

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

На правах рукописи



Чжан Шэнжун

**ОБОСНОВАНИЕ СОЗДАНИЯ ПЕСЧАНЫХ
ГРУНТОВ С ЗАДАННЫМИ СВОЙСТВАМИ**

Специальность 25.00.08 – Инженерная геология,
мерзлотоведение и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Москва – 2018

Работа выполнена на кафедре инженерной и экологической геологии
геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель - **Королев Владимир Александрович**
доктор геолого-минералогических наук,
профессор

Официальные оппоненты: - **Дмитриев Виктор Викторович** - доктор
геолого-минералогических наук, профессор, ФГБОУ ВО
Российский государственный геологоразведочный
университет имени Серго Орджоникидзе, профессор
кафедры инженерной геологии

- **Добров Эдуард Михайлович** - доктор технических наук,
ФГБОУ ВО Московский автомобильно-дорожный
государственный технический университет,
дорожно-строительный факультет, профессор кафедры
«Аэропорты, инженерная геология и геотехника»

- **Сергеев Валерий Иванович** – доктор
геолого-минералогических наук, профессор, ФГБОУ ВО
МГУ имени М.В. Ломоносова, заведующий Лабораторией
охраны геологической среды и взаимосвязи
поверхностных и подземных вод

Защита диссертации состоится 16 ноября 2018 года в 14-30 часов на заседании
диссертационного совета МГУ.04.01 Московского государственного университета имени
М.В. Ломоносова по адресу: Российская Федерация, Москва, Ленинские горы,
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 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 проспект, д. 27) и на сайте ИСА
«ИСТИНА»: https://istina.msu.ru/dissertation_councils/councils/28577216/.

Автореферат разослан 12 октября 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук

Н.А. Харитоновна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Большинство природных дисперсных грунтов обычно не обладает надежными свойствами, необходимыми для строительства разнообразных видов сооружений. Для песчаных и крупнообломочных грунтов характерны сравнительно высокие величины угла внутреннего трения и низкая сжимаемость, тогда как пылеватым и глинистым грунтам свойственны не высокое сцепление, низкая водопроницаемость и др. При этом на практике с целью улучшения свойств природных дисперсных грунтов часто используют способ регулирования их гранулометрического состава.

Гранулометрический состав, как один из основных факторов, определяющих структуру и свойства грунтов, привлекает особое внимание инженер-геологов. Он отражает дисперсность грунта, позволяет предварительно судить о его происхождении, приблизительно определять некоторые свойства, оценивать грунт как строительный материал и т.д. Поскольку гранулометрический состав постоянен и уникален для данного грунта, он используется и для целей классифицирования грунтов. Кроме того, вероятно существует уникальная его связь с физическими и физико-механическими свойствами данного грунта. Этот вопрос особенно важен для искусственных песчаных, песчано-дресвяных и песчано-гравийных смесей с заданными свойствами, которые должны обладать определенными характеристиками, позволяющими использовать их в качестве надежных оснований для различных инженерных сооружений (дорожных насыпей, грунтовых плотин, дамб и т.п.). Наряду с этим создание грунтов с заданными свойствами актуально и для изготовления грунтов-аналогов дисперсных поверхностных отложений Луны и Марса с целью отработки в земных условиях посадочных аппаратов на эти тела. В последние годы и в России, и в Китайской Народной Республике разрабатываются подобные программы. В этой связи проблема создания песчаных и песчано-дресвяных грунтов с заданными физическими и физико-механическими свойствами становится всё более актуальной.

Иными словами проблема формулируется следующим образом: если нам известны гранулометрический состав исходных песчаных грунтов и их свойства, а также свойства составляющих их компонентов при определенном состоянии (сложении), можно ли из них получить грунтовую смесь с заданными физическими и физико-механическими характеристиками? Этот вопрос можно поставить и иначе: какие максимальные (наиболее благоприятные) характеристики песчаной, песчано-дресвяной или песчано-гравийной грунтовой смеси можно получить из исходных грунтов (компонентов) с известными параметрами?

К настоящему времени, к сожалению, ответы на эти вопросы разработаны не достаточно, в частности подобные исследования проводились лишь при создании оптимальных грунтовых смесей почти сто лет назад (Охотин В.В., 1934; Иванов Н.Н, 1934 и др.). Однако вопрос о создании грунтовых песчаных и песчано-дресвяных смесей с заданными физико-механическими свойствами остается не решенным. Поэтому, нахождение эффективного подхода к более полному решению этого вопроса весьма актуально и конечно имеет большое значение, как для научных, так и для практических производственных целей.

Цель и задачи работы. В связи с вышеизложенным, целью настоящего исследования является обоснование создания грунтовых песчаных и песчано-дресвяных смесей с заданными свойствами на основе установления взаимосвязи между

гранулометрическим составом, физическими, физико-механическими свойствами создаваемых грунтовых смесей и разработки графических и математических моделей, характеризующих полученные закономерности.

Для выполнения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Критически проанализировать литературные источники по вопросу создания дисперсных грунтов с заданными свойствами;
2. Определить взаимосвязь параметров строения, физических и физико-механических свойств как для исходных песчаных и песчано-дресвяных грунтов и фракций, так и для создаваемых из них грунтовых смесей;
3. Разработать методики графического и математического моделирования грунтовых смесей с заданными физическими и физико-механическими свойствами;
4. С помощью построенных моделей провести качественный и количественный анализ влияния гранулометрического состава на физические и физико-механические свойства создаваемых грунтовых смесей с заданными свойствами.

Объектом исследования являются дисперсные песчаные и песчано-дресвяные грунты, а также фракции и смеси на их основе.

Предметом исследования являются знания о создании песчаных грунтов с заданными физическими и физико-механическими свойствами.

Фактический материал и методы исследования. В основу работы положен фактический материал, собранный лично автором в период 2012-2018 гг. во время обучения в магистратуре и аспирантуре геологического факультета МГУ. Кроме того, автор использовал материалы, полученные им лично в ходе стажировки в 2017 году в Главной государственной лаборатории инженерной геокриологии Китайской Народной Республики в городе Ланьчжоу.

В диссертации изложены результаты исследований, выполненных в процессе самостоятельных лабораторных работ, в ходе которых лично автором были проведены многочисленные эксперименты для определения состава, структуры, физических и физико-механических свойств созданных грунтовых смесей, как по стандартным методам, так и с помощью различных уникальных и современных автоматизированных приборов, в том числе, приобретенных по Программе развития Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова. Автором было изготовлено и проанализировано более 150 грунтовых смесей, имеющих разные гранулометрические составы. Для каждого испытываемого образца смеси повторность испытаний была не менее 3 раз для того, чтобы исключить случайные результаты. Кроме того, были определены минеральный состав и показатели морфологических особенностей частиц грунтовых смесей с использованием рентгеновского дифрактометра ULTIMA-IV и электронного микроскопа LEO 1450VP, соответственно.

На основе полученных данных были созданы компьютерные, математические и графические модели грунтовых смесей. Сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными доказало достоверность созданных моделей, отражающих основные закономерности изменения физических и физико-механических свойств создаваемых грунтовых смесей.

Научная новизна данной работы заключается в следующем:

1. Впервые обоснован метод получения песчаных и песчано-дресвяных смесей с заданными физико-механическими свойствами с помощью треугольных диаграмм, отражающих как гранулометрический состав смесей, так и их основные свойства.

2. Выявлена зависимость гранулометрического состава и физико-механических свойств создаваемых грунтовых песчаных и песчано-дресвяных смесей с заданными свойствами с помощью треугольных диаграмм, отражающих возможный диапазон изменения оцениваемых параметров в зависимости от состава смеси.

3. Построены оригинальные графические и математические модели, характеризующие закономерности изменения физических и физико-механических свойств создаваемых грунтовых песчаных и песчано-дресвяных смесей с заданными свойствами в зависимости от их гранулометрического состава.

4. Установлено влияние структурных особенностей (дисперсности, морфологических особенностей частиц) на деформируемость и прочность создаваемых грунтовых смесей.

5. На базе теории дискретной среды выявлен механизм влияния гранулометрического состава песчаных и песчано-дресвяных смесей на их физико-механические свойства и распределение контактных нормальных напряжений между частицами.

Личный вклад автора. Все экспериментальные исследования состава и свойств исходных грунтов и выделяемых из них фракций, а также создаваемых грунтовых смесей выполнены лично автором. Кроме того, лично автором выполнены научные обобщения, построены графические и математические модели, отражающие изменение физических и физико-механических свойств грунтовых смесей в зависимости от их состава.

Практическая значимость данной работы заключается в том, что предлагаемые новые эффективные и удобные способы создания песчаных и песчано-дресвяных грунтов с заданными свойствами на основе графического и математического моделирования могут использоваться производственными организациями. Кроме того, разработанные модели дают возможность прогнозирования изменения свойств создаваемых грунтовых смесей с использованием грунтов разного гранулометрического состава. Это имеет очень важное практическое значение для целей технической мелиорации грунтов, а также строительства различных инженерных сооружений, особенно автомобильных и железных дорог, грунтовых плотин, насыпей и т.п., и создания дисперсных грунтов-аналогов космических тел.

Всё это весьма актуально и для Китайской Народной Республики, в которой в больших масштабах проводится строительство различных сооружений с использованием песчаных и песчано-дресвяных грунтов и искусственных смесей на их основе.

Защищаемые положения

1. Обосновано создание грунтовых песчаных и песчано-дресвяных смесей в плотном сложении с заданными физическими и физико-механическими свойствами двумя методами: а) графическим – с помощью треугольных диаграмм, позволяющих наглядно выбрать гранулометрический состав смеси для получения необходимых значений физических и физико-механических свойств; б) математическим – с помощью эмпирических функций, позволяющих рассчитать требуемые значения пористости (плотности) или показателей физико-механических свойств по отношению диаметра частиц заполнителей к диаметру скелетных частиц и по массовому содержанию заполнителя, а также с помощью компьютерной программы PFC.

2. С помощью графических моделей (плоские треугольные диаграммы и объемные диаграммы) и математических моделей (в виде эмпирических функций), установлены закономерности изменения показателей основных физических и физико-механических

свойств грунтовых песчаных и песчано-дресвяных смесей, создаваемых с заданными свойствами в зависимости от их гранулометрического состава.

3. На основе программы PFC (Particle Flow Code, «Закон течения частиц»), разработанной на базе теории дискретной среды, создана компьютерная модель, позволяющая моделировать физико-механические свойства создаваемых грунтовых песчаных и песчано-дресвяных смесей с заранее заданными свойствами, и выяснять механизм изменения физико-механических свойств грунтовых смесей в зависимости от их структурных особенностей.

