

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Сенцова Екатерина Алексеевна

**ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ВОДОНАСЫЩЕННЫХ
ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ В УСЛОВИЯХ ДИНАМИЧЕСКОГО
НАГРУЖЕНИЯ МОДЕЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ**

Специальность 1.6.7 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2023

Диссертация подготовлена на кафедре инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

- Научный руководитель** – ***Вознесенский Евгений Арнольдович**, доктор геолого-минералогических наук, профессор*
- Официальные оппоненты** – ***Алешин Александр Степанович** – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта» Российской академии наук, Лаборатория сейсмотектоники и сейсмического микрорайонирования №701, главный научный сотрудник*
- Шашкин Алексей Георгиевич** – доктор геолого-минералогических наук, ООО «Институт строительного проектирования «Геореконструкция», генеральный директор*
- Латыпов Айрат Исламгалиевич** – кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», Институт геологии и нефтегазовых технологий, кафедра общей геологии и гидрогеологии, доцент*

Защита диссертации состоится 19 мая 2023 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.1 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119234, Москва, Ленинские горы, д.1, Главное здание МГУ, корпус «А», геологический факультет, аудитория 415.

E-mail: mgu.04.01@mail.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/016.1/2459>.

Автореферат разослан 14 апреля 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук, доцент



Н.А. Харитоновна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Последнее столетие знаменуется бурным ростом строительства инженерных сооружений различного назначения нередко на площадках со сложными инженерно-геологическими условиями. Одним из факторов, негативно влияющих на проектирование и строительство, является воздействие динамических нагрузок природного и техногенного происхождения на грунты основания.

Для количественной характеристики динамических свойств грунтов как среды распространения волн напряжений используются следующие основные величины: ряд динамических деформационных и энергетических параметров – характеристики затухания волн напряжений в грунтах, модуль Юнга, динамический модуль сдвига, динамический модуль общей деформации, коэффициент Пуассона. Изменение же параметров прочности при воздействии динамических нагрузок остается дискуссионным. Общепринятая методика их определения также не разработана. Анализ опубликованной научно-технической литературы по тематике исследования показал: несмотря на то, что под влиянием вибрации, как установлено многочисленными исследованиями, сопротивление грунтов сдвигу снижается, существуют различные точки зрения на природу этого эффекта, в том числе на количественную оценку динамических характеристик прочностных свойств грунтов. В связи с этим изучение прочностных свойств дисперсных грунтов в условиях динамического нагружения является актуальным направлением исследований.

Степень разработанности темы исследования. Результаты исследований, посвященных изучению динамической прочности дисперсных грунтов, представлены в работах Аверочкиной М.В. (1975, 1983), Баркана Д.Д. (1959), Беллендира Е.Н. (2006), Блехманова И.И. (1953), Велли Ю.А. (1958), Вознесенского Е.А. (1997), Вудса Р. (1978), Добровольского А.А. (1975), Ермолаева Е.Н. (1968), Ершова В.А. (1962), Жинкина Г.Н. (1956), Зарубиной Л.П. (1970), Иванова П.Л. (1985), Ишихары К. (1975, 1984), Касуды К. (1984), Кистанова А.И. (1969), Кутергина В.Н. (1982, 1989), Лагойского А.И. (1962), Латыпова А.И. (2011), Лаша Ф.Л. (1937), Мано Р. (1975), Маслова Н.Н. (1959), Мусаэляна А.А. (1977), Нагао А. (1975), Перлея Е.М. (1964), Покровского Г.И. (1937), Поспелова В.А. (1965), Преображенской Н.А. (1958), Прокудина И.В. (1975, 1982), Ребиндера П.А. (1968), Савченко И.А. (1958), Сенина Н.В. (1968), Се-Дин-И (1962), Сиды Б. и Ли К. (1966), Сипидина В.П. (1954), Соколова В.А. (1956), Татсуоки Ф. (1986), Трофименкова Ю.Г. (1975), Тубольцева В.М. (1969), Флориной Н.В. (1954), Харкуты И.И. (1964, 1971, 1973), Шаниной А.Н. (1969).

Фактические результаты, методические решения и теоретические построения, приведенные в работах перечисленных исследователей, были проанализированы и учтены автором при планировании и выполнении им настоящей диссертационной работы.

Цели и задачи работы. Целью работы является изучение закономерностей изменения сдвиговой прочности и параметров прочности песчаных и глинистых грунтов в условиях динамического нагружения и разработка методики их экспериментального определения.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Анализ опубликованных работ по направлению исследования.
2. Экспериментальное определение сдвиговой прочности и параметров прочности песчаных и глинистых грунтов в условиях статического нагружения.
3. Разработка методического подхода к определению сдвиговой прочности и параметров прочности песчаных и глинистых грунтов в условиях динамического нагружения.
4. Сравнительный анализ сдвиговой прочности и параметров прочности в статических и динамических условиях по данным экспериментальных исследований.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются плиоцен-четвертичные песчаные грунты аллювиального генезиса, отобранные в долине р. Волга (район г. Волгограда), четвертичные песчаные аллювиальные грунты, отобранные в долине р. Дунай (район г. Пакш), модельные грунты заданной влажности и плотности, изготовленные из глинистых грунтов оксфордского яруса верхнего отдела юрской системы морского генезиса, отобранные в районе города Обнинск Калужской области и четвертичные глинистые грунты морского генезиса, отобранные в северо-восточной части Баренцева моря природного сложения. Предметом исследования являются знания о закономерностях изменения прочностных характеристик песчаных и глинистых грунтов в условиях динамического нагружения.

Научная новизна работы

1. Предложен новый методический подход к определению параметров динамической сдвиговой прочности водонасыщенных модельных образцов песчаных и глинистых грунтов при совместном анализе данных статических и динамических трехосных испытаний.
2. Впервые доказано, что при прочих равных условиях величина угла внутреннего трения водонасыщенных образцов песчаного грунта средней плотности в статических и динамических условиях одинакова.
3. Впервые показано, что при прочих равных условиях величина угла внутреннего трения водонасыщенных образцов глинистого грунта с преимущественно коагуляционной структурой в статических и динамических условиях одинакова, однако при динамическом нагружении сцепление грунта снижается.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Предложены критерии идентификации напряженного состояния грунта в момент разрушения при динамическом воздействии, на основании которых разработана методика экспериментальной оценки сдвиговой прочности песчаных и глинистых грунтов в таких условиях.

2. Показано, что прочностные параметры песков средней плотности - угол внутреннего трения (φ) и сцепление (C) - могут определяться в статических испытаниях, но для корректного определения их сдвиговой прочности и возможности разрушения в динамических условиях необходим контроль порового давления.

3. Доказано, что величина сдвиговой прочности и прочностных параметров глинистых грунтов зависят от вида прикладываемой нагрузки. Определение параметров динамической прочности глинистых грунтов более трудоемко и предполагает а) предварительную экспериментальную оценку деформации грунта при разрушении в статических условиях и б) экспериментальную же оценку степени снижения сцепления грунта.

Методология и методы исследований. Данное диссертационное исследование опирается на теоретические основы и методологию таких научных направлений как грунтоведение, механика и динамика грунтов. Для изучения закономерностей изменения прочностных характеристик песчаных и глинистых грунтов в условиях динамического нагружения и разработки методики их определения были использованы как экспериментальные, так и теоретические методы исследования инженерной геологии и других геологических наук.

Экспериментальная часть исследования включала в себя ряд необходимых определений показателей состава и свойств изучаемых дисперсных грунтов и проведение лабораторных статических и динамических испытаний в условиях трехосного сжатия. Обработка полученных экспериментальных результатов проводилась путем анализа траекторий эффективных напряжений, представленных в виде инвариант напряжений – девиатора (q) и среднего эффективного напряжения (p'). Определение прочности и параметров прочности грунтов было проведено в рамках теории прочности Кулона-Мора.

Основные защищаемые положения

1. **Общий методический подход к экспериментальной оценке сдвиговой прочности дисперсных грунтов в условиях трехосного сжатия, мобилизуемой при динамическом нагружении, который основан на определении напряженного состояния образца в момент разрушения по критериям разжижения или предельной деформации грунта.**

Особенности предложенного подхода заключаются в следующем:

- напряженное состояние в момент разрушения песчаных грунтов определяется на траектории эффективных напряжений как максимальное значение девиатора перед разжижением грунта в том же цикле при соответствующем ему среднем эффективном напряжении;

- для глинистых грунтов напряженное состояние в момент разрушения фиксируется на траектории эффективных напряжений как максимальное значение девиатора и соответствующего ему среднего эффективного напряжения в том цикле нагружения, при котором уровень осевой деформации равен среднему предельному значению при разрушении этого грунта в серии статических трехосных испытаний.

Описанное напряженное состояние и соответствует сдвиговой прочности дисперсного грунта в условиях динамического нагружения.

2. Снижение сдвиговой прочности водонасыщенных модельных образцов песчаного грунта средней плотности в динамических условиях по сравнению со статическими обусловлено изменением напряженного состояния грунта, при этом параметры прочности (угол внутреннего трения и сцепление) остаются неизменными. Эти параметры могут приниматься по данным статических испытаний, но для корректного определения сдвиговой прочности и возможности разрушения при динамическом нагружении необходим контроль порового давления.

Полученные показатели сдвиговой прочности песков мелких, средней крупности и гравелистых в сериях статических и динамических трехосных испытаний совпали, что свидетельствует о независимости угла внутреннего трения и сцепления от режима нагружения в песчаных грунтах.

3. Глинистые грунты с преимущественно коагуляционной структурой при динамическом и статическом нагружении имеют идентичный угол внутреннего трения, при этом показатель сцепления, в условиях статического испытания образцов, выше полученного при динамическом нагружении.

