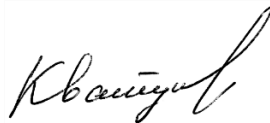


На правах рукописи



КВАШУК Алина Витальевна

**ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ
НЕФТЕПРОДУКТАМИ НА СОСТОЯНИЕ
ОСНОВАНИЙ СООРУЖЕНИЙ**

Специальность 2.1.2. Основания и фундаменты,
подземные сооружения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: Чл.-корр. РААСН, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор
Мангушев Рашид Абдуллович

Официальные оппоненты: **Офрихтер Вадим Григорьевич**
доктор технических наук,
ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», заведующий кафедрой строительного производства и геотехники, доцент;

Конюшков Владимир Викторович
кандидат технических наук,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», доцент.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»**

Защита состоится «09» декабря 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.04 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4, аудитория 220.

Тел. 8 (812) 316-58-73; e-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте: <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/kvashuk-alina-vitalevna>

Автореферат разослан «13» октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.Н. Гайдо

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Важным фактором, влияющим на эффективность работы сооружений нефтяного комплекса, является длительная и безаварийная эксплуатация зданий и сооружений, входящих в его состав. Возникновение ситуаций, сопровождающихся утечками нефтепродуктов в грунты основания, приводит не только к экологическим последствиям, но и влияет на их строительные свойства.

Анализ существующих исследований показал, что большинство авторов придерживаются концепции взаимодействия нефтепродукта с песчаным грунтом, в рамках которой нефтепродукт является смачивающим материалом, который покрывает поверхность минеральных частиц и остается в сужениях поровых каналов. Из-за снижения количества сообщающихся пор снижается коэффициент фильтрации, а из-за эффекта проскальзывания частиц относительно друг друга снижается угол внутреннего трения и увеличивается сжимаемость грунта. Указанные изменения физико-механических характеристик могут привести к снижению несущей способности основания, к развитию дополнительной осадки и ее длительной стабилизации во времени.

Таким образом, учет влияния загрязнения песчаных грунтов нефтепродуктами на состояние грунтов основания является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Вопросу изменения физико-механических характеристик песчаных грунтов при их загрязнении нефтью и нефтепродуктами посвящены работы: Абелева М. Ю., Абильдина Б. К., Афанасьева Р. А., Бракоренко Н. Н., Григорьевой И. Ю., Дашко Р. Э., Емельяновой Т. Я., Ибальдина Б. К., Каченова В. И., Копылова Ю. Н., Королева В. А., Ланге И. Ю., Осовецкого Б. М., Пикулева Д. А., Растегаева А. В., Середина В. В., Ядзинской М. Р. Среди зарубежных авторов по данной теме можно выделить работы следующих авторов: Al-Sanad H. A., Abduljauwad S. N., Akram T., Charkhabi A. H., Cook E. E., Das, B. M., Ebadi T., Evgin, E., Faris Rashled Ahmed, Ismael N. F., Ijimdiya T. S., Igboro T., Khamenchian M., Kermani M., Puri V. K., Shin E. C., Tajik M., Talukdar D. K., Ur-Rehman H., Zahraa Noori.

Закономерности изменения свойств почв и грунтов, загрязненных нефтепродуктами, для решения инженерно-экологических проблем деградации, очистки и рекультивации рассматривались в работах Агаева Т. Б., Габиева Ф. Г., Гусейнова Л. В., Габиевой Л. Ф., Гаврилина И. И., Глазковской М. А., Голованова А. И., Гольдберг В. М. и др.

Вопросами исследования неравномерных деформаций оснований под фундаментами стальных резервуаров, содержащих нефтепродукты, посвящены работы Абелева М. Ю., Большаков Н. В., Буренин В. А., Городновой Е. В., Гохман А. С., Галеев В. Б. Землянского А. А., Коновалова П. А., Мангушева Р. А., Сотникова С. Н., Тарасенко А. А., Усманова Р. А. и др.

В данных работах загрязнение грунта не рассматривается как возможная причина, приводящая к авариям резервуаров, однако неравномерное оседание основания и его местные просадки, могли быть вызваны снижением механических характеристик грунта в виду размыва несущего слоя основания жидкостью при повреждении днища коррозией, что является одной из наиболее распространенных причин аварий резервуаров.