Апробация результатов работы. Результаты выполненной работы, а также защищаемые положения докладывались автором и обсуждались на различных российских и международных научных конференциях: XXII-й Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2015", (Москва, Россия, 13-17 апреля 2015); XI-й научно-практической конференции молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве», (ПНИИС, Москва, Россия, 24 апреля 2015); XII-й общероссийской научно-практической конференции и выставке "Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации", (Санкт-Петербург, Россия, 6-9 декабря 2016); XIII-й научно-практической конференции и выставке «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации», (Москва, Россия, 28 ноября - 1 декабря 2017); Международной научно-практической конференции "Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ–РГГРУ)" - Российский государственный геологоразведочный университет, (Москва, Россия, 4-6 апреля 2018); XXV-й Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2018", секция инженерной геологии (Москва, Россия, 12 апреля 2018); Научной конференции «Ломоносовские чтения», секция наук о Земле. (16-25 апреля 2018, МГУ, Москва, Россия, 16-25 апреля 2018); Второй общероссийской научно-практической конференции молодых специалистов "Инженерные изыскания в строительстве", (ИГИИС, г. Москва, Россия, 27 апреля 2018); Общероссийской. научно-практич. конференции «Современные полевые и лабораторные методы исследования грунтов – изыскания и проектирование» (20-21 сентября 2018, ИГИИС); Межд. научн. конференции «Инженерно-геологическое и эколого-геологическое изучение песков и песчаных массивов» (27-28 сентября 2018, МГУ, Москва).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в трех статьях в реферируемых журналах, входящих в базу данных RSCI и рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности, а также опубликованы в 7 статьях в различных журналах и сборниках, и кроме того изложены в 4 тезисах докладов различных научных конференций.

Структура и объем работы.

Диссертация, объемом 230 страниц машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 108 названий работ российских и зарубежных исследователей. Работа иллюстрирована 130 рисунками, содержит 43 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному руководителю профессору В.А. Королеву за постоянную помощь, полезные советы, тщательное руководство и терпеливое обсуждение вопросов, возникающих в ходе работы.

Автор выражает глубокую благодарность профессору Ма Вэй и профессору У Цинбай за предоставление необходимого оборудования для исследований и ценные

замечания при прохождении стажировки в Главной государственной лаборатории инженерной геокриологии Китайской АН. Кроме того, автор очень благодарен Чжан Цзе - доценту Главной государственной лаборатории инженерной геокриологии за полезные консультации.

Автор тоже благодарит доцента кафедры инженерной и экологической геологии МГУ С.К. Николаеву, а также ведущего научного сотрудника кафедры исторической и региональной геологии Л.И. Филатову. Хотелось бы также выразить искреннюю признательность всем сотрудникам лабораторий грунтоведения и механики грунтов за помощь в представлении приборов для исследований, а также многим сотрудникам кафедры инженерной и экологической геологии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова за полезные советы.

Наконец, автор хочет выразить признательность своим родителям и жене Цзя Сяомэн за постоянную поддержку при написании работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Современные представления о создании песчано-дресвяных грунтов с заданными свойствами

В первом разделе главы кратко рассматривается история инженерно-геологических исследований по созданию грунтов с заданными свойствами. Отдельные идеи и технические решения в области искусственного улучшения грунтов возникли давно, в том числе в области технической мелиорации грунтов в XX веке благодаря работам В.В. Охотина, Н.Н. Иванова, М.М. Филатова и др.

В следующем разделе рассмотрены гранулометрические смеси и их создание. Для подбора грунтовых смесей из двух или трех грунтов с заданными соотношениями между всеми фракциями обычно использовался графический способ Барабаса, а также нанесение смешиваемых грунтов на треугольные диаграммы гранулометрического состава (треугольник Фере).

В третьем разделе рассмотрены *оптимальные смеси* и методы подбора их состава. По мнению Н.Н. Иванова оптимальными смесями являются такие искусственно приготовленные или естественные смеси различных по крупности зерен рыхлых горных пород, которые дают наилучшие результаты в дорожной службе, т. е. наиболее устойчивы при разных состояниях влажности в отношении воздействия на них колес проезжающих экипажей – в том числе, обладают повышенной плотностью и прочностью. К настоящему времени существует ряд методов подбора оптимальных смесей. Среди них наиболее распространены методы: треугольных координат, кривых полных просеивов, верхнего предела пластичности, номограммы Браздо-Волкова и др. Кроме того, в последнее время развивается новый способ подбора оптимального состава грунтовых смесей с помощью так называемой *идеальной кривой гранулометрического состава* (методы Функа/Дингера, Гуммеля, Фуллера, Болomeя и др.).

В четвертом разделе рассматриваются факторы, влияющие на физические свойства создаваемых грунтовых смесей. Среди физических свойств грунтовых смесей наиболее важны их плотность сложения, пористость и коэффициент пористости. Влияние гранулометрического состава на свойства песков и их смесей было изучено многими русскими и иностранными учеными, таким как В.В.Охотин, Н.Н.Иванов, С.С.Морозов,

Е.М.Сергеев, В.И.Бируля, А.Кезди, М.Н.Гольдштейн, И.В.Дудлер, Э.М.Добров, В.В.Дмитриев, В.А.Королев, В.И.Сергеев, M.Belkhatir, Luis E.Vallejo и др. На основе их исследований было установлено, что физико-механические свойства грунтовых смесей обусловлены отношением размера частиц заполнителей к скелетной фракции и массовым содержанием заполнителей. Добавлением мелких частиц к «скелетной» фракции можно снизить пористость грунтовых смесей до минимальной при массовом её содержании примерно равном 30%.

Пятый раздел посвящен представлению о факторах, влияющих на физико-механические свойства создаваемых грунтовых смесей: деформационные и прочностные характеристики. Для оценки влияния заполнителей на деформационные свойства грунтовых смесей, необходимо учитывать твёрдость заполнителей, т.е. обуславливают ли они пластичность или нет (Ni Q. et al., 2004). Обычно «пластичные» заполнители (например, глинистые) ухудшают физико-механические свойства грунтовых смесей, а непластичные (например, песчаные), напротив, улучшают их. К настоящему времени работ по влиянию содержания скелетных частиц или заполнителей на сопротивление сдвигу улучшенных грунтов выполнено достаточно много (Тер-Мартиросян и др., 2010, 2013; Ibrahim, 2015; Marsal et al., 1976; Naeini et al., 2004; Thevanayagam, 2000; Xenaki, 2003 и др.). В общем случае, добавление мелких частиц ослабляет прочностные свойства смеси в воздушно-сухом состоянии. Непластичные заполнители, такие как песчаные частицы, могут улучшить физико-механические свойств грунтовых смесей при их содержании меньше 30%.

Последний раздел главы посвящен представлению о моделировании свойств грунтовых смесей графическом и математическом способом. Среди графических способов моделирования широко и эффективно применяется треугольная диаграмма для моделирования строения, структуры и свойств грунтов, имеющих более двух составляющих компонентов или составов (А.Кезди, В.А.Королев, Э.М.Добров, А.Ю.Мирный и др.).

В последнее время моделирование физико-механических свойств грунтовых смесей, особенно состоящих из несвязных грунтов, можно эффективно осуществлять на основе теории дискретной среды, так как грунтовые частицы в смесях обычно находятся в дискретном состоянии. При этом, в связи с отсутствием или малым влиянием воды, все частицы несвязных грунтов могут считаться самостоятельными и раздельными. Моделированию в этой области посвящены работы таких исследователей как А.Ю.Мирный, D.O. Potyondy, P.A. Cundall, J.R.Williams, Xu Xiaofeng, Wei Houzhen, B.K.Mishra, S.P. Mehrotra и др.

Глава 2. Характеристика состава и свойств исходных грунтов и отдельных фракций, выбранных для исследований

Для исследования нами были выбраны две группы грунтов: природные и техногенные. Природные песчаные и пылеватые грунты были отобраны на территории г. Москвы и представляли собой аллювиальные и флювиогляциальные образования. Все исходные природные грунты были рассеяны ситовым методом с выделением из них различных фракций размером: 2-1 мм, 1-0,5 мм, 0,5-0,25 мм, 0,25-0,1 мм и меньше 0,1 мм. Техногенные грунты, представленные дресвяными, песчаными и пылеватыми фракциями размером: 4-2, 2-1 мм, 1-0,5 мм, 0,5-0,25 мм, 0,25-0,1 мм и 0,06-0,03 мм были отобраны в г.

Ланьчжоу (Китай). На основе этих фракций составлялись искусственные смеси, которые затем использовались в исследовании.

По минеральному составу все исследуемые фракции образцов, отобранных в России, преимущественно состоят из кварца на 85-95 %, а исходные фракции образцов, отобранных в Китае, преимущественно состоят из доломита.

Природные песчаные частицы разных фракций обладали преимущественно окатанной формой по сравнению с угловатыми неокатанными частицами техногенных фракций, изготовленных путем механического помола. С помощью микроструктурных исследований было установлено, что форму частиц отдельных фракций можно считать одинаковой как в группе природных, так и в группе техногенных грунтов, соответственно. Характер поверхности двух групп изучаемых образцов также различен, что объясняется разным генезисом или способом образования грунтов. Существуют явное отличие морфологических особенностей между частицами двух выбранных групп. Таким образом, можно заключить, что влияние минерального состава и морфологии частиц на изучаемые физические и физико-механические свойства исходных фракций или созданных грунтовых смесей из фракций для одной и той же группы является не сильным, и им можно пренебречь.

В ходе исследования были определены физические (табл.1) и физико-механические свойства всех исходных выделенных фракций в плотном сложении.