Параметры прочности, полученные экспериментальным путем на водонасыщенном модельном глинистом грунте заданной влажности и плотности, показывают равенство углов внутреннего трения в сериях статических и динамических трехосных испытаний и уменьшение сцепления в 2,5-3,5 раза при динамическом нагружении в отличие от статического.

Структура работы, фактический материал и личный вклад автора. Диссертационная работа изложена на 107 страницах и состоит из введения, 4 глав, выводов, списка литературы из 102 источников и 2 приложений. Текст сопровождается 13 таблицами и 72 рисунками.

Вся теоретическая и экспериментальная часть исследований выполнена лично автором на кафедре инженерной и экологической геологии Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Основные положения работы и ее выводы основываются на результатах более 100 лабораторных испытаний при трехосном сжатии, выполненных на песчаных и глинистых грунтах, и расчетах, проведенных на их основе.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных научных результатов обеспечивается применением в ходе диссертационного исследования современных методов лабораторных испытаний, а также качеством данных и достаточным количеством выполненных экспериментов.

Основные положения диссертационной работы изложены в 5 статьях в журналах «Инженерные изыскания» (2014, №5-6), «Геотехника» (2016, №2), «Инженерная геология» (2017, №1, 2019, №2) и «Грунтоведение» (2019, №2), 4 статьях в сборниках «Инженерные изыскания в строительстве» (2016, 2018), «Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии» (2021), «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (2022).

Основные результаты исследования докладывались на отечественных и международных конференциях: Общероссийской научно-практической конференция и выставке «Современные полевые и лабораторные методы исследования грунтов — изыскания и проектирование» (Москва, 2018); Международном форуме и выставке высотного и уникального строительства 100+ (Екатеринбург, 2018); XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставке «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, 2018); Международной научной конференции «Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии» (Москва, 2018); XVII Общероссийской научно-практической конференции и выставке «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, 2022).

Благодарности. Автор выражает особую благодарность научному руководителю Вознесенскому Евгению Арнольдовичу за помощь в постановке и реализации диссертационной работы, четкую формулировку поставленных целей и задач, организацию и контроль за ходом исследования. Автор признателен всем сотрудникам кафедры инженерной и экологической геологии Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова за ценные советы и замечания, полученные при выполнении диссертационного исследования, а также выражает искреннюю благодарность за научные консультации и моральную поддержку М.С. Никитину, А.Ю. Мирному, Е.С. Кушнаревой, Е.А. Федяевой, М.С. Чернову, Н.А. Ларионовой, В.В. Фуниковой, Е.С. Колиной, В.И. Ждакаеву. Диссертант глубоко признателен своим родителям

Сенцову Алексею Михайловичу и Сенцовой Юлии Геннадьевне, а также учителям Л.Е. Жадановой, А.А. Гордееву, А.И. Целищеву и А.Е. Кобитянскому, пробудившим интерес автора к научным исследованиям.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Прочностные свойства дисперсных грунтов в условиях динамического нагружения

В главе приведен анализ опубликованной научно-технической литературы по тематике исследования, который показывает следующее:

- Реакция дисперсных грунтов на приложение динамической нагрузки различна по форме проявления и может быть выражена в уплотнении, разуплотнении, разжижении или развитии циклической подвижности. Виды реакции, в свою очередь, зависят от влажности, плотности сложения, дисперсности, а также условий дренирования. Каждый из вариантов реакции грунтов на периодическое нагружение при определенных условиях может привести к накоплению критического уровня деформаций.
- При изучении прочности грунтов необходимо разделять понятия: прочности, предела прочности, условий прочности и прочностных характеристик. Прочность грунта зависит от вида моделируемого напряженного состояния, скорости деформирования, условий дренирования в течение стадии сдвига и выбранной схемы траектории нагружения.
- Широко распространенным видом лабораторных испытаний при изучении статической и динамической сдвиговой прочности дисперсных грунтов является трехосное сжатие. Существенным моментом при проведении такого рода испытаний является выбор критерия разрушения, при котором определяется предел прочности испытываемого грунта. В динамической постановке задачи при изучении сдвиговой прочности дисперсных грунтов существует необходимость разработки новых, научно обоснованных критериев разрушения.
- Поведение грунтов при статическом и кинематическом режиме нагружения описано многочисленными исследователями, и определение предела сдвиговой прочности и прочностных параметров не вызывает вопросов. При этом изменение прочности при воздействии динамических нагрузок остается дискуссионным - существуют различные точки зрения на природу этого процесса, в том числе на количественную оценку динамических характеристик прочностных свойств грунтов.
- Вопросом изменения сопротивления сдвигу дисперсных грунтов занимались как отечественные, так и зарубежные ученые. Снижение сдвиговой прочности песчаных грунтов при динамическом воздействии по мнению различных авторов может быть связано как с возможным изменением истинного коэффициента внутреннего трения и удельного сцепления, так и с изменением напряженного состояния грунта при динамическом воздействии. Изменение сопротивления глинистых грунтов сдвигу разные авторы

связывают с изменением напряженного состояния грунта и изменением угла внутреннего трения и/или удельного сцепления вследствие динамического воздействия в связи с проявлением тиксотропных свойств.

○ Обзор исследований, посвященных изучению прочности дисперсных грунтов при динамическом воздействии, выявил потребность разработки и научного обоснования единого подхода к определению мобилизуемой при таких условиях прочности грунта и ее параметров.

Глава 2. Характеристика исследованных грунтов

В главе приведено описание объектов исследования и их основных физических и физико-химических характеристик.

Для того, чтобы исключить вариации сдвиговой прочности грунтов из-за влияния физических и физико-химических свойств исследования проводились на искусственно-сформованных водонасыщенных модельных образцах и грунтах природного ненарушенного сложения с близкими свойствами. В рамках данной работы были выбраны следующие грунтовые разности:

1. Плиоцен-четвертичные песчаные грунты средней плотности (аллювий р. Волга, район г. Волгоград). По классификации ГОСТ 25100-2020 грунт отнесен к пескам мелким, плотность твердой фазы $2,64 \text{ г/см}^3$.

2. Четвертичные песчаные грунты средней плотности (аллювий р. Дунай, площадка АЭС Пакш-2, Венгрия). По классификации ГОСТ 25100-2020 грунты отнесены к пескам мелким, средней крупности и гравелистым. Плотность твердой фазы варьировала в диапазоне от $2,70$ до $2,75 \text{ г/см}^3$ – для песков мелких, от $2,64$ до $2,74 \text{ г/см}^3$ – для песков средней крупности, от $2,65$ до $2,73 \text{ г/см}^3$ – для гравелистых песков.

Выбор средней плотности сложения песчаных грунтов был обусловлен в первую очередь удобством формирования образцов. Также водонасыщенные пески средней плотности при проведении динамического нагружения при определенном соотношении амплитуды осевой нагрузки и сжимающих напряжений (σ_d/σ_m) весьма склонны к разжижению, которого необходимо было достичь в ходе лабораторного эксперимента.

3. Модельные глинистые грунты (из глин J_{3ox} , морского генезиса, район г. Обнинск Калужской области). По классификации ГОСТ 25100-2020 грунт отнесен к глине легкой пылеватой тугопластичной. В рамках диссертационного исследования лабораторные испытания проводились на модельных образцах заданной плотности и влажности, изготовленных из пасты глинистого грунта оксфордского яруса верхнего отдела юрской системы. Плотность модельных образцов варьировала в диапазоне от $1,59$ до $1,63 \text{ г/см}^3$, влажность - в диапазоне от 58 до 61%.

4. Голоценовые глинистые грунты морского генезиса (северо-восточная часть Баренцева моря). По классификации ГОСТ 25100-2020 грунт отнесен к глине тяжелой текучепластичной. Естественная влажность грунтов составляет 79–87 %, плотность 1,47–1,55 г/см³.

Глава 3. Методика экспериментальных исследований прочности дисперсных грунтов в лабораторных условиях

В главе описана методика проведения определений ряда необходимых показателей состава и свойств дисперсных грунтов, а также лабораторных статических и динамических испытаний в условиях трехосного сжатия.

Автором было выполнено и обработано 23 статических и 34 динамических трехосных испытания образцов песчаных грунтов и 16 статических и 35 динамических трехосных испытаний глинистых образцов. Лабораторные эксперименты проводились на приборах: статического и динамического трехосного сжатия «MINIDYN 2 Hz 10 kN» (GDS, Великобритания), статического и динамического трехосного сжатия (ООО «НПП ГЕОТЕК», Россия), динамического трехосного сжатия (Geotechnical Instruments, Канада) с дополнительным кинематическим приводом (ООО «НПП ГЕОТЕК», Россия).

Трехосные испытания проводились в несколько этапов: подготовка образца, контроль степени водонасыщения, консолидация, статическое или динамическое нагружение и обработка полученных результатов (рис.1).

