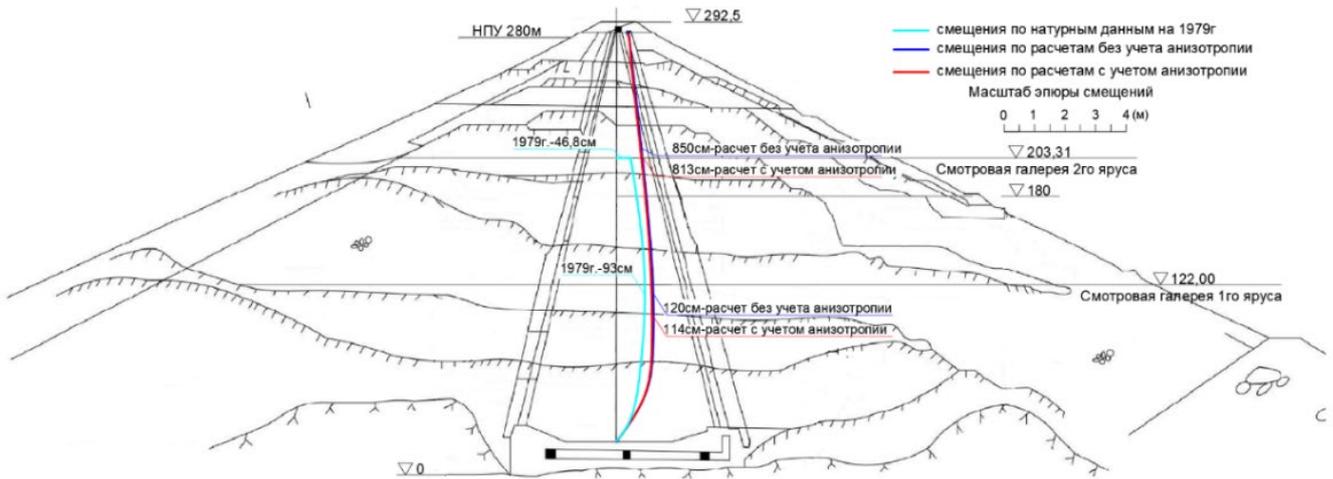


Рисунок 22 – Эпюры горизонтальных смещений Нурекской плотины по натурным и расчетным данным на 1979 г.

По результатам проведенных исследований можно сделать вывод, что учет анизотропных свойств грунта упорных призм плотины в расчетах НДС грунтовых плотин, приближает расчетные значения осадок и смещений к натурным значениям.

Также, были проведены численные исследования по определению влияния анизотропных механических свойств ГГГ упорных призм Нурекской плотины на коэффициент трещиностойкости ядра на напорной грани. Для оценки трещиностойкости ядра можно воспользоваться следующей формулой:

$$K_{тр} = \frac{C_p + \sigma_y}{\gamma_{воды} \cdot h} \quad (9)$$

где: σ_y – вертикальное напряжение; C_p – сцепление грунта ядра плотины; $\gamma_{воды}$ – объемный вес воды; h – напор воды.

В результате расчетов в программном комплексе Plaxis по модели трещиноватой скалы JR были получены эпюры вертикальных напряжений без учета анизотропии (рис. 23) по напорной грани ядра и эпюры вертикальных напряжений с учетом анизотропии (рис. 24) по напорной грани ядра. Расчеты показали, что на напорной грани ядра, вертикальные напряжения с учетом анизотропных свойств грунтов тело плотины, практически не меняются.

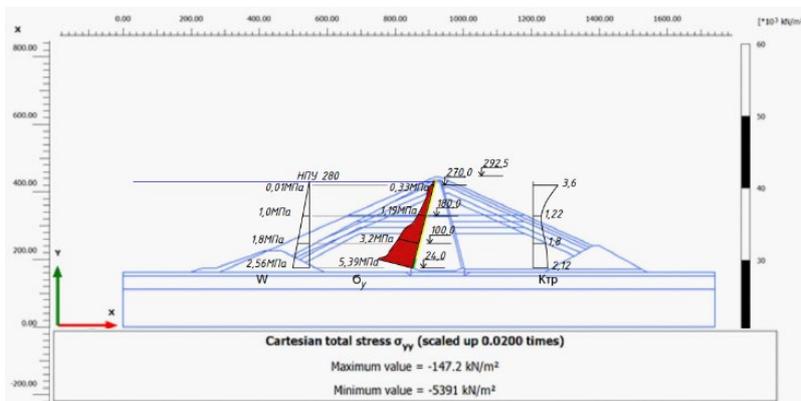


Рисунок 23 – Эпюра σ_y и $K_{тр}$ на напорной грани ядра без учета анизотропии

Расчеты прочности напорной грани ядра плотины на трещинообразование, показали, что анизотропные свойства послойно уложенных галечниковых грунтов в упорные призмы каменно-земляных плотин, на коэффициент трещинообразования $K_{тр}$ не оказывают существенного влияния.