Таблица 1

Характеристика физических свойств исходных песчаных и крупнообломочных фракций

Фракции, выделенные из привозных грунтов	Показатель		Размер фракций, мм					
			1-2	0,5-1	0,25–0,5	0,1–0, 25	< 0,1	
	Плотность частиц, $\rho_s, \text{г/см}^3$		2,64	2,64	2,64	2,63	2,63	
	Плотность скелета, $\rho_d, \text{г/см}^3$		1,70	1,74	1,75	1,70	1,65	
	Пористость, n , д.ед.		0,35	0,34	0,33	0,35	0,37	
	Коэффициент пористости, e , д.ед.		0,55	0,52	0,51	0,55	0,59	
Искусственные песчаные и дресвяные фракции	Показатель		Размер фракций, мм					
			2-4	1-2	0,5-1	0,25–0,5	0,1–0, 25	0,03-0,06
	Плотность частиц, $\rho_s, \text{г/см}^3$		2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,79
	Плотность скелета, $\rho_d, \text{г/см}^3$		1,73	1,72	1,72	1,65	1,63	1,59
	Пористость, n , д.ед.		0,38	0,39	0,39	0,41	0,42	0,43
	Коэффициент пористости, e , д.ед.		0,62	0,63	0,63	0,70	0,72	0,76

Физико-механические свойства образцов из исходных фракций оценивались модулем компрессионной ($E_{ок}$) и общей (E_o) деформации (рис.1), углом естественного откоса (φ°) и углом внутреннего трения (φ) при почти полном отсутствии сцепления в песчаных и крупнообломочных фракциях. Все определения проводились в воздушно-сухом состоянии и плотном сложении.

На величины модуля компрессионной деформации ($E_{ок}$) и модуля общей деформации (E_o) образцов, изготовленных из песчаных и крупнообломочных фракций,

влияет как размер частиц, так и их морфологические особенности (см. рис.1). Подтверждено, что для образцов из более крупных фракций, частицы которых более угловатые, отмечается большая сжимаемость по сравнению с мелкими частицами за счет появления некоторого дробления частиц при компрессии или сколов острых углов.

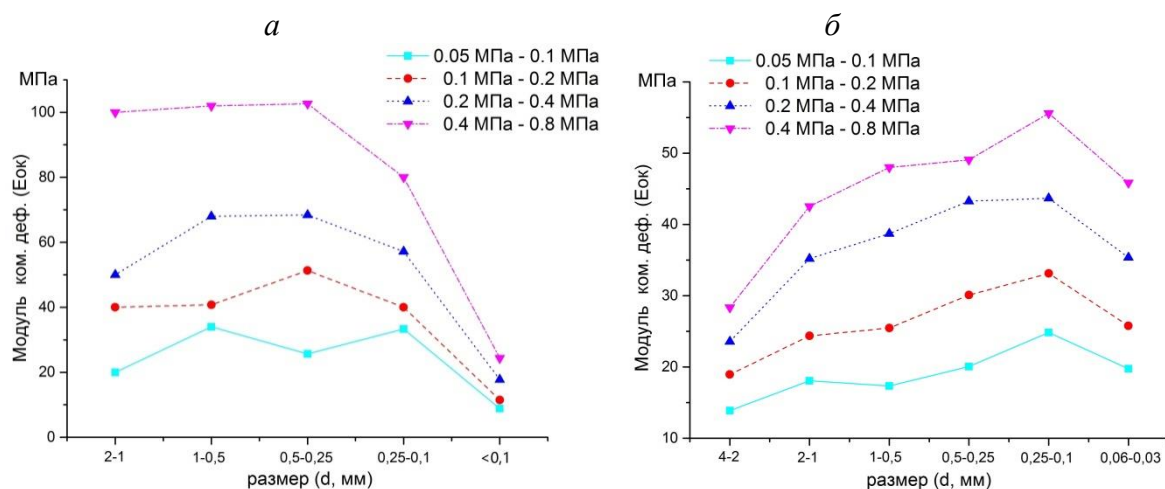


Рис. 1. Зависимости величин модуля компрессионной деформации ($E_{ок}$, МПа) в разных диапазонах давлений от размера исходных фракций при плотном сложении образцов: *а* – природных (Россия); *б* – техногенных (КНР)

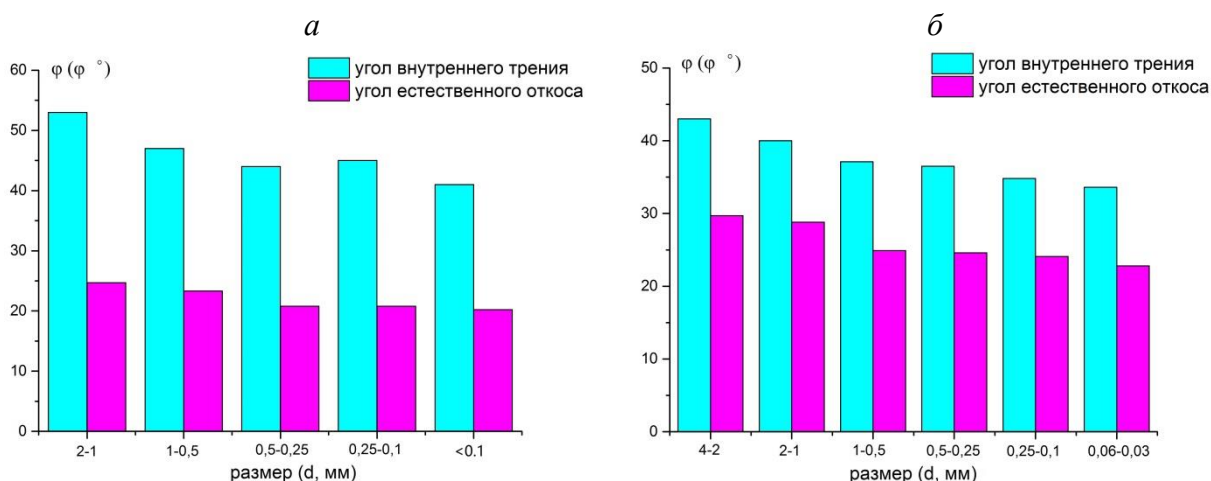


Рис. 2. Сопоставление величин угла внутреннего трения (φ) и естественного откоса (φ°) для образцов, изготовленных из фракций разного размера, *а* – образцы, отобранные в России; *б* – образцы, отобранные в Китае

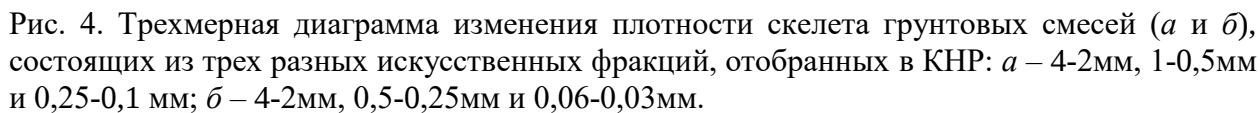
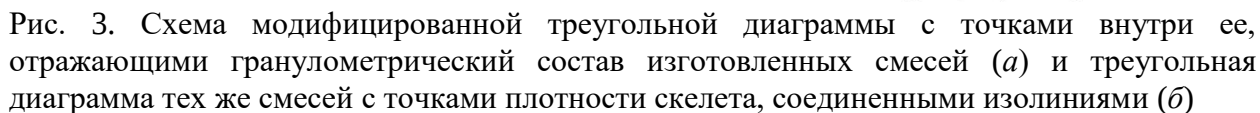
Что же касается прочностных свойств образцов, изготовленных из песчаных и крупнообломочных фракций одинаковой морфологии, то они в основном обусловлены размером частиц. С увеличением размера частиц песчаных и крупнообломочных фракций величины угла внутреннего трения и угла естественного откоса возрастают (см. рис.2).

Глава 3. Методика исследований и создания грунтов с заданными свойствами

Грунтовые смеси с заданными свойствами создавались двумя способами: графическим и математическим.

Математический способ, используемый для подбора грунтовых смесей с заданными свойствами в плотном сложении, основывался на статистической обработке экспериментальных данных по изучению влияния гранулометрического состава для би- и

где, n_{mix} , φ_{mix} – пористость и угол внутреннего трения грунтовых смесей соответственно; n_{zp}, n_{sk} – пористость заполнителя и скелетных фракций в плотном сложении; D - отношение диаметра частиц заполнителей к диаметру скелетных частиц; M_{zp} – массовое содержание заполнителя.



В случае подбора тридисперсных грунтовых смесей с заданными свойствами в плотном сложении, нами был модифицирован *графический способ* анализа с помощью треугольника Фере для целей создания смесей с заданными не только физическими, но и физико-механическими свойствами. Треугольная диаграмма строилась следующим образом: содержание трех составляющих фракций по их размерам ($d_{sk} > d_{zp1} > d_{zp2}$) откладывается на сторонах треугольника по направлению против часовой стрелки. Точка внутри диаграммы отражала гранулометрический состав смеси, а также экспериментально найденные значения показателей её физических или физико-механических свойств. Всего получали 19-20 точек (смесей), которые равномерно распределялись внутри треугольника (см. рис.3,а).

Затем, объединяя значения этих показателей с помощью изолиний, строили треугольную диаграмму, отражающую изменение показателя данного свойства (рис.3,б) или объемную 3-мерную диаграмму изменения какого-либо свойства в зависимости от гранулометрического состава смеси (рис.4). С их помощью можно удобно подбирать смесь с любым значением параметра требуемого физического или физико-механического свойства.

Обычно, если нам известны исходные составляющие компоненты, то для подбора грунтовых смесей с заданными свойствами используются вышеизложенные способы (т.е. графический и математический) совместно. С помощью полученных эмпирических математических уравнений можно установить величины показателей требуемых свойств (пористости, плотности скелета, угла внутреннего трения и др.) для ключевых точек внутри треугольной диаграммы, к которым относятся следующие точки: 1) три точки в вершинах треугольника; 2) точки на сторонах треугольника, которые отражают бидисперсные грунтовые смеси, имеющие 30%, 50% и 70% заполнителей по массовому содержанию; 3) точки внутри треугольника, которые отражают оптимальные смеси из трех составляющих фракций. Объединяя эти точки изолиниями с помощью программы MATLAB, получается треугольная диаграмма, с помощью которой можно затем характеризовать закономерность изменения какого-либо свойства.

Наряду с этими способами, моделирование физико-механических свойств грунтовых смесей осуществлялось с помощью компьютерной программы PFC (Particle Flow Code, «Закон течения частиц»), разработанной на основе теории дискретной среды. С помощью этой программы моделировались испытания на сдвиг грунтовых смесей разного задаваемого гранулометрического состава с определением соответствующих показателей сопротивления сдвигу и последующим построением треугольных диаграмм. В общем случае, моделирование осуществлялось в следующие этапы: 1) этап подготовки и создания геометрической модели; 2) этап динамического моделирования процесса сдвига; 3) этап обработки и контроля достоверности результатов и построение треугольной диаграммы.

Другими словами, если нам известны основные геометрические и физические параметры исходных составляющих частиц грунтовых смесей, то с помощью программы PFC можно установить значения параметров физико-механических свойств (например, угол внутреннего трения) создаваемых грунтовых смесей любого гранулометрического состава.