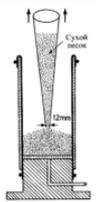
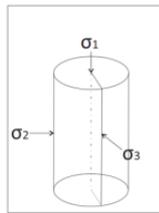
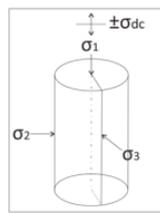
1	песчаные грунты	<ol style="list-style-type: none"> Укладка песка методом сухой отсыпки Обжатие $\sigma_3=10-15$ кПа Насыщение CO_2 под давлением 10 кПа в течение 30 минут Заполнение образца дистиллированной и вакуумированной водой снизу с напором около 30 см 	 <p>Метод сухой послойной отсыпки</p>	глинистые грунты	<ol style="list-style-type: none"> Изготовление модельного грунта заданной W и ρ в консолидаторе/подбор естественных грунтов «близнецов» Вырезание образца из монолита ненарушенного грунта 	 <p>Консолидометр ООО «НПП Геотек»</p>
2	Проверка степени водонасыщения	Контроль параметра Скемптона $V=\Delta U_i/\Delta\sigma_i$ (где ΔU_i – приращение порового давления в образце грунта, $\Delta\sigma_i$ – приращение полного среднего напряжения)				
3	Консолидация	Изотропная или анизотропная консолидация при $\sigma_3 = 15-611$ кПа до достижения критерия стабилизации по объему отжатой из образца жидкости $V_{rec} = 5 \text{ мм}^3$ за 5 минут				
4	Статическое или динамическое нагружение	статическое нагружение $V_{\sigma_1} = 0.02-0.3$ мм/мин критерий остановки эксперимента: $\varepsilon_1 \geq 20\%$	 <p>НДС грунта (статическое нагружение)</p>	динамическое нагружение $\sigma_d/\sigma_3 = 0.36-0.70$ $f = 0.1$ Гц критерий остановки эксперимента: $\varepsilon_1 \geq 15\%$ / $PPR = 1.00$	 <p>НДС грунта (динамическое нагружение)</p>	

Рис.1. Методика проведения статических и динамических трехосных испытаний

Серия *статических* трехосных испытаний проводилась при всесторонних напряжениях от 15 до 611 кПа, со скоростью деформации от 0,02 до 0,30 мм/мин в зависимости от вида грунта. Испытания проводилось до достижения 20% осевой

деформации. Серия *динамических* трехосных испытаний проводилась с частотой 0,1 Гц при разных всесторонних напряжениях и с разными амплитудами динамических осевых напряжений для как можно более полной характеристики изменений прочности грунтов в широком диапазоне нагрузок. Динамическая нагрузка прикладывалась до достижения более 15% осевой деформации либо до достижения $PPR = U/\sigma_m = 1$.

По результатам каждого испытания вычислялся набор параметров, необходимый для анализа и интерпретации поведения грунта: высота, площадь и объем образца грунта после консолидации, относительная вертикальная деформация, скорректированная площадь и величина осевого напряжения образца грунта на этапе девиаторного нагружения. Обработка полученных результатов испытаний проводилась в рамках теории прочности Кулона-Мора и анализа траекторий эффективных напряжений $p'-q$.

Траектории эффективных напряжений были построены в координатах второй инвариант девиатора напряжений при осесимметричном трехосном сжатии (далее по тексту «девиатор») – q , среднее эффективное напряжение – p' , рассчитанных по формулам (1–2):

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3), \quad (1)$$

$$p' = \frac{(\sigma_1' + 2\sigma_3')}{3}, \quad (2)$$

Параметры прочности определялись расчетом в соответствии с ГОСТ 12248.3–2020.

Глава 4. Оценка динамической прочности водонасыщенных модельных образцов дисперсных грунтов

В главе представлены результаты исследований автора, направленных на изучение закономерностей изменения сдвиговой прочности и параметров прочности водонасыщенных песчаных и глинистых грунтов в условиях статического и динамического нагружения.

Для разработки единого подхода к определению сдвиговой прочности песчаных грунтов были выполнены испытания водонасыщенных модельных образцов песка мелкого средней плотности.

При интерпретации результатов *статических* трехосных испытаний точка разрушения определялась графически на диаграмме сдвига грунта, построенной в координатах девиатор (q) - осевая деформация (ε_1) (рис.2). Для дальнейшей интерпретации напряженное состояние в момент разрушения идентифицировано на траекториях эффективных напряжений $p'-q$ (рис. 3), соответствующих развитию напряжений в образцах на стадии сдвига.

При *динамических* трехосных испытаниях песков во всех случаях было достигнуто его разжижение, хотя и в разном числе циклов воздействия. Типичный пример полученных результатов приведен на рис. 4.

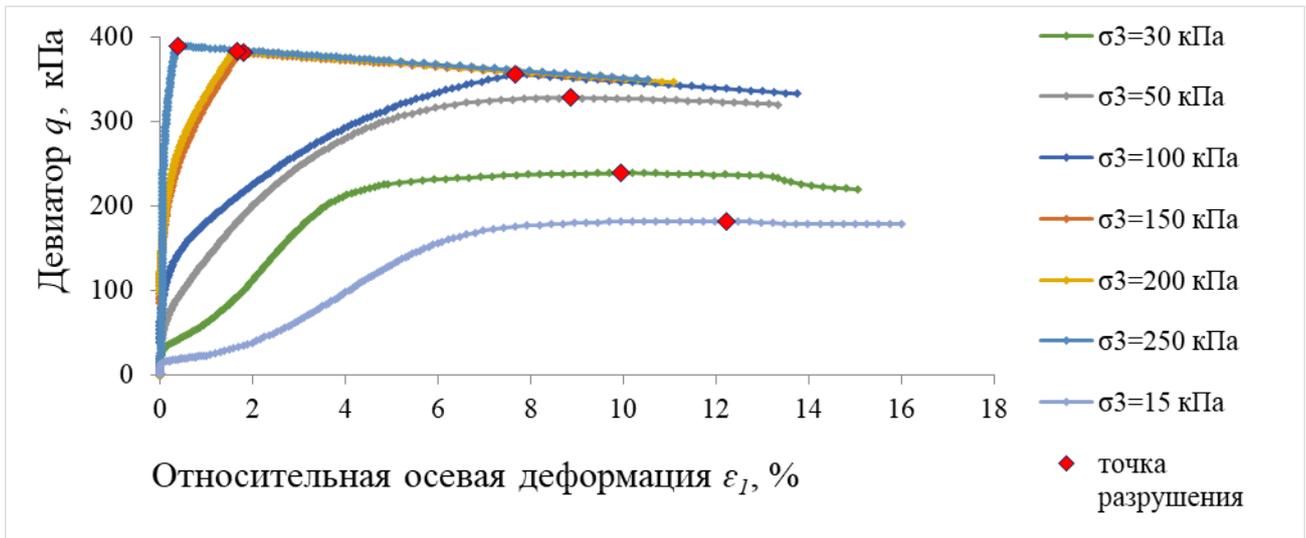


Рис. 2. Зависимость девиатора от относительной осевой деформации для серии статических трехосных испытаний на модельных водонасыщенных образцах песка мелкого средней плотности

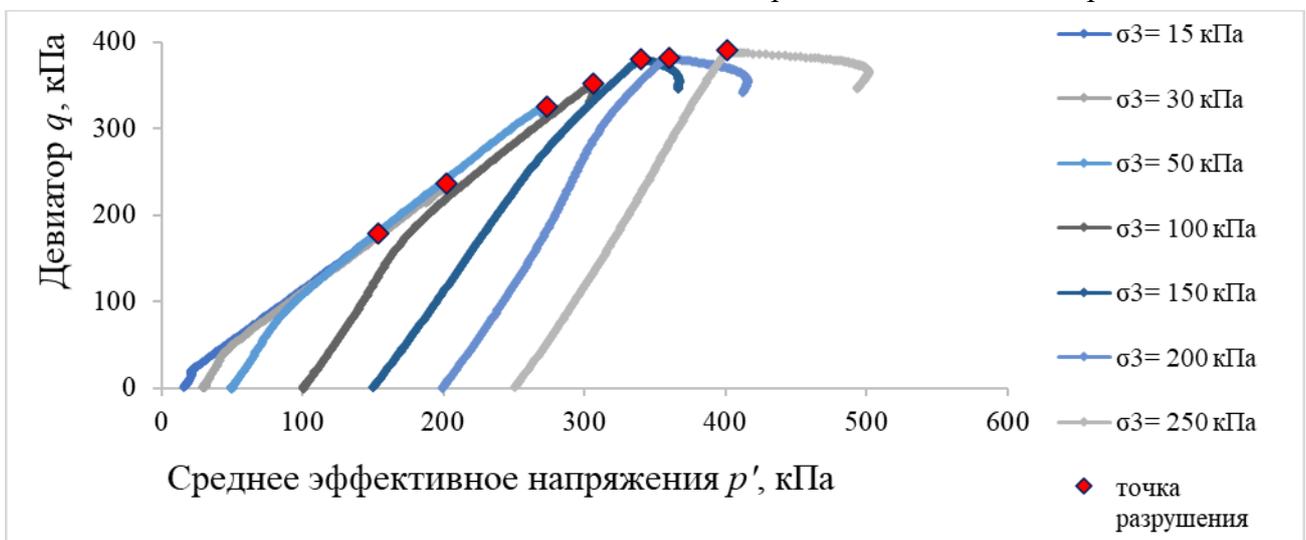


Рис. 3. Траектории эффективных напряжений для серии статических трехосных испытаний на модельных водонасыщенных образцах песка мелкого средней плотности

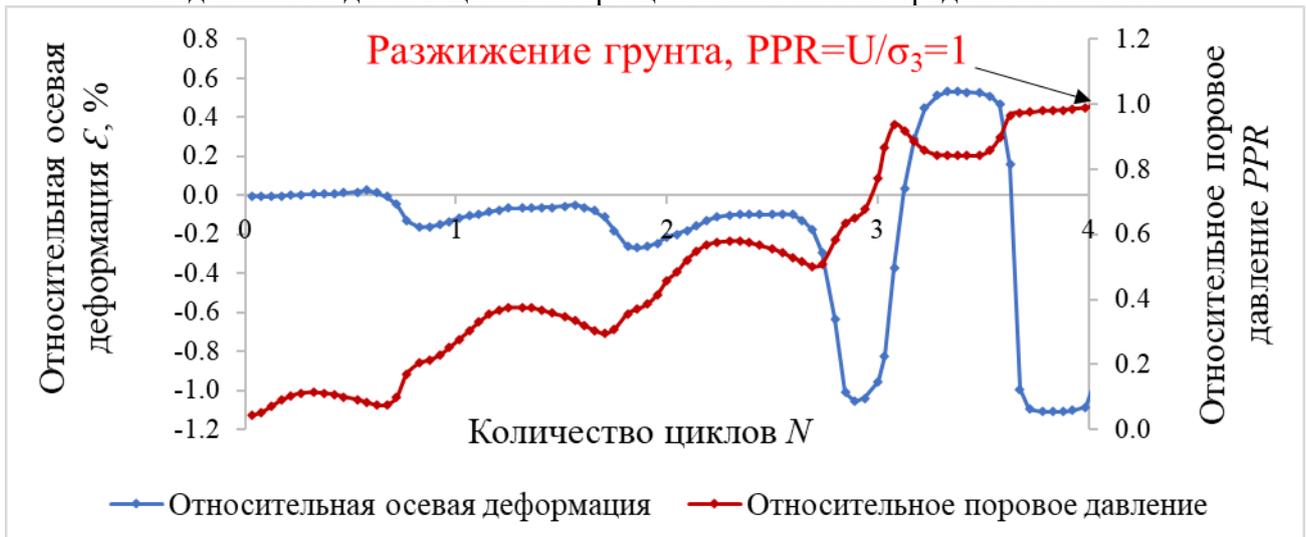


Рис. 4. Разжижение модельного образца водонасыщенного песка средней плотности при динамическом нагружении ($\sigma_3 = 100$ кПа, $\sigma_d = 41$ кПа)