Таким образом, большинство исследований об изменении физико-механических характеристик песчаных грунтов при взаимодействии с нефтью и нефтепродуктами, в основном, касаются инженерно-геологического и геоэкологического направлений, а также автодорожного строительства, в то время как вопросы, связанные с особенностями проектирования фундаментов на таких грунтах и методами прогнозирования изменения их прочностных и механических свойств, влияющих на состояние оснований остаются малоизученными.

Цель исследования: оценка характера и степени изменения физико-механических характеристик песчаных грунтов при взаимодействии с нефтью и нефтепродуктами для прогнозирования изменения состояния грунтов основания сооружений в случае проливов нефтепродуктов.

Задачи исследования:

1. Обобщить и проанализировать экспериментальные данные об изменении физико-механических свойств песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами и возможности их использования в качестве оснований фундаментов зданий и сооружений;
2. Установить характер и степень изменения классификационных и физических характеристик песчаных грунтов различной крупности при их взаимодействии с нефтью и нефтепродуктами;
3. Установить характер и степень изменения механических характеристик песчаных грунтов различной крупности при их взаимодействии с нефтью и нефтепродуктами;
4. Выявить и обосновать характер и степень изменения состояния грунтов основания в случае их загрязнения нефтью и нефтепродуктами с учетом изменения физико-механических свойств грунтов;
5. Разработать рекомендации по методике расчета фундаментов зданий и сооружений по предельным состояниям на территориях, подверженных загрязнению нефтепродуктами.

Объект исследования: Песчаные грунты разной крупности при загрязнении нефтью и нефтепродуктами.

Предмет исследования: Свойства и состояние песчаных грунтов основания с учетом степени их загрязнения нефтью и нефтепродуктами.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Экспериментально подтверждены качественные и количественные изменения гранулометрического состава песчаных грунтов при взаимодействии с нефтью и нефтепродуктами, обусловленные процессами агрегирования и диспергирования минеральных частиц;

2. Экспериментально установлены закономерности изменения коэффициента фильтрации песчаных грунтов при взаимодействии с нефтью и нефтепродуктами и определены их критические концентрации, при которых песчаный грунт становится водонепроницаемым или слабоводопроницаемым с учетом крупности песка, плотности его сложения и влажности;

3. Экспериментально установлены закономерности изменения механических – прочностных и деформационных характеристик песчаных грунтов разной крупности при их взаимодействии с нефтью и нефтепродуктами;

4. Выявлено и обосновано изменение состояния песчаных оснований в случае их загрязнения нефтью и нефтепродуктами, а также увеличение времени стабилизации осадок фундаментов на песчаном основании с учетом изменения коэффициента фильтрации и коэффициента относительной сжимаемости грунта.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке рекомендаций к методике расчета по предельным состояниям фундаментов зданий и сооружений на песчаных основаниях, подверженных нефтяному загрязнению, с учетом изменения физико-механических свойств грунтов, что позволит обеспечить длительную и безаварийную эксплуатацию зданий и сооружений в случае пролива нефти и нефтепродуктов.

Результаты выполненных исследований применены АО «Трест №68» при выполнении работ по устройству основания под сооружения различного назначения на территории Петербургского нефтяного терминала, а также на площадке контейнерного терминала КТСП.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается:

– в установлении закономерностей изменения физико-механических свойств песчаных грунтов разной крупности при их взаимодействии с нефтью и нефтепродуктами в зависимости от крупности песка, вида нефтепродукта и его концентрации;

– в обосновании изменения состояния песчаных оснований в случае их загрязнения нефтью и нефтепродуктами, а также увеличения сроков стабилизации осадок фундаментов на песчаном основании с учетом изменения коэффициента фильтрации и коэффициента относительной сжимаемости грунта.