Изложенные в главе 3 результаты доказывают **первое защищаемое положение**: обосновано создание грунтовых песчаных и песчано-дресвяных смесей в плотном сложении с заданными физическими и физико-механическими свойствами двумя методами: а) *графическим* – с помощью треугольных диаграмм, позволяющих наглядно выбрать гранулометрический состав смеси с необходимыми значениями физических и физико-механических свойств; б) *математическим* – с помощью эмпирических функций, позволяющих рассчитать требуемые значения пористости (плотности) или показателей

физико-механических свойств по отношению диаметра частиц заполнителей к диаметру скелетных частиц и по массовому содержанию заполнителя, а также с помощью компьютерной программы PFC.

Глава 4. Моделирование и закономерности изменения свойств смесей в зависимости от их состава

Физические свойства. Как отмечалось выше, грунтовые песчаные, песчано-древянные и песчано-гравийные смеси состоят из более крупных зерен или обломков, образующих как бы «скелет» смеси (скелетную фракцию), и более мелких частиц, заполняющих пространство между ними – заполнителя. Согласно предыдущим исследованиям (Охотин, 1929; Гончарова, 1973; Банник, 1976; и др.) физические свойства грунтовых смесей зависят от отношения диаметра составляющих частиц (D) и массового содержания заполнителей (M_{zp}).

Нами было установлено, что при массовом содержании заполнителей больше 30% величина отношения пористости *бидисперсных грунтовых смесей* к пористости заполнителя (n_{mix}/n_{zp}) увеличивается почти линейно с ростом величин D независимо от размера скелетных частиц (см. рис. 5 а, б, в).

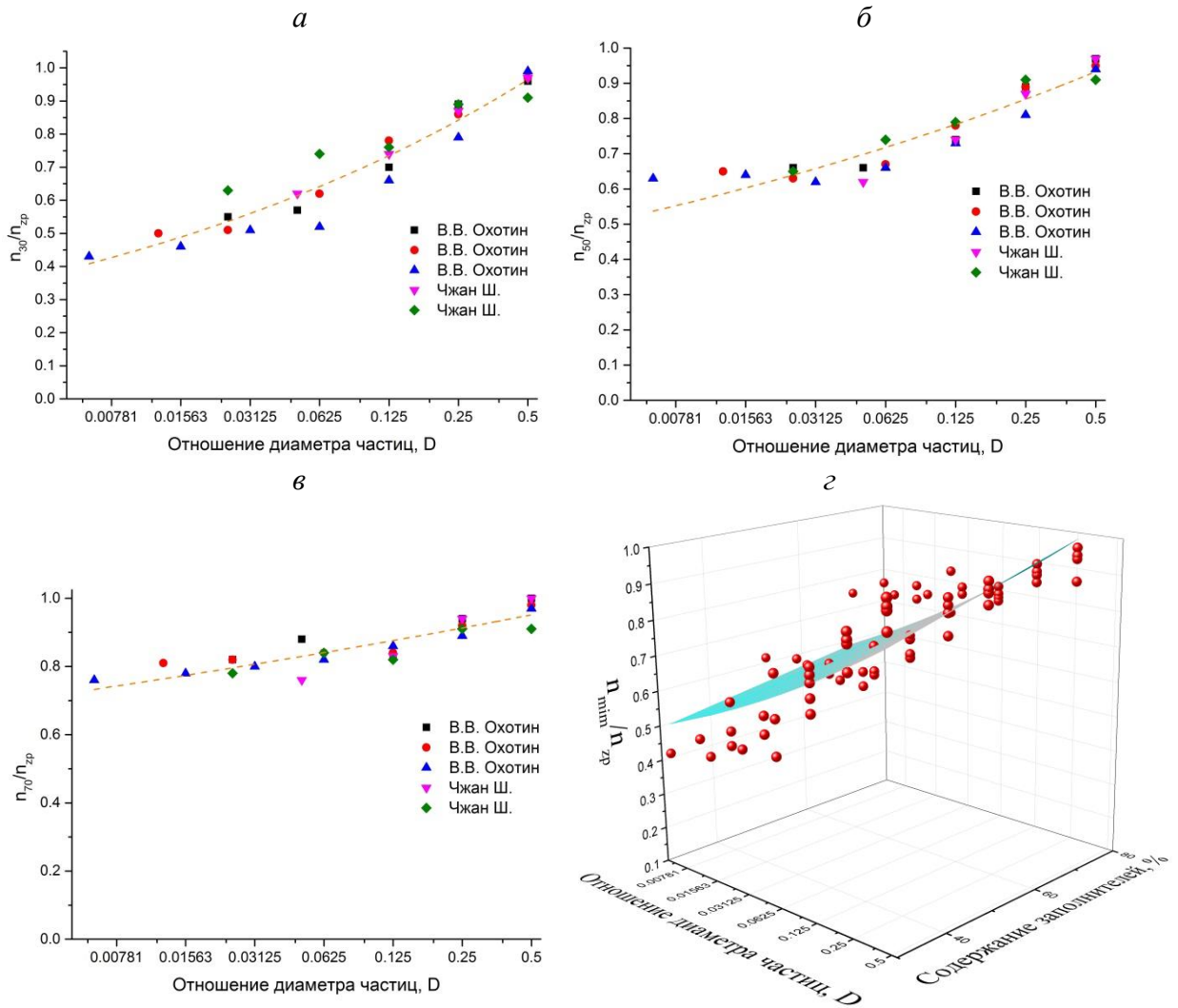


Рис. 5. Зависимость степени снижения пористости (n_{min}/n_{sk}) бидисперсных смесей от отношения диаметра частиц (D) при разных массовых содержаниях заполнителя: а – 30%; б – 50%; в – 70%; з – графическая модель зависимости степени снижения пористости (n_{min}/n_{zp}) от отношения диаметра частиц (D) и массового содержания заполнителей (M_{zp})

Таким образом, можно предложить математическую функцию для описания наблюдаемой зависимости следующего вида:

$$\frac{n_{min}}{n_{zp}} = f(D), \quad (2)$$

где, n_{min} , n_{zp} – пористости грунтовых смесей и заполнителей соответственно; D – отношение диаметра частиц.

Анализируя имеющиеся экспериментальные данные при разном массовом содержании заполнителей ($M_{zp} = 30\%$, 50% , и 70%) нами установлены следующие степенные функции, описывающие уравнение (1):

$$\frac{n_{30}}{n_{zp}} = 1.105D^{0.196}, (R^2 = 0.92, M_{zp} = 30\%), \quad (3)$$

$$\frac{n_{50}}{n_{zp}} = 1.018D^{0.126}, (R^2 = 0.88, M_{zp} = 50\%), \quad (4)$$

$$\frac{n_{70}}{n_{zp}} = 0.992D^{0.060}, (R^2 = 0.77, M_{zp} = 70\%), \quad (5)$$

где, n_{30} , n_{50} , n_{70} – пористость грунтовых смесей при разном массовом содержании заполнителей $M_{zp} = 30\%$, 50% , и 70% соответственно; n_{zp} – пористость заполнителей; D – отношение диаметра частиц.

С учетом совместного влияния отношения размера частиц (D) и массового содержания заполнителя (M_{zp}) нами предлагается следующая эмпирическая функция, по которой можно математически рассчитать пористость бидисперсных грунтовых смесей при массовом содержании заполнителя более 30% (см. рис. 5 з):

$$\frac{n_{mix}}{n_{zp}} = 0,12D^{0,12}(6,62 + 0,03M_{zp}) \quad (30 \leq M_{zp} \leq 100\%), \quad (6)$$

где, n_{mix} , n_{zp} – пористость смесей и заполнителей, соответственно; D – отношение диаметра частиц заполнителя к диаметру скелетных частиц; M_{zp} – массовое содержание заполнителя, %.

Если массовое содержание заполнителя меньше 30%, то пористость бидисперсных грунтовых смесей можно рассчитать через величины пористости скелетных частиц (n_{sk}) и пористость грунтовых смесей при массовом содержании заполнителя, равном 30% (n_{30}), так как установлена линейная связь между ними, которая выражается следующим эмпирическим уравнением:

$$n_{mix} = n_{sk} - \frac{M_{zp}}{30}(n_{sk} - n_{30}) \quad (0 \leq M_{zp} \leq 30\%), \quad (7)$$

где, n_{mix} , n_{sk} – пористость смесей и скелетных частиц соответственно; M_{zp} – массовое содержание заполнителя, %.

Моделирование физических свойств **тридисперсных грунтовых смесей** наиболее просто и наглядно осуществляется с помощью треугольных диаграмм. На основе полученных экспериментальных данных нами были построены треугольные диаграммы для разных анализируемых смесей, обобщение которых позволило выявить закономерности изменения их физических свойств в плотном сложении в зависимости от их гранулометрического состава (см. рис. 6). Установлено, что физические свойства грунтовых смесей из трех фракций изменяются вдоль направления изменения массового содержания минимальных заполнителей или скелетных фракций, т.е. при увеличении массового содержания минимальных частиц (или уменьшении массового содержания скелетных фракций) величина пористости смеси в плотном сложении постепенно уменьшается до некоторого минимального значения. После этого, величина пористости постепенно увеличивается.