Интерпретация полученных результатов была затруднена неочевидностью момента разрушения образца. При обработке статических испытаний можно однозначно определить напряженное состояние в момент разрушения грунта на диаграмме девиатор (q)-осевая деформация (ε_1) при максимальном значении девиатора напряжений, и он будет соответствовать максимальному значению напряжения, которое может выдержать грунт без разрушения. При обработке результатов динамических испытаний этим способом воспользоваться невозможно ввиду отсутствия явных признаков, знаменующих разрушение грунта.

Для определения напряженного состояния в момент разрушения в динамических трехосных испытаниях автор использовал анализ траекторий эффективных напряжений, которые описывают изменение напряженного состояния грунта в течение всей стадии динамического или статического нагружения. Для каждого опыта были построены p' - q диаграммы (рис. 5, 6). Логичным представляется напряженное состояние в момент разрушения («точку разрушения») в динамических условиях характеризовать пиковым значением девиатора перед разжижением грунта в том же цикле и соответствующим ему средним эффективным напряжением. Это и будет максимальным возможным напряжением, которое может выдержать грунт – сдвиговой прочностью при динамическом нагружении.

Если нанести «точки разрушения», полученные из динамических трехосных испытаний, на диаграмму p' - q и проанализировать совместно с «точками разрушения», полученными по результатам статических трехосных испытаний, мы увидим, что они с высокой величиной достоверности аппроксимации ложатся на единую прямую (рис. 7). Это означает, что исследуемый песчаный грунт с заданным коэффициентом пористости в поле эффективных напряжений имеет уникальную линию разрушения ($FL\ p'-q$), которая имеет вид линейного уравнения $q = 1.151p'$. Как видно из рисунка 8 А, к кругам Мора, построенным по результатам статических и динамических трехосных испытаний, можно построить единую касательную (линию разрушения $FL\ \tau-\sigma$). Следовательно, для области нормальных напряжений до 200 кПа сцепление песчаного грунта будет равно 0, угол внутреннего трения составит 36° .

После разработки единого подхода к определению сдвиговой прочности песчаного грунта для подтверждения разработанной методики и расширения доказательной базы были проведены и обработаны статические и динамические испытания на трех выборках песчаных грунтов – песках мелких, средней крупности и гравелистых. Используя предложенный подход по определению «точки разрушения» в статических и динамических трехосных испытаниях, были построены диаграммы Кулона-Мора (Рис. 8 В-Д). Результаты статических и динамических трехосных испытаний хорошо согласуются между собой.

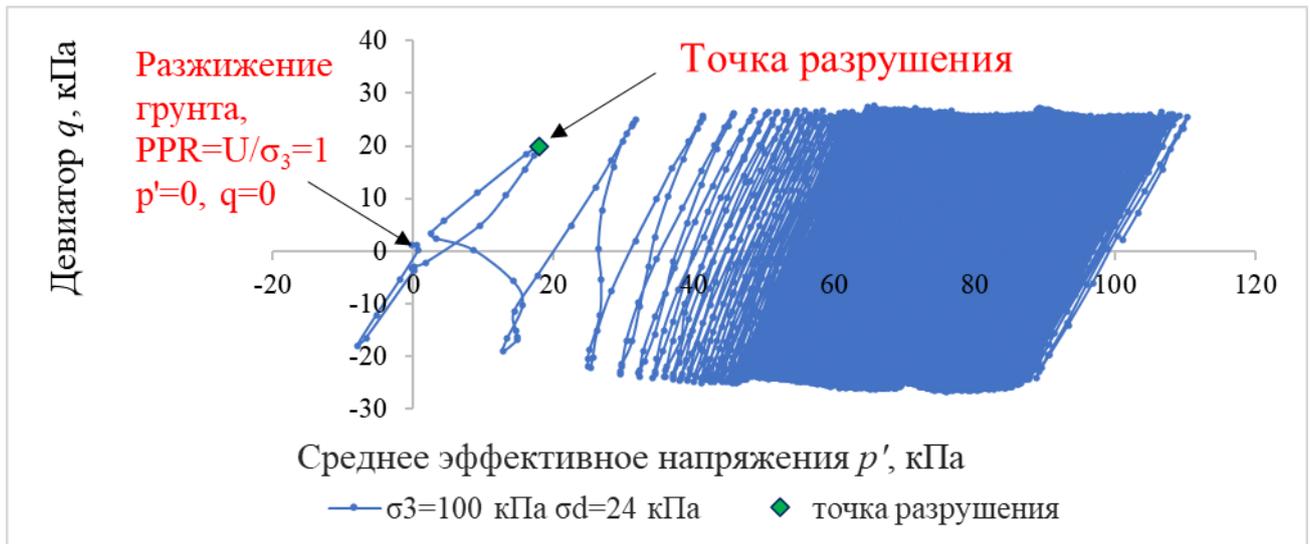


Рис. 5. Траектория эффективных напряжений водонасыщенного модельного образца песка мелкого средней плотности при испытании на динамическое трехосное сжатие

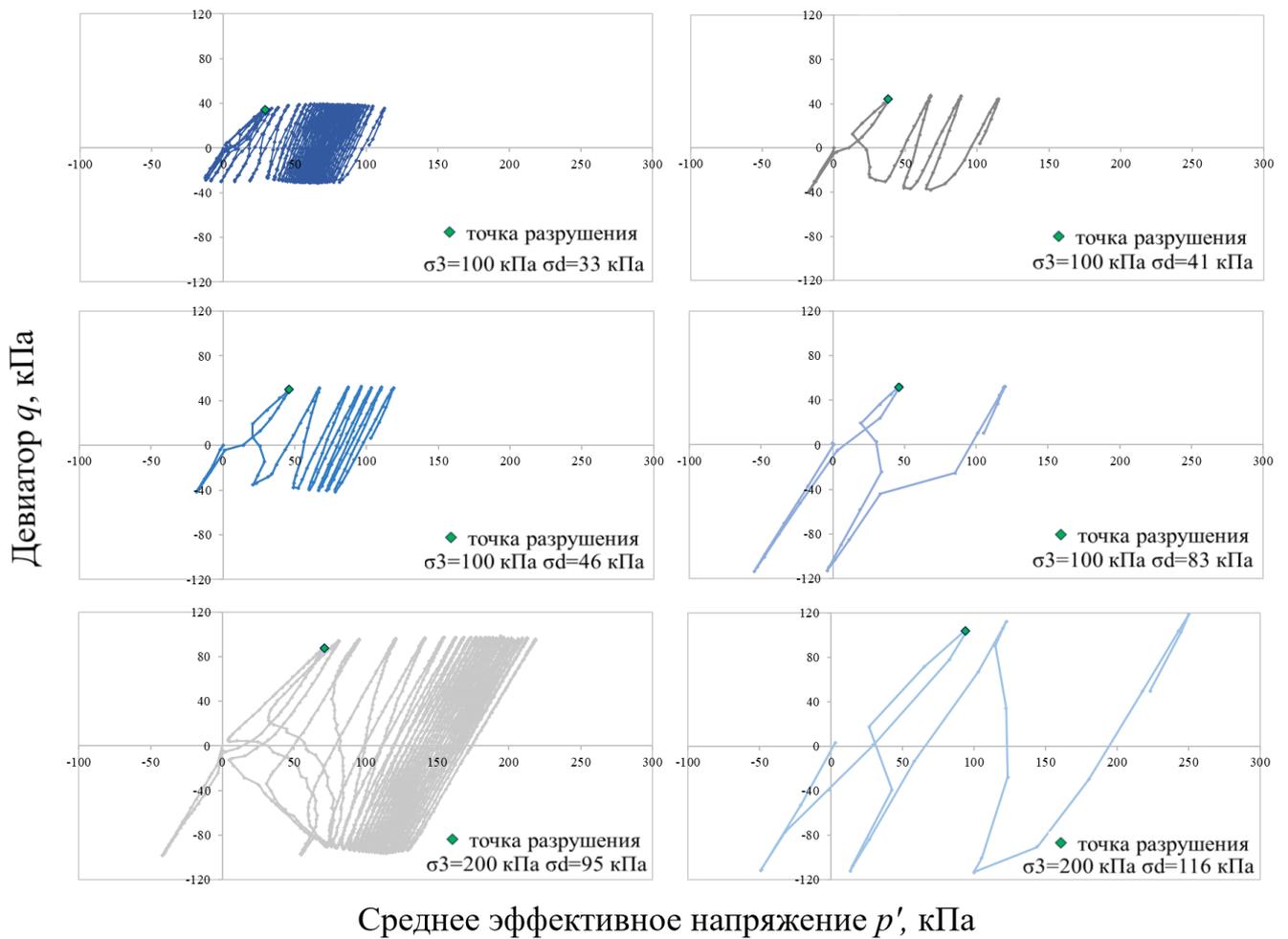


Рис. 6. Траектории эффективных напряжений для каждого из опытов серии динамических трехосных испытаний на модельных образцах водонасыщенного песка мелкого средней плотности