Методология и методы научного исследования:

1. Обобщение и анализ научно-технических литературных источников;
2. Выполнение лабораторных исследований;
3. Многофакторный регрессионный анализ;
4. Выполнение модельных исследований;
5. Использование эмпирических формул;
6. Сравнительный анализ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования изменений гранулометрического состава песчаных грунтов при взаимодействии с нефтью и нефтепродуктами, обусловленные процессами агрегирования и диспергирования минеральных частиц;
2. Экспериментально установленные закономерности изменения коэффициента фильтрации песчаных грунтов при взаимодействии с нефтью и нефтепродуктами и их критические концентрации, при которых песчаный грунт становится водонепроницаемым или слабоводопроницаемым с учетом крупности песка, плотности его сложения и влажности;
3. Экспериментально установленные закономерности изменения механических характеристик песчаных грунтов разной крупности при взаимодействии с нефтью и нефтепродуктами;
4. Обоснование изменения состояния песчаных оснований в случае их загрязнения нефтью и нефтепродуктами, а также увеличения времени стабилизации осадок фундаментов на песчаном основании с учетом изменения коэффициента фильтрации и коэффициента относительной сжимаемости грунта;
5. Рекомендации к методике расчета фундаментов зданий и сооружений по предельным состояниям на песчаных основаниях, подверженных нефтяному загрязнению.

Область исследования. Диссертация соответствует требованиям паспорта специальности 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения, пункту 2 – «Создание научных и методологических основ фундаментостроения и подземного строительства в сложных инженерно-геологических, гидрогеологических и природно-климатических условиях, а также при особых природных и техногенных воздействиях».

Степень достоверности полученных научных результатов диссертационной работы подтверждается: применением основных положений и моделей механики грунтов; достаточным объемом лабораторных и модельных экспериментов; применением апробированных методов и оборудования для проведения лабораторных испытаний грунтов; использованием эмпирических формул для расчета оснований и фундаментов по

предельным состояниям; результатами статистического анализа и удовлетворительной сходимостью результатов аналитических и численных расчетов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования», 21–27 мая 2023 года, Санкт-Петербург; Международная научно-практическая конференция «Архитектура. Строительство. Транспорт. Экономика», 22 ноября 2023 года, Санкт-Петербург; XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования», 1–7 декабря 2024 года, Санкт-Петербург; III Всероссийская конференция с международным участием «Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий», 29–31 мая 2024 года, г. Пермь; Национальная (всероссийская) научно-техническая конференция с международным участием, посвященная 90-летию кафедры геотехники (механики грунтов, оснований и фундаментов, инженерной геологии), 23–25 октября 2024 года, Санкт-Петербург; XV Международный симпозиум по реологии грунтов, посвященный 95-летию КГАСУ и 60-летию кафедры «Основания, фундаменты, динамика сооружений и инженерная геология»: Теория и практика фундаментостроения», 4–6 июня 2025 года, г. Казань.

Личный вклад автора состоит в формулировании цели и задач исследования; поиске их решения путем проведения достаточного объема лабораторных исследований, направленных на определение характера и степени изменения физико-механических характеристик песчаных грунтов при их загрязнении нефтью и нефтепродуктами; в последующей статистической обработке результатов лабораторных исследований; в обосновании изменения состояния песчаных оснований разной крупности при их загрязнении нефтью и нефтепродуктами аналитическими и численными методами; в разработке рекомендаций к методике расчета по предельным состояниям фундаментов зданий и сооружений на песчаных основаниях, подверженных нефтяному загрязнению, с учетом изменения физико-механических свойств грунтов.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 9 научных работах, в том числе 5 статей – в изданиях, утвержденных перечнем ВАК РФ и 1 статья – в издании, индексируемом международными базами данных Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 104 наименований и 4 приложений. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков и 29 таблиц.

Автор выражает глубокую признательность за участие при выборе темы исследования, за неоценимую помощь, поддержку и наставления на всех этапах подготовки диссертации научному руководителю – члену-корреспонденту РААСН, Заслуженному деятелю науки РФ, доктору технических наук, профессору Рашиду Абдулловичу Мангушеву; благодарит зав. кафедрой геотехники СПбГАСУ, доктора технических наук, доцента Анатолия Ивановича Осокина, преподавателей и сотрудников кафедры за регулярное обсуждение материалов диссертации и конструктивные замечания к работе, а также технического директора ООО «КИНЕФ», кандидата технических наук Алексея Викторовича Камешкова за сырьевое обеспечение для проведения исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, ее научная новизна, определены цель и задачи исследования.