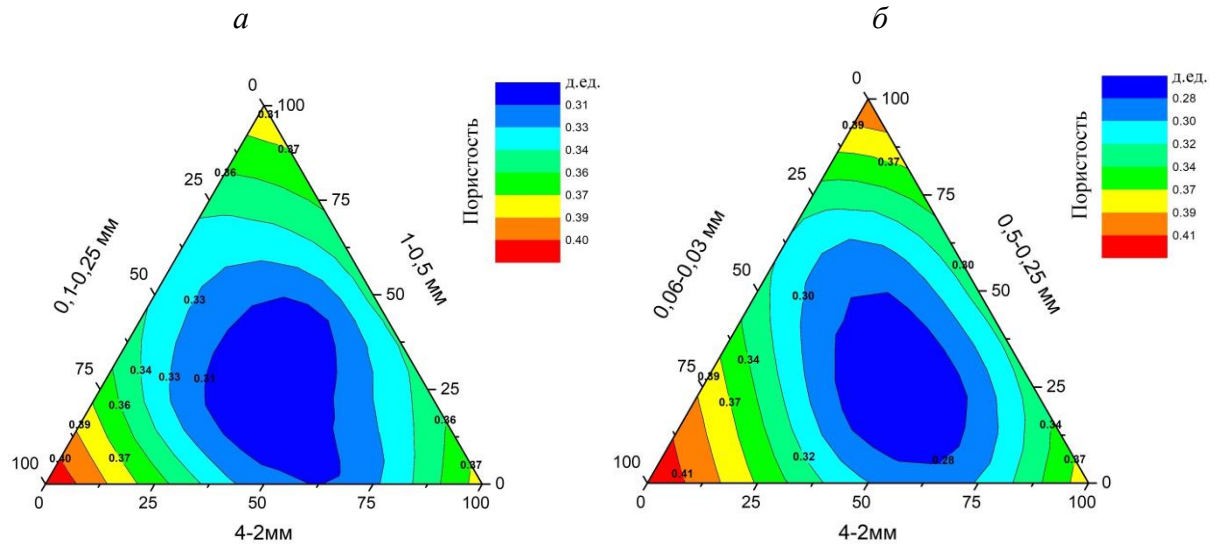


Рис. 6. Треугольные диаграммы изменения пористости (n , д.ед.) двух смесей (a и b), состоящих из трех искусственных фракций (отобранных в КНР) в плотном сложении

Что касается точек на треугольной диаграмме, имеющих пиковое значение, (т.е. точек, соответствующих оптимальной смеси), то они должны находиться в диапазоне четырехугольника $ABCD$ (см. рис.7). В зависимости от величин отношения диаметра частиц, т.е. d_{zp2}/d_{zp1} и d_{zp1}/d_{sk} , расположение точек оптимальных смесей может быть разнообразно. Точки A, B, C и D характеризуют четыре критических положения точек для оптимальных смесей из трех фракций, находящихся внутри треугольной диаграммы. Здесь, нужно отметить, что в нашем случае оптимальные смеси получаются обычно при массовом содержании трех составляющих фракций равном 4:3:3. Точка оптимальной смеси оказывалась на отрезке CD в связи с не очень сильным снижением величин отношения диаметра частиц d_{zp1}/d_{sk} и d_{zp2}/d_{zp1} (величины d_{zp1}/d_{sk} и d_{zp2}/d_{zp1} находятся в диапазоне $1/2 - 1/8$).

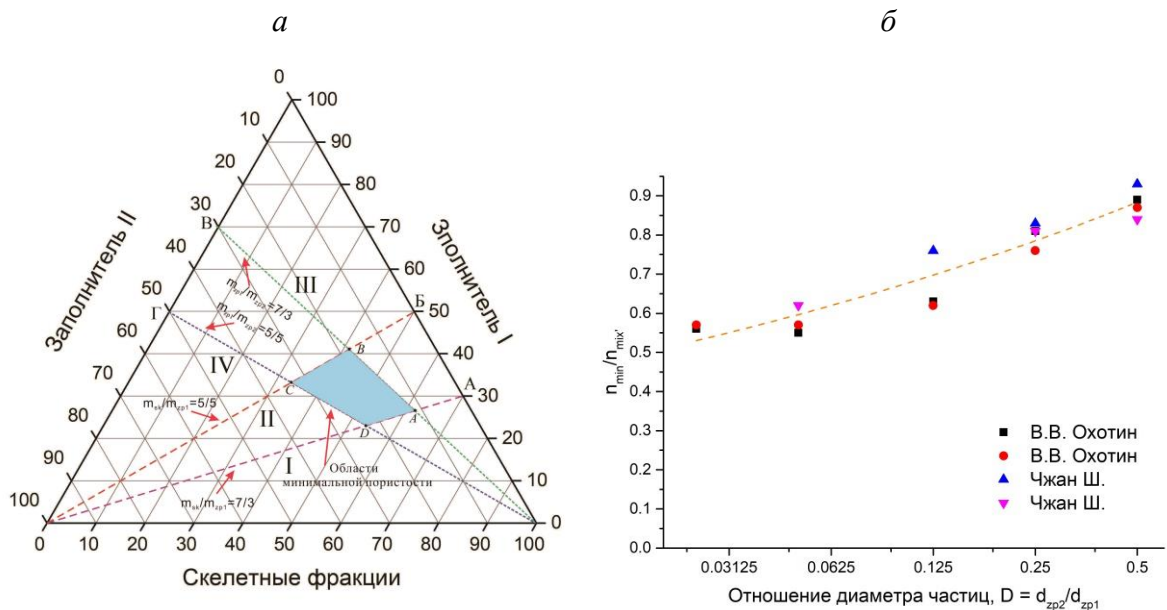


Рис. 7. Схема расположения точек оптимальных смесей на треугольной диаграмме в зависимости от разных величин отношения диаметров частиц d_{zp1}/d_{sk} и d_{zp2}/d_{zp1} (a); зависимость степени снижения пористости (n_{min}/n_{mix}) от отношения диаметра частиц $D = d_{zp2}/d_{zp1}$ (b)

Экстремальные экспериментальные величины изучаемых показателей физических свойств грунтовых тридисперсных смесей (ρ_d , n , e), как и в вышеописанном случае для смесей, состоящих из двух фракций, также обусловлены отношением диаметра составляющих частиц (d_{zp2}/d_{zp1} и d_{zp1}/d_{sk}). Используя данные исследований В.В. Охотина для выполнения описываемого анализа и собственные данные, нами установлено, что величины степени снижения пористости ($n_{min}/n_{mix'}$) уменьшаются при снижении величин отношения диаметра частиц ($D = d_{zp2}/d_{zp1}$). Путем статистического расчета вышеизложенная зависимость может быть описана следующей степенной функцией:

$$\frac{n_{min}}{n_{mix'}} = 0,99 \left(\frac{d_{zp2}}{d_{zp1}} \right)^{0,17}, \quad (8)$$

где, n_{min} , $n_{mix'}$ – минимальные пористости грунтовых смесей из трех фракций и двух фракций, соответственно; d_{zp1} , d_{zp2} – диаметр заполнителей I и II, соответственно.

Так как зависимость минимальной пористости бидисперсных смесей от отношения диаметра частиц ($D = d_{zp1}/d_{sk}$) также соответствует определенной степенной функции (см. уравнение 2), то обобщенная функция, характеризующая зависимость минимальной пористости (n_{min}) от отношения диаметра составляющих частиц (D), имеет следующий вид:

$$n_{min} = a * n_{zp1} \left(\frac{d_{zp1}}{d_{sk}} \right)^b \left(\frac{d_{zp2}}{d_{zp1}} \right)^c, \quad (9)$$

где, n_{min} – минимальная пористость грунтовых смесей из трех фракций; n_{zp1} – пористость заполнителя I при плотном сложении; d_{sk} , d_{zp1} , d_{zp2} – диаметр скелетных частиц и заполнителей I и II, соответственно; a , b , c – коэффициенты, полученные статистическим расчетом.

Физико-механические свойства. Деформационные свойства би- и тридисперсных грунтовых смесей в плотном сложении также зависят от отношения диаметра частиц и массового содержания заполнителей. Обычно, если величины D для бидисперсных смесей меньше 1/8, то наблюдается явное увеличение значений модуля деформации (см. рис. 8), так как при уменьшении значений D поры между скелетными частицами полнее заполняются заполнителем, что приводит к снижению величин пористости грунтовых смесей в целом и росту модуля деформации. При этом смесь «более трудно» сжимается.

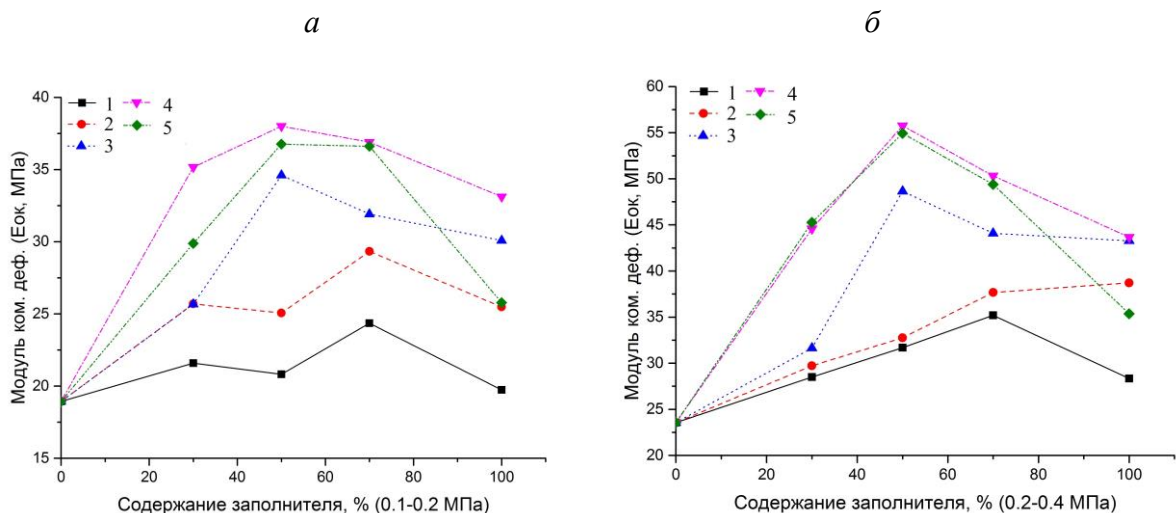


Рис. 8. Зависимость величин модуля компрессионной деформации бидисперсных грунтовых смесей ($E_{ок}$) от массового содержания заполнителя при разных нагрузках: a – 0,1-0,2 МПа; b – 0,2-0,4 МПа. 1 – смеси из фракций 4-2 мм и 2-1 мм; 2 – смеси из фракций 4-2 мм и 1-0,5 мм; 3 – смеси из фракций 4-2 мм и 0,5-0,25 мм; 4 – смеси из фракций 4-2 мм и 0,25-0,1 мм; 5 – смеси из фракций 4-2 мм и 0,06-0,03 мм.