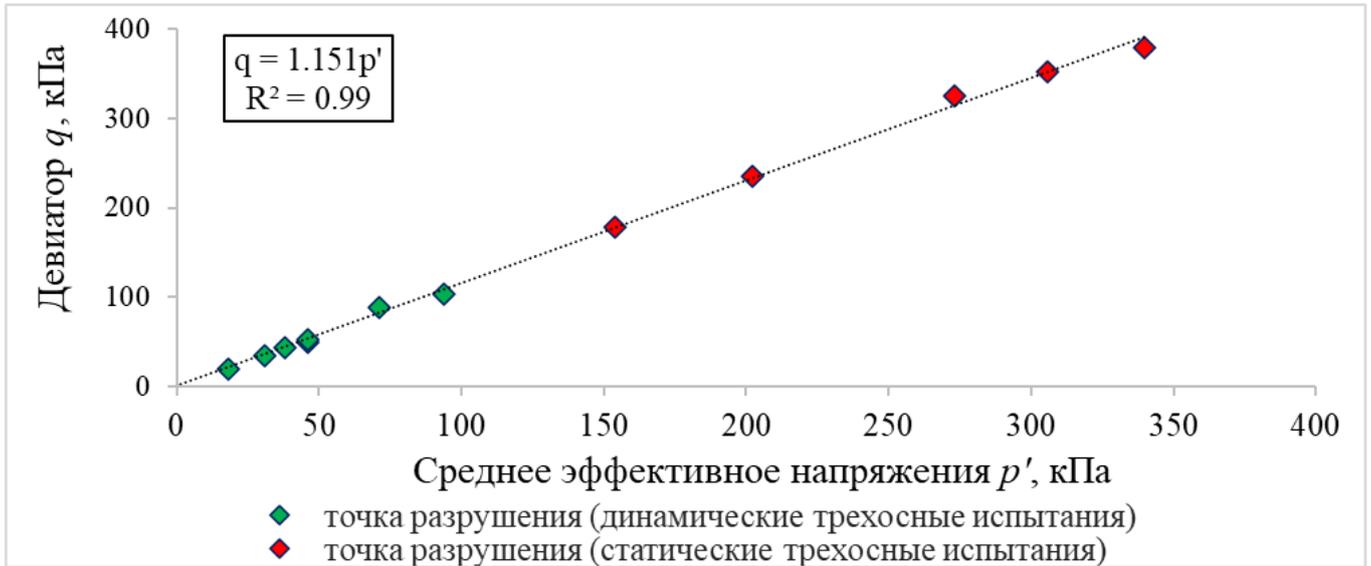


Рис.7. Линия разрушения ($FL p'-q$), полученная по результатам серии статических и динамических трехосных испытаний на модельном образце песка мелкого средней плотности

Величина сцепления для всех типов грунтов равна 0 в исследуемом диапазоне нагрузок, угол внутреннего трения 36° – для песка мелкого, 37° – для песка средней крупности и 38° – для гравелистого песка.

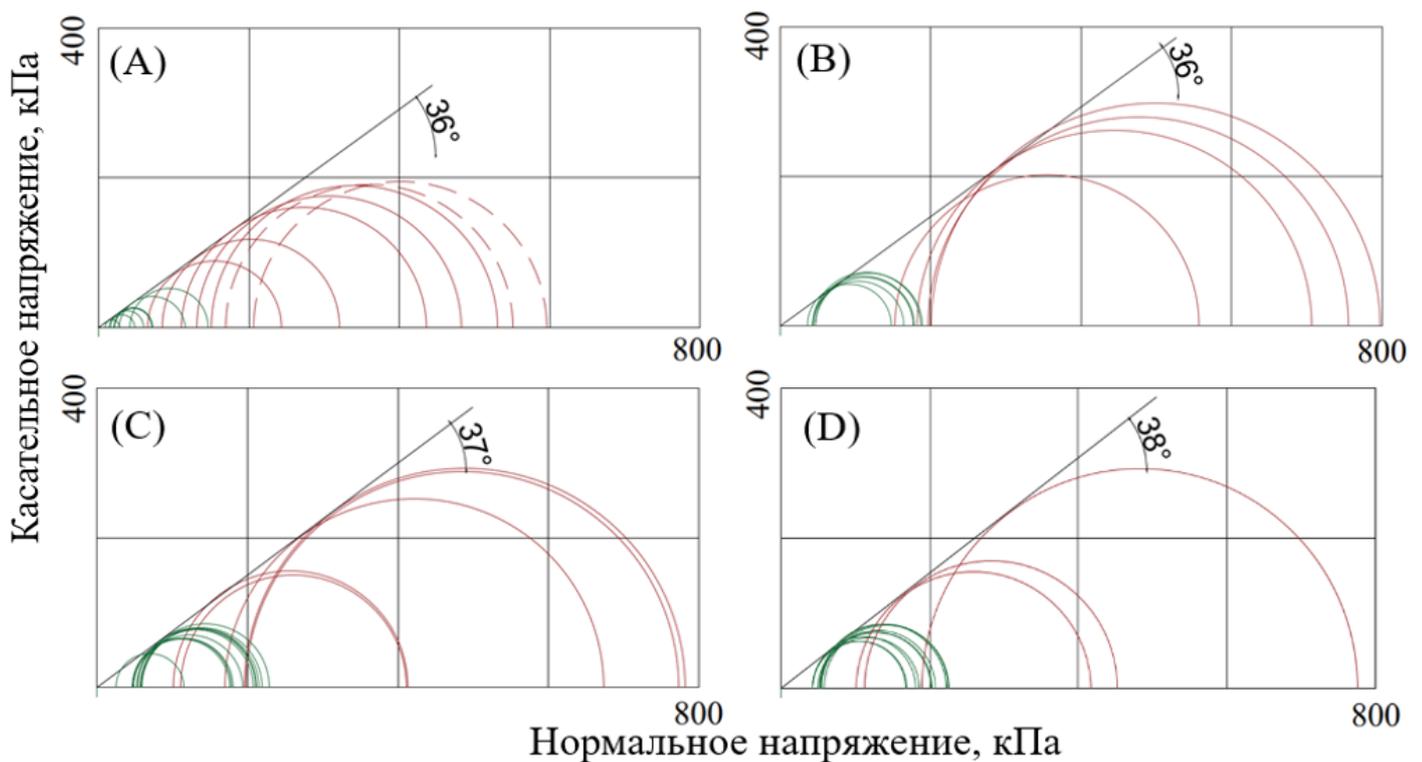


Рис. 8. Диаграммы Кулона-Мора по результатам статических (красный) и динамических (зеленый) трехосных испытаний песчаных грунтов средней плотности: (А) – песок мелкий (Волгоград), (В) – песок мелкий (Дунай), (С) – песок средней крупности (Дунай), (D) – песок гравелистый (Дунай)

Для разработки единого подхода к определению сдвиговой прочности глинистого грунта в лабораторных условиях испытания проводились на модельных образцах с заданной влажностью и плотностью. В серии статических трехосных испытаний напряженное

состояние в момент разрушения определялось по результатам каждого опыта графически на диаграмме девиатор (q)-осевая деформация (ε_1) при максимальном значении девиатора напряжений (рис. 9). Для дальнейшей интерпретации напряженное состояние в момент разрушения идентифицировано на траектории эффективных напряжений p' - q (рис. 10), отражающих развитие напряжений в образцах на стадии сдвига.

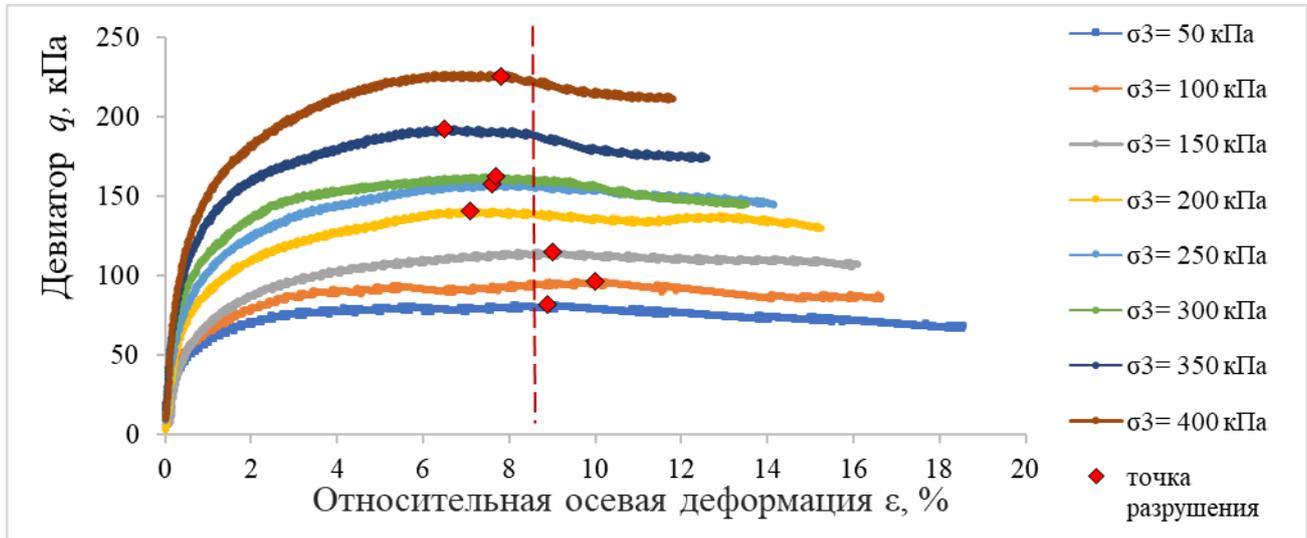


Рис. 9. Зависимость девиатора от относительной осевой деформации для серии статических трехосных испытаний на модельных образцах глины легкой пылевой тугопластичной