В первой главе описаны физико-механические процессы, происходящие в грунте при загрязнении нефтью и нефтепродуктами (далее НП); обозначены основные закономерности изменения классификационных, физических и механических характеристик песчаных грунтов при взаимодействии с НП.

Анализ существующих исследований показал, что большинство авторов придерживаются концепции взаимодействия нефтепродукта с песчаным грунтом, в рамках которой нефтепродукт является смачивающим материалом, покрывает поверхность минеральных частиц и остается в сужениях поровых каналов. Из-за снижения количества сообщающихся пор снижается коэффициент фильтрации, а из-за эффекта проскальзывания частиц относительно друг друга снижается угол внутреннего трения и увеличивается сжимаемость грунта. При взаимодействии песчаного грунта с НП, наряду с изменением его физико-механических характеристик, происходят изменения гранулометрического состава, обусловленные процессами агрегирования, т.е. образования более крупных частиц, и диспергирования – расщепления частиц на более мелкие. Однако наличие обозначенных процессов и степень их влияния на свойства грунта зависят от множества факторов, таких как: крупность грунта, минералогический состав (инертность породообразующего минерала), наличие примесей, влажность, вид НП, его химический состав, физические свойства, концентрация и т.д. Например, в большинстве исследований отмечается увеличение удельного сцепления песчаного грунта при взаимодействии с НП за счет появления давления связности, однако в отдельных работах зафиксировано снижение удельного сцепления в виду наличия примеси гипса или высокого содержания глинистых частиц. В ряде исследований отмечается,

что НП разрушает водно-коллоидные связи глинистого грунта, увеличивая при этом его водопроницаемость, следовательно характер и степень влияния НП в составе песчаного грунта принципиально отличается от глинистого.

Из результатов проведенного обзора следует, что целью ранее выполненных исследований является оценка возможности применения загрязненных грунтов в природно-хозяйственных целях, в то время как вопросы, связанные с особенностями проектирования фундаментов на таких грунтах, остаются малоизученными.

На основе проведенного аналитического обзора сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлены результаты лабораторных и модельных исследований изменения классификационных и физических характеристик песчаных грунтов при загрязнении НП.

Гранулометрический состав. Лабораторные исследования изменения гранулометрического состава песчаного грунта при взаимодействии с НП проводились ситовым методом в соответствии с ГОСТ 12536–2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава» для моно- и полифракционных навесок кварцевого песка. Концентрация НП составляла $C = 1\%$ по массе сухого грунта. В качестве загрязнителя были использованы тяжелая нефть, дизельное топливо, бензин А-95.

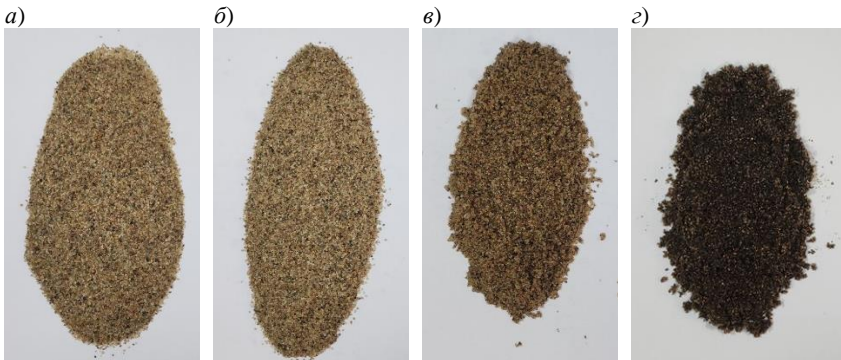


Рис. 1. Песок крупный монофракционный: *a* – чистый; *б* – загрязненный бензином; *в* – дизельным топливом; *г* – нефтью

Результаты лабораторных исследований показали, что изменение фракционного состава крупных песков, песков средней крупности и мелких в большей мере обусловлено диспергированием минеральных частиц

вне зависимости от вида загрязняющего нефтепродукта. Наиболее интенсивное расщепление наблюдалось при взаимодействии образцов песка с бензином. Изменение фракционного состава пылеватых песков обусловлено агрегированием минеральных частиц вне зависимости от вида НП (рис. 2).