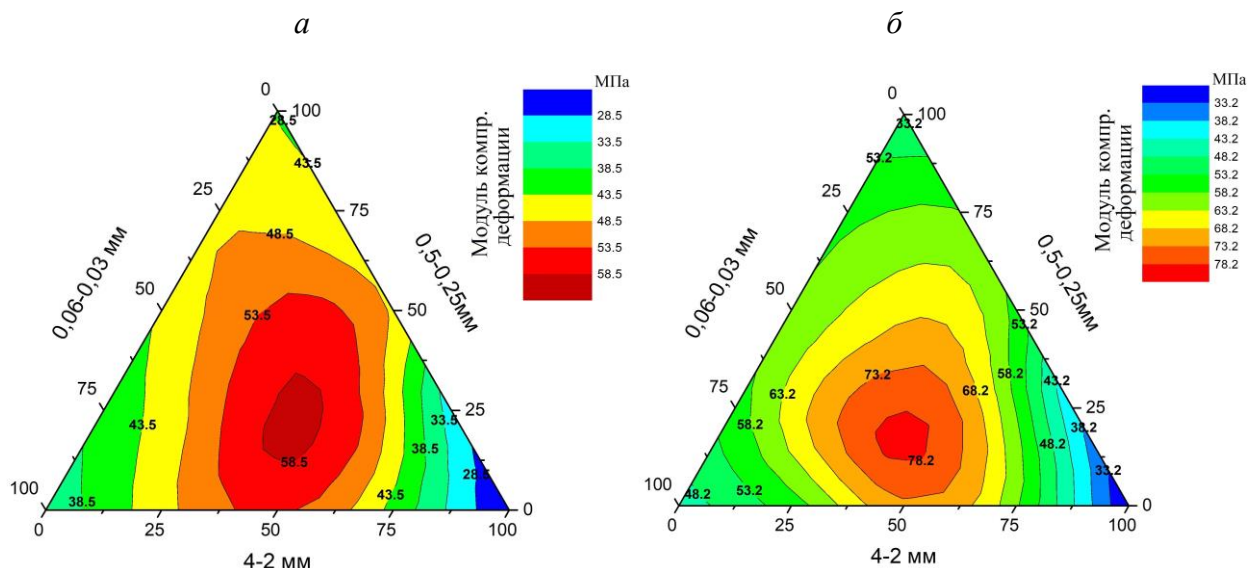


Рис. 9. Треугольные диаграммы изменения величин модуля компрессионной деформации ($E_{ок}$) двух грунтовых смесей из искусственных фракций (КНР), при нагрузках: *а* – 0,2-0,4 МПа; *б* – 0,4-0,8 МПа

В тридисперсных грунтовых смесях наиболее эффективное улучшение деформационных свойств наблюдается для смесей, когда в них содержание заполнителя (0,5-0,25 мм и 0,06-0,03 мм) гораздо меньше, чем скелетных частиц (см. рис.9). В этом случае, пористость грунтовых смесей понижается и исключается влияние дробления частиц. При этом все частицы грунтовых смесей более плотно контактируют друг с другом, что приводит к уменьшению сжимаемости.

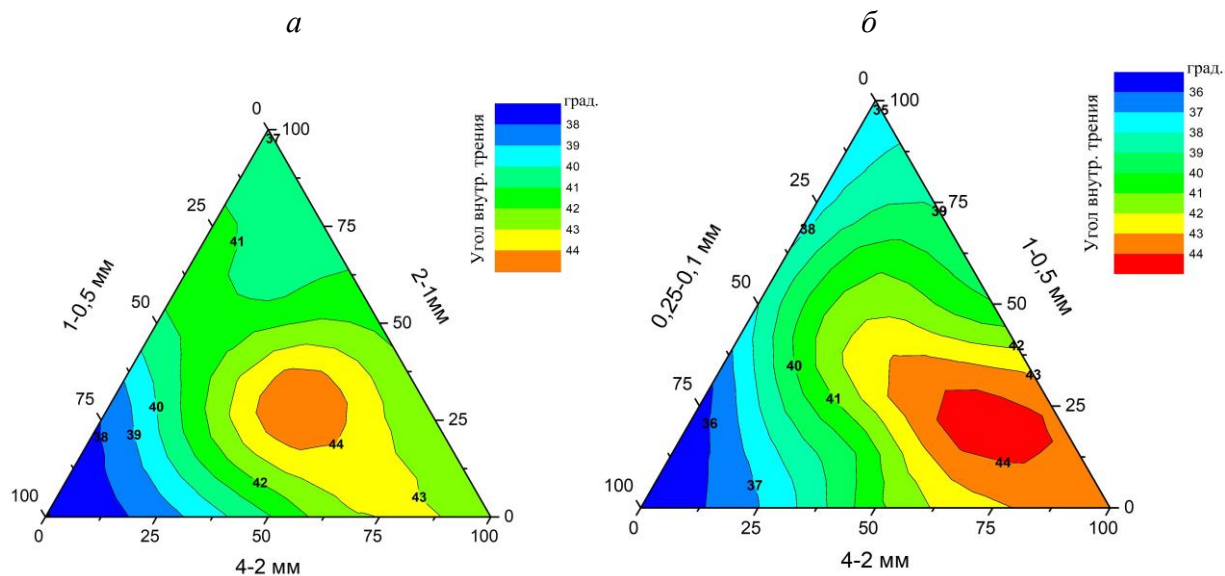


Рис. 10. Треугольные диаграммы изменения величин угла внутреннего трения двух грунтовых смесей (*а* и *б*), состоящих из трех разных искусственных фракций (КНР): *а* – 4-2 мм, 2-1мм и 1-0,5 мм; *б* – 4-2мм, 1-,5мм и 0,25-0,1мм

Прочность грунтовых смесей характеризовалась нами их величинами угла внутреннего трения в плотном сложении. Согласно тому, что прочность грунтовых песчаных и песчано-дресвяных смесей обусловлена содержанием в них «скелетных» частиц, это положение находит хорошее подтверждение в нашем исследовании. Из

полученных данных следует, что при добавлении мелких заполнителей к скелетным частицам величины угла внутреннего трения грунтовых смесей закономерно уменьшаются (см. рис.10).

Такое снижение прочности грунтовых смесей связано с ослаблением трения между скелетными частицами при добавлении к ним мелких частиц, как бы выполняющих роль «смазки». Подтверждено, что такое снижение трения происходит при массовом содержании заполнителей больше 30%. Если массовое содержание заполнителей меньше 30%, то мелкие частицы не полностью заполняют поры между скелетными частицами и почти не влияют на трение. При этом угол внутреннего трения грунтовых смесей становится близким к углу внутреннего трения образца, состоящего только из скелетных частиц.

При дальнейшем увеличении содержания заполнителя наблюдается явная потеря прочности (т.е. снижение ϕ) грунтовых смесей, так как при этом снижается трение между скелетными частицами (см. рис.10). Причем структура грунтовых смесей постепенно стремится к структуре заполнителя и таким образом, прочность грунтовых смесей стремится к прочности самого заполнителя. Но при этом необходимо отметить, что добавление заполнителя к скелетным фракциям не всегда имеет отрицательное влияние на прочность грунтовых смесей, характеризуемой углом внутреннего трения. Иногда отмечается повышение величины угла внутреннего трения (см. рис.11). Это обычно происходит при добавлении неокатанных и остроугольных частиц, при этом плотность грунтовых смесей явно увеличивается. В этом случае все частицы более эффективно контактируют друг с другом и начинает проявляться структурное сцепление.

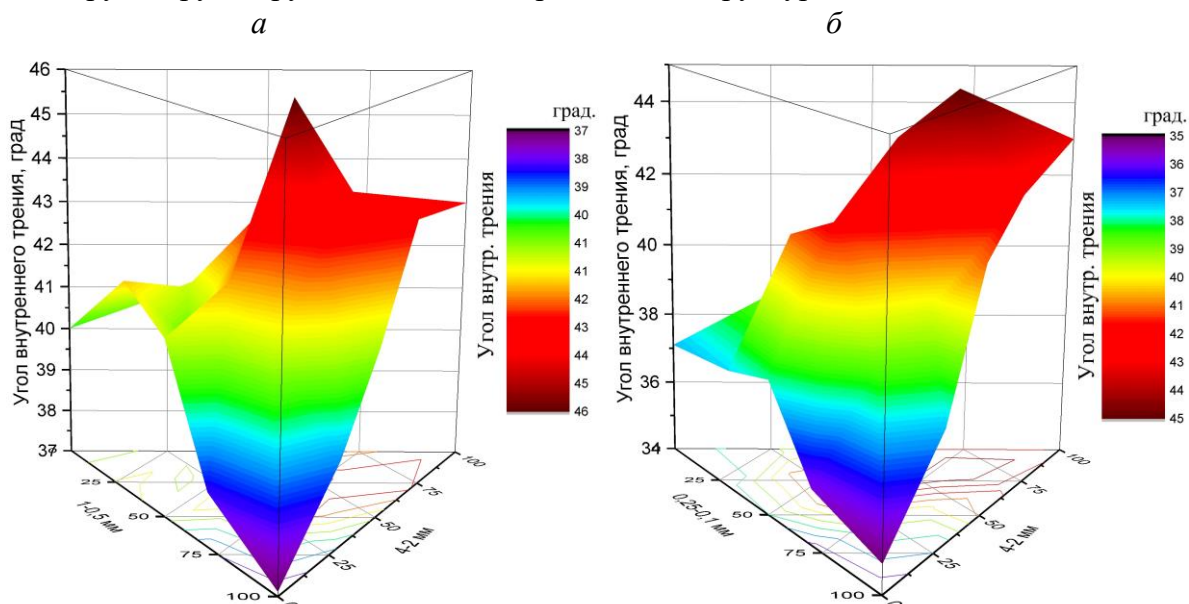


Рис. 11. Трехмерные диаграммы изменения величин угла внутреннего трения двух грунтовых смесей (а и б), состоящих из трех разных искусственных фракций (КНР): а – 4-2 мм, 2-1мм и 1-0,5 мм; б – 4-2мм, 1-1,5мм и 0,25-0,1мм

Результаты, изложенные в этой главе обосновывают **второе защищаемое положение:** с помощью графических моделей (плоские треугольные диаграммы и объемные диаграммы) и математических моделей (в виде эмпирических функций), установлены закономерности изменения показателей основных физических и физико-механических свойств грунтовых песчаных и песчано-древянных смесей,

создаваемых с заданными свойствами в зависимости от особенностей их гранулометрического состава.

Глава 5. Компьютерное моделирование физико-механических свойств грунтовых смесей на основе теории дискретной среды

С помощью компьютерной программы PFC было проведено моделирование испытания на сдвиг монодисперсных фракций разного размера и были получены серии кривых зависимости касательных напряжений от деформации сдвига, по которым затем были рассчитаны величины угла внутреннего трения (ϕ) и нормальные контактные напряжения между частицами.