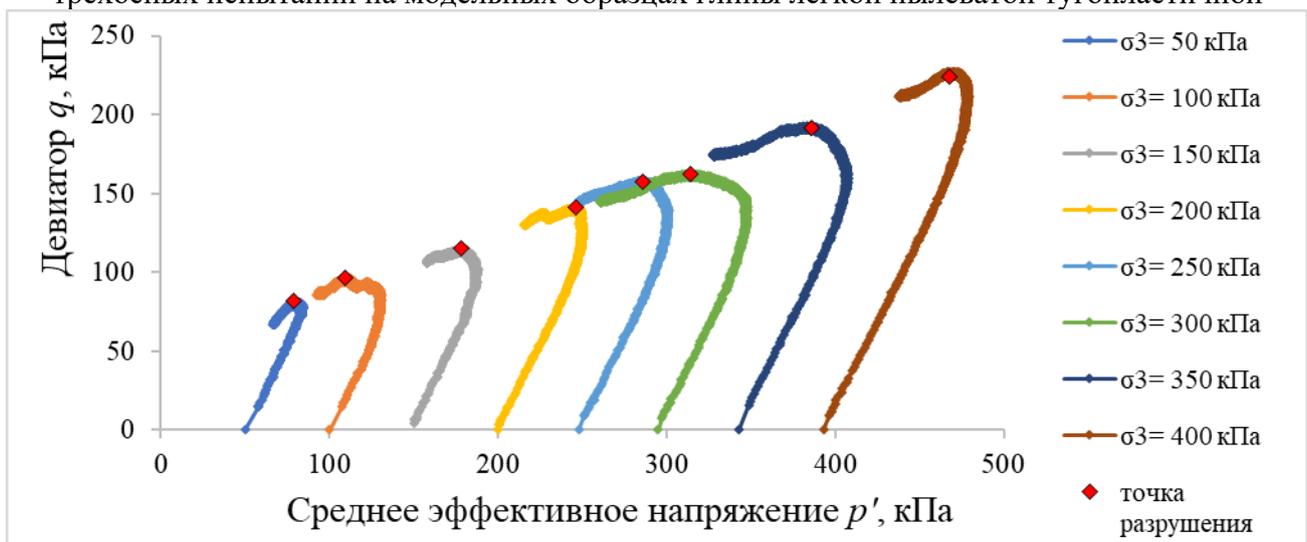


Рис. 10. Траектории эффективных напряжений для серии статических трехосных испытаний на модельных образцах глины легкой пылевой тугопластичной

Однозначная идентификация напряженного состояния в момент разрушения при интерпретации результатов динамических трехосных испытаний изначально была затруднительной. Так как разжижение глинистых грунтов при динамическом воздействии встречается крайне редко и только у весьма чувствительных или плавунных глинистых грунтов, а в проведенной серии испытаний во всех случаях наблюдалась характерная деформация формоизменения грунта, использовать критерий разрушения, предложенный для песчаных грунтов, было невозможно.

С целью поиска критерия разрушения, который может быть использован при интерпретации результатов динамических испытаний глинистых грунтов, автором были проанализированы тренды накопления порового давления (рис. 11), осевой деформации (рис. 12) и удельной рассеянной энергии (рис. 13). Отчетливых признаков, которые могли бы помочь определить напряженное состояние в момент разрушения, при интерпретации полученных графиков не выявлено.

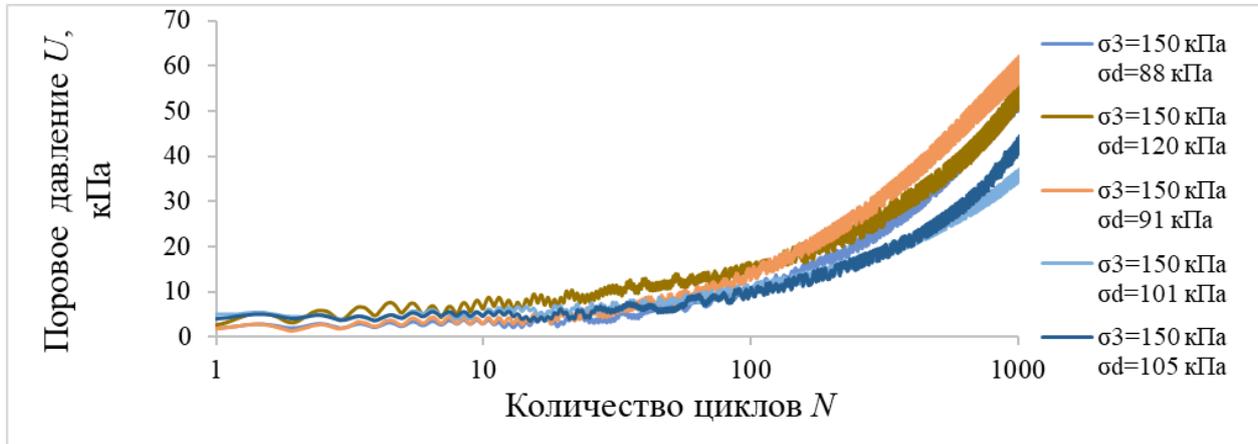


Рис. 11. Зависимость порового давления от количества циклов нагружения для серии динамических трехосных испытаний на модельных образцах глины легкой пылеватой тугопластичной

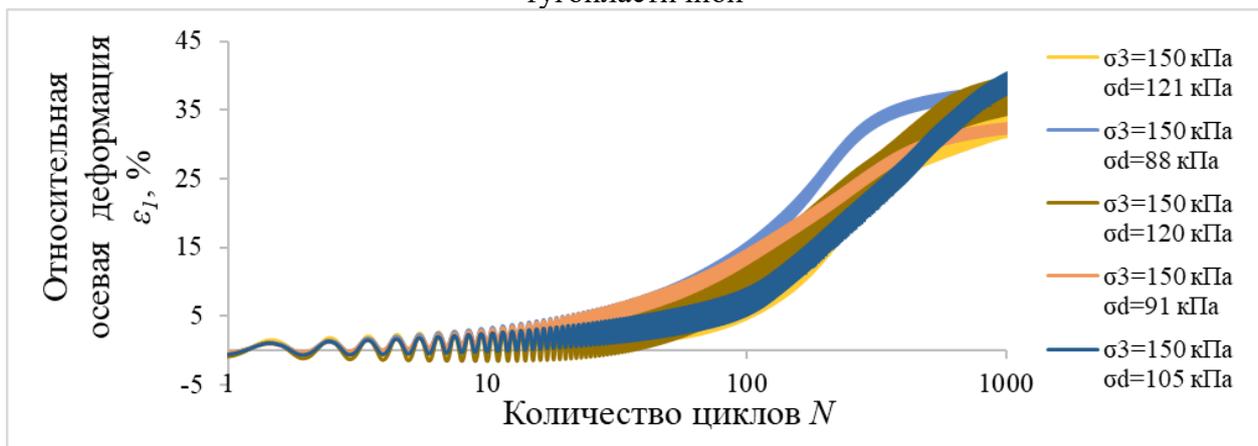


Рис. 12. Зависимость осевой деформации от количества циклов нагружения для серии динамических трехосных испытаний на модельных образцах глины легкой пылеватой тугопластичной

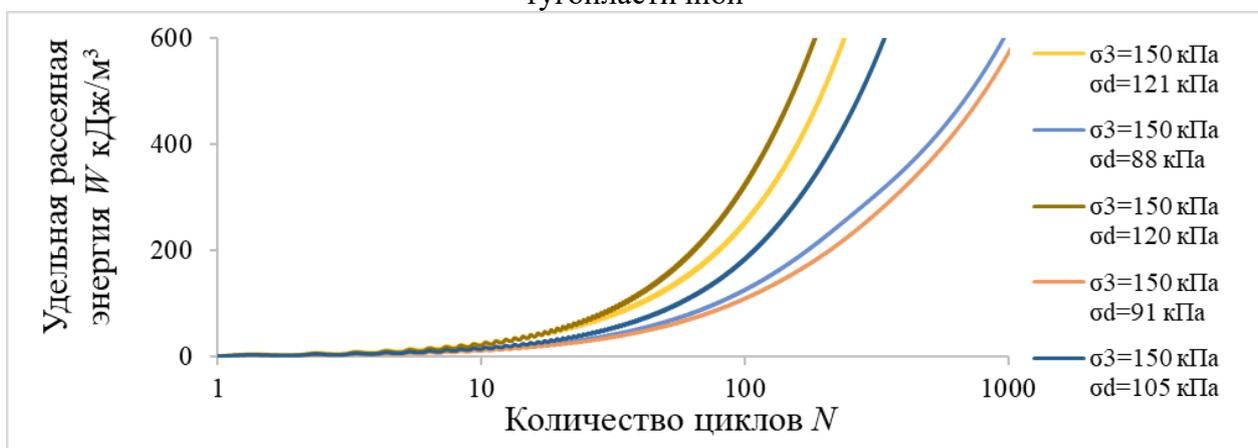


Рис. 13. Накопление удельной рассеянной энергии в функции числа циклов нагружения для серии динамических трехосных испытаний на модельных образцах глины легкой пылеватой тугопластичной

Для глинистых грунтов предлагается фиксировать напряженное состояние в момент разрушения на траектории эффективных напряжений как пиковое значение девиатора и соответствующего ему среднего эффективного напряжения в том цикле нагружения, при котором уровень осевой деформации соответствует среднему предельному значению, полученному при разрушении этого грунта в серии статических трехосных испытаний.

Перенос критерия разрушения по уровню накопленной осевой деформации при разрушении из статических трехосных испытаний на динамические вполне правомерен, поскольку уровень критического смещения структурных элементов образца исследуемого грунта не зависит от вида прикладываемой нагрузки. В целом аналогичный по смыслу подход регламентируется и ГОСТ 12248.3-2020 для проведения трехосных испытаний грунтов.