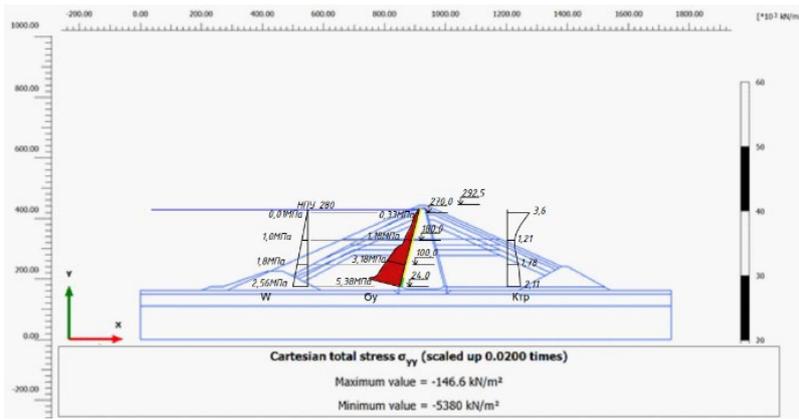


Рисунок 24 – Эпюра σ_y и $K_{тр}$ на напорной грани ядра с учетом анизотропии

Получено, что при глубине воды $H=100$ м коэффициент трещинообразования $K_{тр}=1,22$ без учета анизотропии и $K_{тр}=1,21$ для анизотропного расчета. А для глубины воды $H=256$ м коэффициент получен $K_{тр}=2,12$ – для изотропного расчета и $K_{тр}=2,11$ – для анизотропного расчета.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика экспериментального исследования свойств гравийно-галечникового грунта с наведенной анизотропией, заключающаяся в укладке галечникового грунта в рабочую камеру приборов с разной ориентацией частиц по отношению к направлению осевого давления.
2. Доказано на основе экспериментальных исследований различие деформационных и прочностных свойств по взаимно перпендикулярным направлениям (горизонтальному и вертикальному) у гравийно-галечникового грунта, уложенного в тело грунтовой плотины, что относит этот грунт к трансверсально-изотропным грунтам.
3. Получены зависимости деформационных и прочностных характеристик гравийно-галечникового грунта по направлению вдоль оси слоистости и перпендикулярно оси слоистости в виде модулей деформации E_{\parallel} и E_{\perp} и углов внутреннего трения φ_{\parallel} и φ_{\perp} , а также коэффициентов анизотропии в виде функций $\eta = \frac{E_{\parallel}}{E_{\perp}} = f(\sigma)$ (коэффициент деформационной анизотропии) и $\Psi = \frac{\varphi_{\parallel}}{\varphi_{\perp}} = f(\sigma)$ (коэффициент прочностной анизотропии).
4. Получен максимальный коэффициент деформационной анизотропии 1,97 и максимальная разница в углах внутреннего трения $3^{\circ} \div 5^{\circ}$ при минимальном уровне напряжений. С ростом напряжений разница в анизотропных свойствах галечника снижается.
5. Разработана методика учета прочностной анизотропии грунта в расчетах устойчивости откосов грунтовых плотин, позволяющая описать изменение прочностных свойств гравийно-галечникового грунта, уложенного в тело грунтовой плотины, в зависимости от его напряженно-деформированного состояния на площадке сдвига в диапазоне плотности $16 \div 22$ кН/м³ в виде функции $\varphi = f(\varphi_{\parallel}; \varphi_{\perp}; \gamma; \alpha)$.
6. Разработан алгоритм решения задачи устойчивости откосов грунтовых плотин с учетом анизотропных свойств грунтов, реализованный в программном коде для ЭВМ. Проведены

тестовые расчеты в ПК ОТКОС-22 по реализованному алгоритму, верифицированные расчетами по другим программным комплексам.