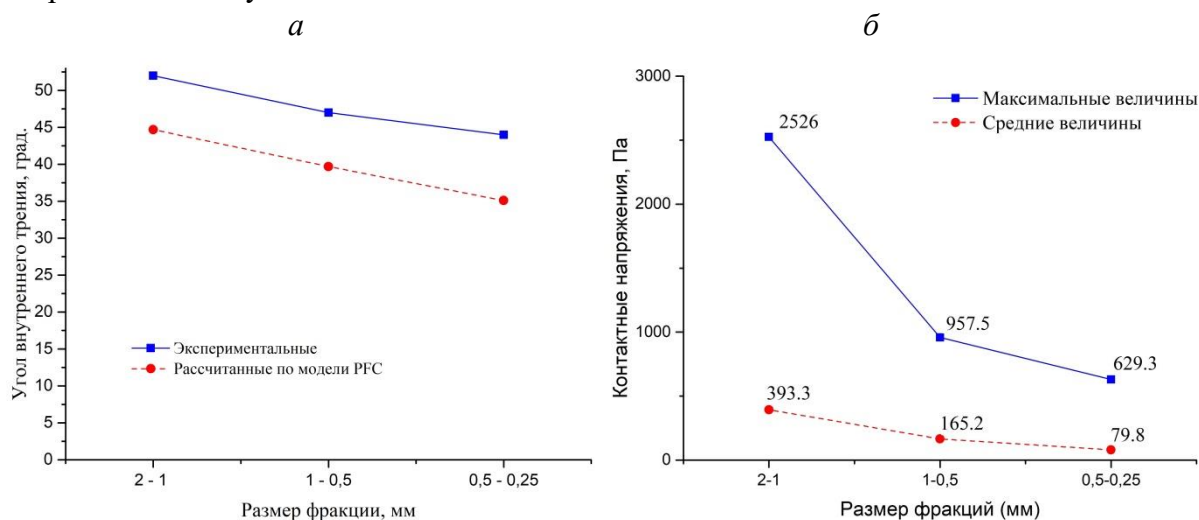


Рис. 12. Зависимость величин угла внутреннего трения (ϕ) от размера монодисперсных фракций (а) и закономерность изменения максимальных и средних величин нормальных контактных напряжений между частицами разных фракций при $\sigma = 200$ кПа (б)

Полученные данные подтверждают известный факт увеличения угла внутреннего трения (ϕ) с ростом размера частиц (см. рис. 12, а). Это, может быть, связано с изменением величин нормальных контактных напряжений между частицами с точки зрения теории дискретной среды. Видно, что средние величины нормальных контактных напряжений между частицами постепенно снижаются с уменьшением размером частиц при статической нагрузке и в ходе сдвига (см. рис. 12, б).

Согласно тому, что количество контактов между частицами закономерно увеличивается при снижении размера фракций, это приводит к рассеянию нормальных контактных напряжений в ходе сдвига. В результате этого, силы трения между частицами уменьшаются, что приводит к ослаблению способности частиц сопротивляться сдвигу.

Также было проведено моделирование сдвига бидисперсных грунтовых смесей с заполнителями 0,5-1 мм и 0,25-0,5 мм при их массовом содержании, равном 30%, 50% и 70%, соответственно (рис.13). При этом установлено, что величины угла внутреннего трения бидисперсных песчаных грунтовых смесей обусловлены в основном содержанием «скелетной» фракции (2-1 мм). При уменьшении её массового содержания величины угла внутреннего трения изучаемых грунтовых смесей снижаются. Это подтверждается полученными нами данными и по нормальным контактным напряжениям между частицами, когда при снижении массового содержания скелетной фракций (2-1 мм)

максимальные и средние величины нормальных контактных напряжений между частицами закономерно уменьшаются при постоянной нормальной нагрузке в ходе сдвига.

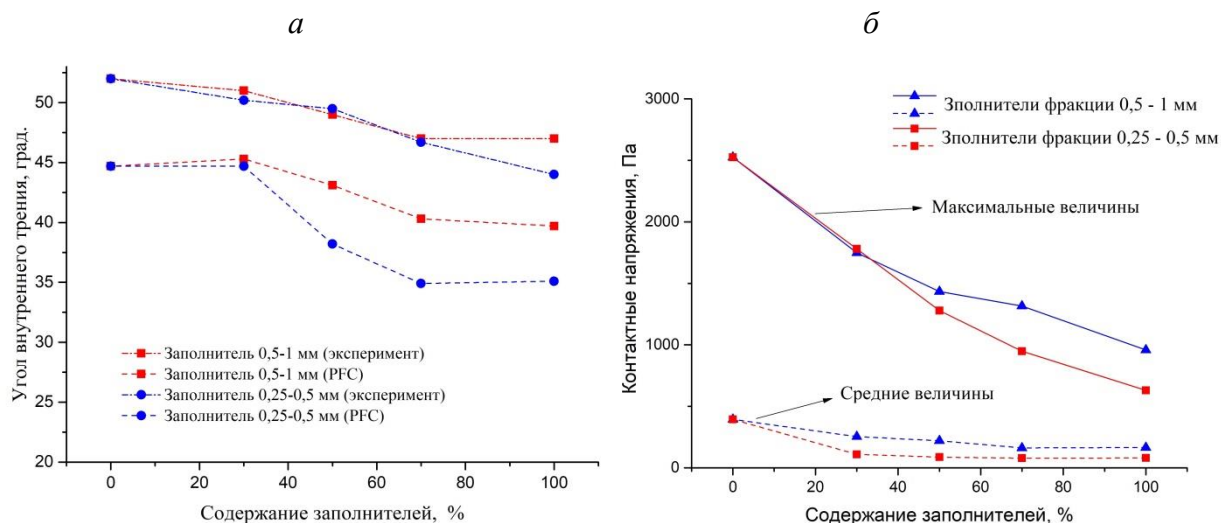


Рис. 13. Зависимость величин угла внутреннего трения бидисперсных смесей от массового содержания заполнителя (а) и закономерность изменения максимальных и средних величин нормальных контактных напряжений между частицами разных фракций при $\sigma = 200$ кПа (б)

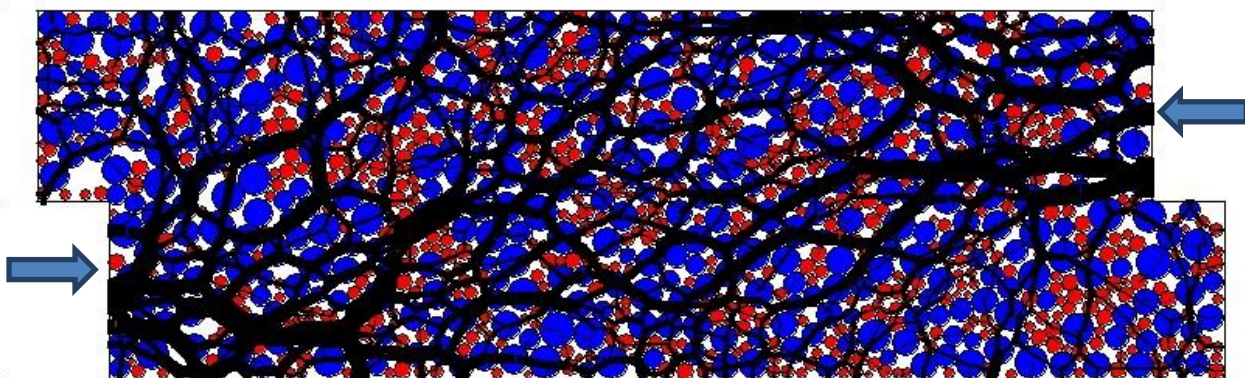


Рис. 14. Распределение нормальных контактных напряжений (черные линии) между частицами бидисперсной грунтовой смеси с скелетной фракцией 1-2 мм (70%) и заполнителем 0,5-1 мм (30%) при сдвиге ($\tau > 0$, $\sigma = 200$ кПа). Черные линии – контактные напряжения (ширина линии отражает величину напряжения); синие шарики – фракция 2-1 мм; красные шарики – фракция 1-0,5 мм.

С помощью компьютерной программы PFC также было установлено, что распределение основной доли контактных нормальных напряжений между частицами происходит преимущественно через контакты частиц наиболее крупных фракций, т.е. – через «скелетные» фракции (см. рис.14)

При массовом содержании в смеси заполнителя $< 30\%$, контакты между соседними частицами состоят преимущественно из контактов между частицами «скелетной» фракции. При этом напряжения передаются через соседние частицы, хотя при этом поры между частицами «скелетной» фракции могут лишь частично заполняться более мелкими фракциями заполнителя. В этом случае, грунтовые смеси обычно могут сохранять свою

прочность, соответствующую грунту без заполнителя. Когда же массовое содержание заполнителя превышает 30%, то постепенно развиваются контакты между более мелкими частицами, а также возникают контактные напряжения между «скелетными» и частицами более мелких фракций. Это способствует рассеянию контактных напряжений. В результате этого, силы трения между частицами снижаются в связи с увеличением рассеяния контактного напряжения внутри грунтовых смесей. В результате - прочность такой песчаной или песчано-дресвяной смеси постепенно уменьшается и стремится к прочности самого заполнителя.

Таким образом, можно заключить, что прочность воздушно-сухих песчаных и песчано-дресвяных грунтовых смесей в плотном сложении определяется в основном содержанием в них наиболее крупных «скелетных» фракций.

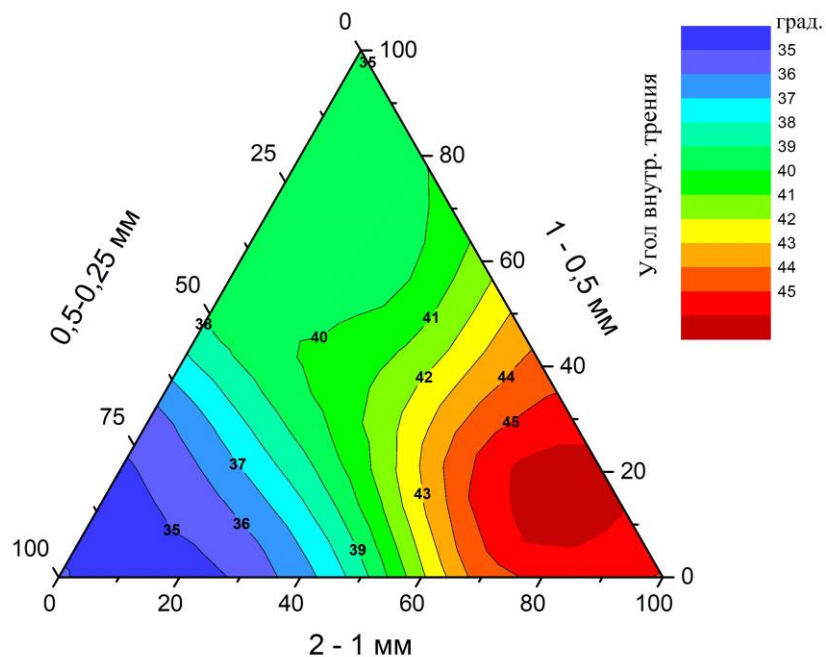


Рис. 15. Треугольная диаграмма изменения величин угла внутреннего трения грунтовых смесей, состоящих из трех фракций: 2-1 мм, 1-0,5 мм и 0,5-0,25 мм, полученная по программе PFC

И наконец, с помощью программы PFC было проведено моделирование испытания на сдвиг грунтовых смесей из трех фракций. На основе полученных данных также была построена треугольная диаграмма (см. рис.15), показавшая хорошее совпадение с аналогичной, построенной на основе экспериментальных данных. Как и в случае грунтовых смесей из двух фракций, грунтовые смеси, состоящие из трех фракций, могут сохранять свою прочность при содержании скелетной фракции больше 70%. При дальнейшем уменьшении содержания скелетной фракции величины угла внутреннего трения постепенно снижаются (см. рис. 15) и стремятся к значениям, характерным для заполнителя. Это, как было указано выше, связано с перераспределением контактных напряжений между частицами.