Полученные нами данные показывают, что среднее значение осевой деформации, достигнутой при разрушении исследованного глинистого грунта в серии статических испытаний, составляет 8% (рис. 9). поэтому «точки разрушения» на траекториях эффективных напряжений при динамическом нагружении идентифицированы при предельной - 8%-ой осевой деформации (рис. 14, 15).

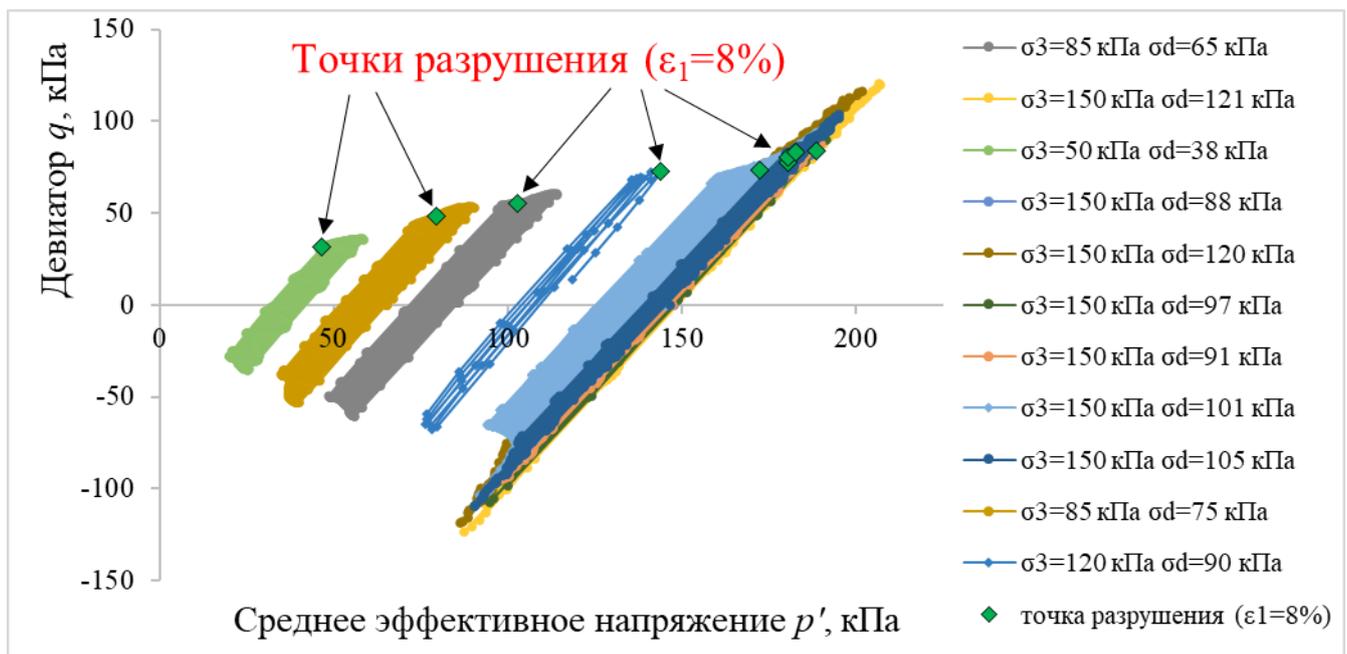


Рис. 14. Линия разрушения ($FL p'-q$), полученная по результатам динамических трехосных испытаний на модельных образцах глины легкой пылеватой тугопластичной

Из рисунка 15 следует, что модельный глинистый грунт в поле эффективных напряжений имеет уникальные линии разрушения ($FL p'-q$) при статическом и динамическом нагружении: $q = 0.36p' + 53.63$ и $q = 0.34p' + 18.53$.

На рисунке 16 (А) для этого же грунта построены Круги Мора из условия разрушения при напряжениях, соответствующих уровню деформации 8%. При анализе результатов статических и динамических трехосных испытаний видно, что и в одном, и в другом режиме

нагрузки исследуемый грунт имеет неизменный угол внутреннего трения, равный 10° . Величина сцепления при статических трехосных испытаниях составляет 27 кПа, при динамических 10 кПа.

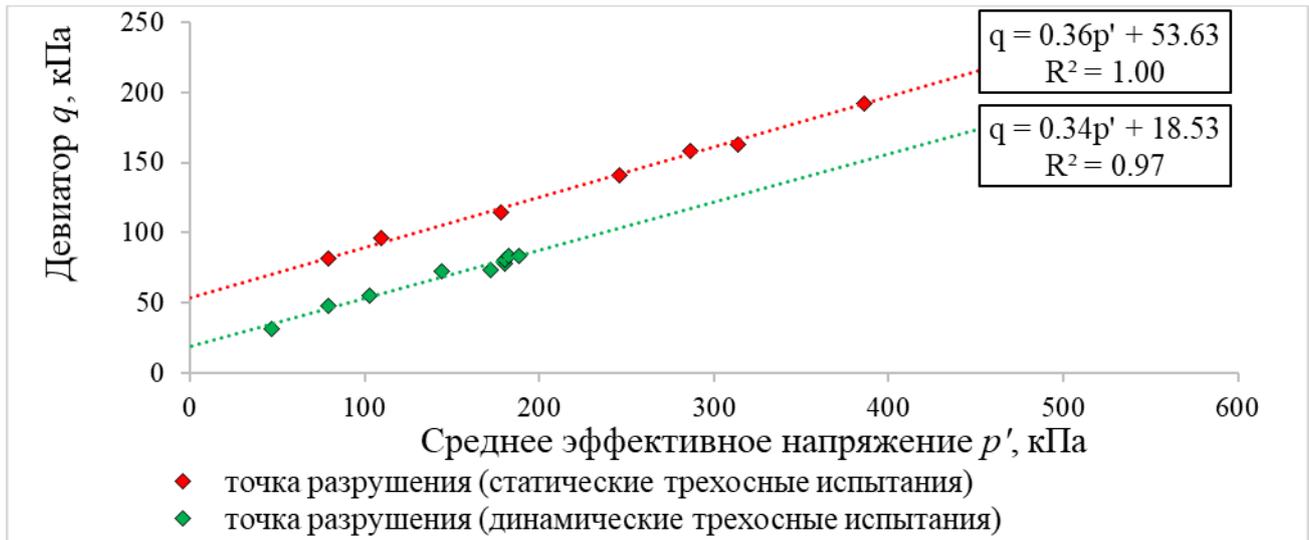


Рис. 15. Линия разрушения ($FL p'-q$), полученная по результатам серии статических и динамических трехосных испытаний на модельных образцах глины легкой пылеватой тугопластичной

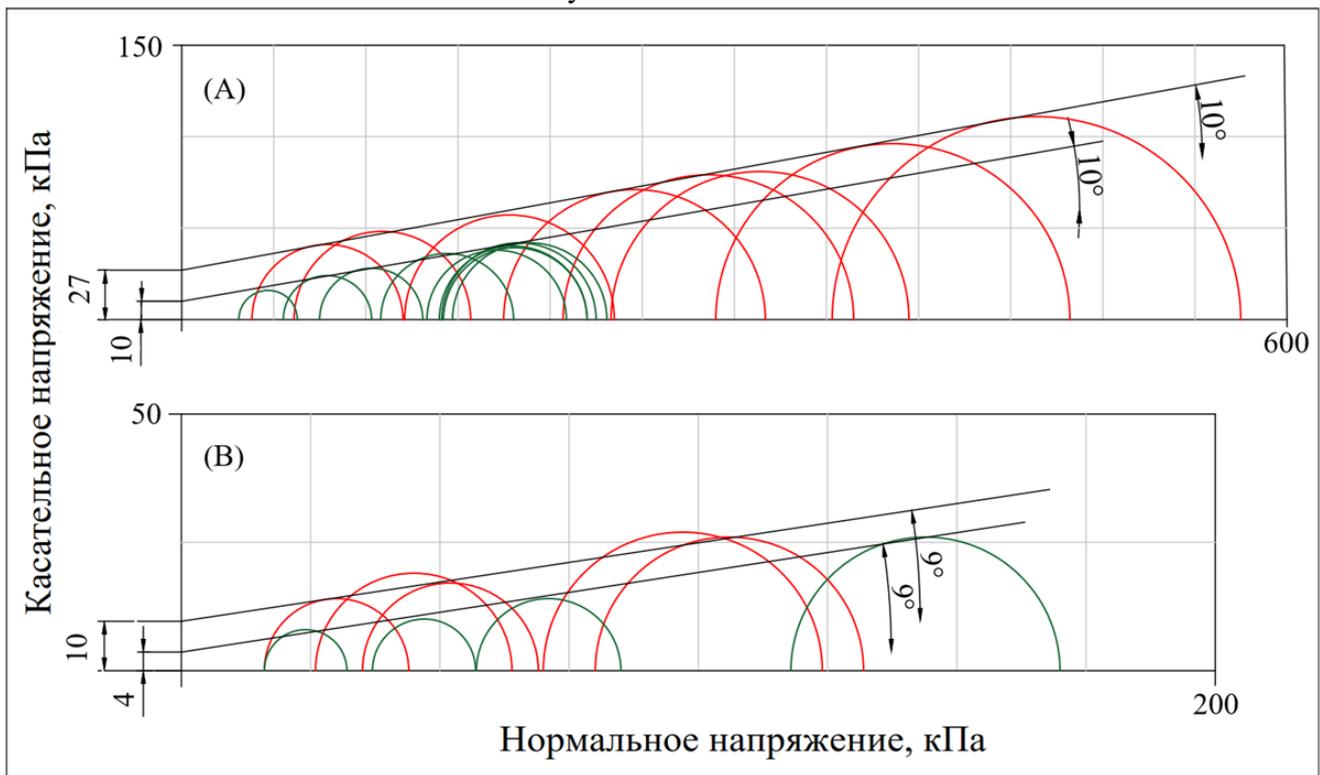


Рис. 16. Диаграмма Кулона-Мора по результатам статических (красный) и динамических (зеленый) трехосных испытаний для образцов модельной глины легкой пылеватой тугопластичной (А) и глины тяжелой текучепластичной (В)

После разработки единого подхода к определению мобилизуемой прочности глинистого грунта для подтверждения разработанной методики и увеличения доказательной базы были проведены и обработаны статические и динамические испытания на глине тяжелой мягкопластичной четвертичного возраста, морского генезиса при природном сложении. Полученные данные показывают, что среднее значение осевой деформации,

достигнутой при разрушении этого глинистого грунта в статических условиях, составляет 4%. Следовательно точки разрушения при динамическом нагружении идентифицированы нами при 4% осевой деформации. На рисунке 16 (В) по результатам статических и динамических трехосных испытаний построены Круги Мора. При анализе выборок видно, что и в одном, и в другом режиме нагружения исследуемый грунт имеет неизменный угол внутреннего трения равный 9° . Величина сцепления при статических трехосных испытаниях составляет 10 кПа, при динамических 4 кПа.