7. Получены номограммы корректирующих коэффициентов $K_{кор}^{ан}$, позволяющие пересчитать значение коэффициента запаса устойчивости откосов плотин разной конструкции и разной высоты с учетом анизотропных свойств гравийно-галечникового грунта тела плотины, по формуле: $K_H^{ан} = K_H \cdot K_{кор}^{ан}$.
8. Учет анизотропных свойств грунта дает снижение коэффициентов запаса устойчивости откосов грунтовых плотин на 3÷11% в зависимости от типа плотины, ее высоты, заложения откосов, что необходимо учитывать при проектировании плотин.
9. Сопоставление результатов численного моделирования напряженно-деформированного состояния Нурекской плотины с учетом анизотропных свойств гравийно-галечникового грунта в ПК Plaxis-2D (по модели анизотропного грунта JR) с данными натурных наблюдений показали, что учет анизотропии приближает результаты расчетов к данным натурных наблюдений.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в следующем:

1. Полученные зависимости для коэффициентов деформационной $\eta = f(\sigma)$ и прочностной анизотропии $\Psi = f(\sigma)$ можно использовать в расчетах напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин из гравийно-галечниковых грунтов по упругопластическим моделям, в т.ч. по «энергетической» модели грунта проф. Л.Н. Рассказова;
2. Исследование анизотропных деформационных и прочностных свойств, укладываемых в тело плотины грунтов, актуально также и для связных грунтов, в которых фиксируется фильтрационная анизотропия, что может быть учтено при оценке прочностного состояния противofильтрационного элемента.
3. Разработанная усовершенствованная конструкция вакуумного стабилометра может быть использована для определения механических свойств грунтов на траектории всестороннего сжатия при напряжениях до 1 кг/см² в том числе при динамических нагрузках.
4. При проектировании откосов грунтовых плотин из гравийно-галечниковых грунтов для учета анизотропных свойств рекомендуется пользоваться предложенными номограммами, которые можно расширить для плотин иных конструкций.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:

1. Рассказов Л.Н., Радзинский А.В., Абдулов А.Б. Деформационная анизотропия гравийно-галечниковых грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2018. № 4. С. 6-9.

2. **Бестужева А.С., Абдулоев А.Б.** Лабораторные исследования деформационной анизотропии галечника, уложенного в тело грунтовой плотины / Гидротехническое строительство. 2020. № 11. С. 26-32.

3. **Абдулоев А.Б., Бестужева А.С.** Результаты экспериментальных исследований деформационной анизотропии галечникового грунта // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2020. Т. 298. С. 49-58.

4. **Бестужева А.С., Абдулоев А.Б.** Учет анизотропных свойств галечниковых грунтов в расчетах устойчивости откосов грунтовых плотин // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 4. С. 627-637. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.4.627-637

Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международной реферативной базе Scopus, Web of Science:

5. **Rasskazov, L.N., Bestuzheva, A.S., Abduloev, A.B.** The Study of the Anisotropy of Gravel Soils Under Conditions of Stabilometrical Tests // Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2019, 56 (4), страницы 253-257. DOI: 10.1007/s11204-019-09599-2

Публикации в других научных журналах и изданиях:

6. **Bestuzheva, A., Abduloev, A.** Experimental studies of deformation anisotropy of gravel soils // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 883(1), 012189

7. **Абдулоев А.Б., Бестужева А.С.** Исследование анизотропных свойств галечниковых грунтов // В сборнике: Обеспечение качества, безопасности и экономичности строительства. Практика. Проблемы. Перспективы. Инновации. материалы Второй совместной научно-практической конференции ГБУ «ЦЭИИС» и ИПРИМ РАН. 2020. С. 167-176.

8. **Абдулоев А.Б., Бестужева, А.С.** Лабораторные исследования деформационной анизотропии галечника, уложенного в тело грунтовой плотины / А.С. Бестужева, А.Б. Абдулоев // Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства: сборник тезисов докладов III Всероссийского научно-практического семинара, Москва, 17 июня 2020 года / Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Институт гидротехнического и энергетического строительства. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2020. – С. 9-10.

9. **Абдулоев А.Б., Бестужева, А.С.** Влияние прочностной анизотропии в расчетах устойчивости откосов грунтовых плотин / А.С. Бестужева, А.Б. Абдулоев // Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства : сборник тезисов докладов IV Всероссийского научно-практического семинара, Москва, 26 мая 2021 года / Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Институт

гидротехнического и энергетического строительства. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2021. – С. 47-48.

10. **Bestuzheva, A., Abduloev, A.** Stability of dam slopes taking into account anisotropy // E3S Web of Conferences, 2023, 410, 05001

11. **Абдулов А.Б., Бестужева А.С.** Влияние анизотропных свойств гравийно-галечникового грунта на устойчивость откосов при сейсмических нагрузках // В книге: Современные проблемы гидравлики и гидротехнического строительства. Сборник тезисов докладов VI Всероссийского научно-практического семинара. Москва, 2023. С. 81-82.

12. **Бестужева А.С., Абдулов А.Б.** Сопоставление расчетных данных с натурными при численном исследовании напряженно-деформированного состояния грунтовой плотины с учетом деформационной анизотропии галечниковых грунтов // XV научно-техническая конференция ВНИИГ «Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии». Тезисы докладов, г. Санкт-Петербург, 25-27 октября 2023 г. С. 88.