Изложенные в главе 5 результаты обосновывают **третье защищаемое положение:** *на основе программы PFC (Particle Flow Code, «Закон течения частиц»), разработанной на базе теории дискретной среды, создана компьютерная модель, позволяющая моделировать физико-механические свойства (деформационные и прочностные) создаваемых грунтовых песчаных и песчано-дресвяных смесей с заранее заданными свойствами, и выяснять механизм изменения физико-механических свойств грунтовых смесей в зависимости от их структурных особенностей.*

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Обосновано моделирование изменения свойств грунтовых песчаных и песчано-дресвяных смесей в зависимости от их гранулометрического состава и создание смесей с заданными свойствами двумя методами: 1) с помощью графического способа - треугольной диаграммы, и 2) математического способа, а также на основе теории дискретной среды по компьютерной программе PFC.

2. Подтверждено, что добавление мелких фракций к более крупным частицам, составляющим «скелет» грунтовых песчаных и песчано-дресвяных смесей, приводит к уменьшению пористости смесей. Это обусловлено массовым содержанием заполнителя и соотношением диаметра частиц D . Установлено, что степень снижения пористости грунтовых смесей зависит от отношения диаметров частиц заполнителя I и скелетной фракции, а также заполнителей I и II. Причем, эта зависимость соответствует следующей обобщенной степенной функции:

$$n_{min} = a * n_{zp1} \left(\frac{d_{zp1}}{d_{sk}} \right)^b \left(\frac{d_{zp2}}{d_{zp1}} \right)^c,$$

где, n_{min} – минимальные пористости грунтовых смесей из трех фракций; n_{zp1} – пористость заполнителя I при плотном сложении; d_{sk} , d_{zp1} , d_{zp2} – диаметр скелетных частиц, заполнителей I и II, соответственно; a , b , c – коэффициенты, полученные статистическим расчетом.

Положение экстремальных точек для оптимальных смесей на треугольной диаграмме обусловлено отношением диаметра частиц (d_{zp1}/d_{sk} и d_{zp2}/d_{zp1}). Теоретическое значение точки для оптимальной смеси получается при условии, когда отношение диаметра частиц d_{zp1}/d_{sk} и d_{zp2}/d_{zp1} меньше 1/16. Установленные закономерности позволяют подбирать смеси с заданными физическими свойствами.

3. Наиболее эффективное улучшение деформационных свойств грунтовых песчаных и песчано-дресвяных смесей происходит только при добавлении к скелетным фракциям частиц «не пластичных» заполнителей, отношение диаметров частиц которых к диаметру частиц скелетной фракции меньше чем 1/8.

4. Прочность грунтовых песчаных и песчано-дресвяных смесей, состоящих из двух фракций, обусловлена содержанием в них скелетной фракции. При массовом содержании заполнителя меньше 30% прочность грунтовой смеси почти не меняется. Если же содержание заполнителя больше 30%, то прочность грунтовой смеси уменьшается за счет снижения трения между скелетными частицами и возрастающей роли мелких частиц, выполняющих роль «смазки». При переходе структуры смеси из скелетных частиц к структуре смеси заполнителя зависимость между величинами степени повышения угла внутреннего трения грунтовых смесей (ϕ_{mix}/ϕ_{zp}) и степени снижения пористости (n_{mix}/n_{zp}) соответствует полученной нами степенной функции, которая может использоваться для расчетов.

Что же касается прочности грунтовых песчаных и песчано-дресвяных смесей, состоящих из трех фракций, то, как и смеси из двух фракций, они снижают прочность при массовом содержании скелетных фракций меньше 70% за счет уменьшения трения. Причем, изменение структуры смесей из скелетных частиц при добавлении к ним разных заполнителей на треугольной диаграмме происходит вдоль линий 3-х направлений (трендов) по их степени влияния на прочность грунтовых смесей, соответственно. Установленные закономерности позволяют подбирать смеси с заданными деформационными и прочностными характеристиками.

5. С помощью компьютерной программы PFC установлены закономерности изменения показателей прочности на сдвиг моно-, би- и тридисперсных грунтовых песчаных и песчано-дресвяных смесей различного гранулометрического состава, заключающиеся в следующем:

а) при испытании грунтов на сдвиг в плотном сложении, происходит дилатансия в ходе сдвига, что вызывает резкие скачки касательных напряжений;

б) прочность грунтовых смесей на сдвиг в основном обусловлена массовым содержанием скелетной фракции в связи с тем, что в грунтовых смесях передача наибольших контактных нормальных напряжений происходит через частицы наиболее крупных, т.е. скелетных фракций;

в) изменение величины угла внутреннего трения грунтовых смесей тесно связано с изменением их структуры и контактных напряжений между частицами; при массовом содержании в би- и тридисперсных смесях заполнителя $< 30\%$, контакты между соседними частицами состоят из преимущественно контактов между частицами «скелетной» фракции. В этом случае, грунтовые смеси обычно могут сохранять свою прочность, соответствующую грунту без заполнителя. Когда же массовое содержание заполнителя превышает 30% контактные напряжения между частицами снижаются за счет их рассеяния.

6. Предложенные способы создания грунтовых песчаных и песчано-дресвяных смесей с заданными свойствами имеют большое практическое значение, они могут использоваться производственными организациями при строительстве различных инженерных сооружений, а также для изготовления дисперсных грунтов-аналогов космических тел.

Статьи в рецензируемых научных журналах, определенных п. 2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, опубликованных автором по теме диссертации:

1. *Королёв В. А., Чжан Ш.* Моделирование песчаных грунтов с заданными физическими и физико-механическими свойствами // Инженерная геология. 2015. № 4. С. 6–14.
2. *Чжан Ш., Королёв В. А.* Моделирование песчаных грунтовых смесей с заданными физико-механическими свойствами // Инженерная геология. 2017. № 3. С. 28–35.
3. *Королёв В. А., Чжан Ш.* Моделирование физико-механических свойств песчано-дресвяных грунтовых смесей с помощью программы PFC // Инженерная геология. 2018. Т. XIII, № 1-2. С. 6–20.

Публикация в иных научных изданиях:

1. *Чжан Шэнжун.* Создание грунтовых смесей с заданными свойствами с помощью треугольных диаграмм. // Тр. XI научно-практической конференции молодых специалистов «Инженерные изыскания в строительстве», (Москва, ПНИИИС, Россия, 24 апреля 2015). – М., ПНИИИС, 2015, с. 39 – 42.
2. *Чжан Шэнжун.* Моделирование песчаных грунтов с заданными свойствами. // XXII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Ломоносов-2015", Москва, Россия, 13-17 апреля 2015. – М., МГУ, 2015. (CD).
3. *Korolev V.A., Zhang Shengrong.* The application of graphical method to create sandy soils with given physic-mechanical properties // Journal of Civil, Construction and Environmental Engineering. 2016. Vol. 1, no. 1. P. 1–11.
4. *Королёв В. А., Чжан Ш.* Графическое моделирование грунтовых смесей для получения грунтов с заданными свойствами // Тр. Всероссийской научно-практической конференции "Проблемы технической мелиорации грунтов оснований зданий и сооружений", (Уфа, 5-7 октября 2016 г.) — ГУП "БашНИИстрой, Уфа, 2016. С. 46–51.
5. *Чжан Шэнжун, Королёв В.А.* Создание грунтовых смесей с заданными физико-механическими свойствами на основе графического моделирования. // В сб. XII общероссийская научно-практическая конференция и выставка "Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской

- Федерации", (Санкт-Петербург, Россия, 6-9 декабря 2016). - М., ИГИИС, 2016, с. 78-84
6. Чжан Ш., Королев В. А. Моделирование физико-механических свойств песков для оценки геодинамических процессов // VII Всеросс. научно-технич. конф. Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа (Ессентуки, 6-9 декабря 2017). - Часть 2. Т. 7. ИИЕТ РАН, Москва, 2017. С. 191–201.
 7. Королев В. А., Чжан Ш. Математическое моделирование физических и физико-механических свойств песков на основе теории дискретной среды // XIII научно-практическая конференция и выставка «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Москва, 28 ноября – 1 декабря 2017 г.). — ИГИИС г. Москва, 2017. С. 63–69.
 8. Чжан Шэнжун, Королёв В.А. Применение программы RFS для моделирования физико-механических свойств песчано-гравийных смесей // Вторая общероссийская научно-практическая конференция молодых специалистов "Инженерные изыскания в строительстве" (27 апреля 2018, Москва), - М., ИГИИС, 2018.
 9. Чжан Шэнжун, Королёв В.А. Моделирование физико–механических свойств грунтовых смесей с помощью программы RFS. //В сборнике «Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее (к 100-летию МГРИ–РГГРУ)» материалы Межд. научно-практич. конф. – М., НПП "Фильтроткани", 2018, том 2, с. 278-279
 10. Королёв В.А., Чжан Шэнжун. Моделирование физико-механических свойств песчано-гравийных грунтов на основе теории дискретной среды. // В сб. Ломоносовские чтения, секция Геология. – М., МГУ, 2018, с. 1-2 (CD)
 11. Чжан Шэнжун, Королев В.А. Влияние гранулометрического состава на физические и физико–механические свойства песчано-гравийных грунтовых смесей // Тр. Межд. научн. конф. «Инженерно-геологическое и эколого-геологическое изучение песков и песчаных массивов» (Москва, МГУ, 27-28 сентября 2018). – М., ООО СамПринт, 2018, с. 58-62.