Неизменность угла внутреннего трения и уменьшение сцепления при динамических испытаниях по сравнению со статическими при прочих равных условиях следует ожидать и для других глинистых грунтов с преобладанием коагуляционных межчастичных контактов. Это связано прежде всего с тем, что коэффициент трения любого материала не зависит от режима нагружения. Уменьшение же сцепления, по мнению автора, происходит за счет проявления тиксотропных свойств исследованных водонасыщенных глинистых грунтов при действии динамической нагрузки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ опубликованной научно-технической литературы по тематике исследования показывает, что реакция дисперсных грунтов на динамическую нагрузку различна по форме проявления и может быть выражена в уплотнении, разуплотнении, разжижении или развитии циклической подвижности. Поведение как влажных, так и водонасыщенных грунтов при статическом и кинематическом режиме нагружения описано многочисленными работами, однако изменение прочности и параметров прочности при воздействии динамических нагрузок остается дискуссионным вопросом – прежде всего, существуют различные точки зрения на количественную оценку динамических характеристик прочностных свойств грунтов. Рассмотрение именно этого вопроса стало центральным в нашем исследовании.

2. Выполненный обзор работ других исследователей также показал, что сдвиговая прочность грунта зависит от вида моделируемого в статическом или динамическом режиме напряженного состояния, скорости деформирования, условий дренирования в течение стадии сдвига и выбранной траектории нагружения. Наиболее широкие возможности моделирования всех этих факторов в лабораторном эксперименте предоставляют испытания в условиях трехосного сжатия, что послужило основанием для выбора метода исследований в данной работе.

3. Наиболее сложным методическим моментом исследования стал выбор критериев разрушения при определении предела сдвиговой прочности образцов грунтов в режиме динамического нагружения, которые были разработаны автором и стали основой для

последующего анализа результатов, как наиболее достоверно и однозначно определяющие достижение разрушения. Напряженное состояние в момент разрушения песчаных грунтов предложено определять на траектории эффективных напряжений как максимальное значение девиатора перед разжижением грунта в том же цикле при соответствующем ему среднем эффективном напряжении. Для глинистых грунтов напряженное состояние в момент разрушения предлагается фиксировать на траектории эффективных напряжений как максимальное значение девиатора при соответствующем ему среднем эффективном напряжении в том цикле нагружения, при котором уровень осевой деформации впервые достигает ее среднего предельного значения, характерного для разрушения этого же грунта в статических трехосных испытаниях. Напряженное состояние песчаных и глинистых грунтов при предложенных критериях определения момента разрушения и соответствует, по мнению автора, прочности грунта, мобилизуемой им в условиях динамического нагружения.

4. Снижение сдвиговой прочности песчаных грунтов при динамическом воздействии по мнению разных авторов может быть связано как с возможным изменением истинного коэффициента внутреннего трения и удельного сцепления, так и с изменением напряженного состояния грунта при динамическом воздействии. Полученные в данном исследовании параметры прочности водонасыщенных песков мелких, средних и гравелистых средней плотности в сериях статических и динамических трехосных испытаний совпадают между собой, что свидетельствует о независимости угла внутреннего трения и сцепления от режима нагружения в песчаных грунтах в одном и том же диапазоне сжимающих напряжений.

5. Изменение сопротивления глинистых грунтов сдвигу разные авторы связывают с изменением напряженного состояния грунта и изменением угла внутреннего трения и/или удельного сцепления вследствие динамического воздействия в связи проявлением тиксотропных свойств. Параметры прочности, экспериментально полученные нами на модельном водонасыщенном глинистом грунте заданной плотности, показывают равенство углов внутреннего трения в сериях статических и динамических трехосных испытаний и уменьшение сцепления в 2,5-3,5 раза при динамическом нагружении в отличие от статического. Это подтверждается и для природного глинистого грунта с коагуляционной структурой.

6. Таким образом, параметры прочности водонасыщенных песчаных грунтов в условиях динамического разжижения следует принимать равными таковым при статическом нагружении, а сам предел сдвиговой прочности необходимо определять с учетом развивающегося или прогнозируемого порового давления.

7. Определение параметров динамической прочности водонасыщенных глинистых грунтов более трудоемко и предполагает предварительную экспериментальную оценку величины предельной деформации при разрушении в статических условиях и экспериментальную оценку степени снижения сцепления грунта в динамических условиях. Угол же внутреннего трения, как и для песчаных грунтов, может приниматься неизменным.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

B – параметр Скемптона (U/σ_m);

C – сцепление, кПа;

f – частота, Гц;

p' – среднее эффективное напряжение $((\sigma'_1 + 2\sigma'_3)/3)$, кПа;

PPR – коэффициент относительного порового давления (U/σ_m);

q – девиатор (частный случай второго инварианта девиатора напряжений при осесимметричном трехосном сжатии) $(\sigma_1 - \sigma_3)$, кПа;

SR – коэффициент эффективных напряжений $((\sigma'_1/\sigma'_m)_{max})$;

U – поровое давление, кПа;

ε_1 – относительная осевая деформация, %;

σ_3 – полное горизонтальное напряжение, кПа;

σ_1 – полное вертикальное напряжение, кПа;

σ_d – амплитудами динамических осевых напряжений, кПа;

σ_m – среднее нормальное напряжение, кПа;

σ'_1 – эффективное вертикальное напряжение $(\sigma_1 - U)$, кПа;

σ'_3 – эффективное горизонтальное напряжение $(\sigma_3 - U)$, кПа;

τ – касательное напряжение, кПа;

φ – угол внутреннего трения, град.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 1.6.7, опубликованные автором по теме диссертации

1. Усов А.Н., Сенцова Е.А., Вознесенский Е.А. Закономерности проявления неустойчивости в глинистых грунтах в условиях монотонного трехосного сжатия // Инженерные изыскания. — 2014. — № 5-6. — С.19-23. Импакт-фактор РИНЦ (2014): 0,387. Объем публикации: 0,33 п.л., объем вклада соискателя: 0,25 п.л.

2. Вознесенский Е.А., Никитин М.С., Сенцова Е.А. Методические вопросы определения параметров моделей, учитывающих повышение жесткости грунтов при малых деформациях // Геотехника. — 2016. — № 2. — С. 4-16. Импакт-фактор РИНЦ (2017): 0,716. Объем публикации: 0,98 п.л., объем вклада соискателя: 0,62 п.л.

3. Сенцова Е.А., Никитин М.С., Вознесенский Е.А. Изменение жесткости глинистых грунтов в разных диапазонах деформации по данным статических и динамических испытаний // Инженерная геология. — 2017. — № 1. — С. 20-27. Импакт-фактор РИНЦ (2017). Объем публикации: 0,57 п.л., объем вклада соискателя: 0,50 п.л.

4. Сенцова Е.А., Никитин М.С., Вознесенский Е.А. Параметры динамической прочности песчаных грунтов по данным трехосных испытаний // Инженерная геология. — 2019. — № 2. — С. 24-33. Импакт-фактор РИНЦ (2019): 0,315. Объем публикации: 0,74 п.л., объем вклада соискателя: 0,69 п.л.

Публикации в иных научных изданиях

1. Никитин М. С., Сенцова Е. А., Вознесенский Е. А. Изменение жесткости глинистых грунтов в разных диапазонах деформации по данным статических и динамических испытаний // Инженерные изыскания в строительстве. Материалы Двенадцатой Общероссийской конференции изыскательских организаций. — ООО «Геомаркетинг» Москва, 2016. — С. 22–28.

2. Сенцова Е. А., Никитин М. С., Вознесенский Е. А. Динамическая прочность дисперсных грунтов // Инженерные изыскания в строительстве. Материалы докладов Четырнадцатой Общероссийской конференции изыскательских организаций. — ООО «Геомаркетинг» Москва, 2018. — С. 77–82.

3. Сенцова Е. А. Влияние динамического режима нагружения на прочность и параметры прочности песчаных грунтов. Состояние вопроса // Грунтоведение. — 2019. — № 2. — С. 40–48.

4. Сенцова Е. А., Вознесенский Е. А. Динамическая прочность песчаных грунтов // Новые идеи и теоретические аспекты инженерной геологии. Труды Международной научной конференции / Под ред. В. А. Королёва. — Москва, 2021. — С. 179–183.

5. Сенцова Е. А., Вознесенский Е. А., Гусев Д. В. Влияние разночастотной динамической нагрузки на реакцию глинистых грунтов // Полевые и лабораторные методы исследования грунтов – проблемы и решения. Материалы Общероссийской научно-практической конференции и выставки. — ООО «Геомаркетинг» Москва, 2022. — С. 24–32.