Рис. 2. Пылеватый песок, загрязненный дизельным топливом.
Образование агрегатов

Наиболее интенсивное агрегирование наблюдалось при взаимодействии пылеватого песка с нефтью, где более 19 % от массы навески перешло в мелкую фракцию. Таким образом, взаимодействие песчаного грунта с НП сопровождается изменением гранулометрического состава, однако интенсивность этих изменений не приводит к переходу песчаного грунта в более крупную или более мелкую фракции.

Коэффициент фильтрации. Испытания проводились для монофракционных образцов песков крупных, средней крупности и мелких в соответствии с ГОСТ 25584–2016 «Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации» на приборе КФ-1 в стационарном режиме. В качестве изменяемых параметров были приняты плотность сложения испытуемых образцов, влажность, вид и концентрация НП.

Результаты лабораторных испытаний показали, что коэффициент фильтрации песчаных грунтов снижается в диапазоне от 11 % до 99 % в зависимости от крупности песка, вида НП и его концентрации (рис. 3).

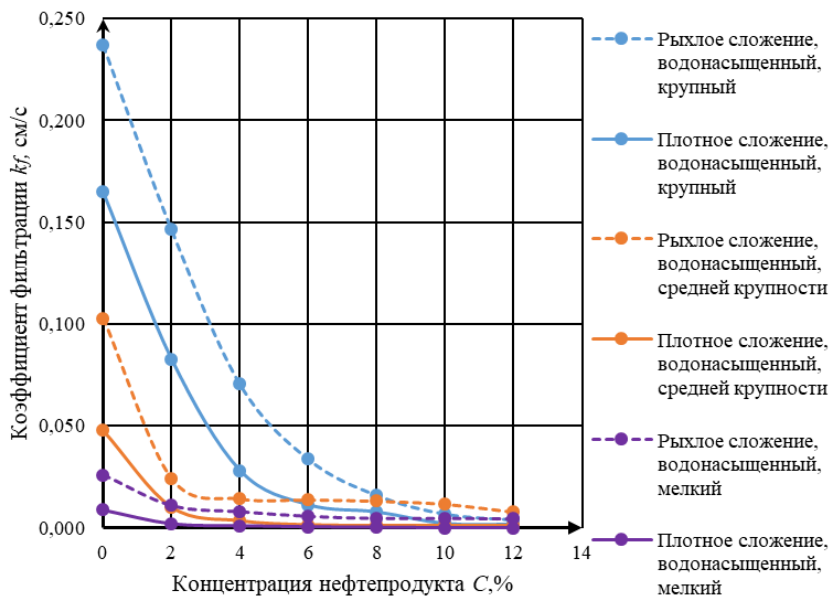


Рис. 3. Изменение коэффициента фильтрации песчаного грунта, загрязненного **дизельным топливом** в водонасыщенном состоянии в зависимости от концентрации НП

С учетом снижения коэффициента фильтрации установлено, что пески средней крупности в плотном сложении в сухом и водонасыщенном состояниях при концентрации $C = 12\%$ нефти и в плотном сложении в сухом состоянии при концентрации $C = 10\%$ нефти могут быть классифицированы как слабопроницаемые в соответствии с ГОСТ 25100 «Грунты. Классификация».

Мелкие пески в водонасыщенном состоянии в плотном сложении являются водонепроницаемыми при концентрации 10% и 12% дизельного топлива; водонепроницаемыми при загрязнении нефтью в плотном сложении вне зависимости от влажности и концентрации нефти и слабопроницаемыми при загрязнении нефтью в концентрации от 6 % до 12% вне зависимости от плотности сложения и влажности (табл.1). Таким образом, фильтрационные свойства песчаного грунта при загрязнении НП сопоставимы со связными грунтами, что свидетельствует о необходимости прогноза фильтрационной консолидации грунтового основания в виду значительного увеличения времени стабилизации осадки.

Таблица 1 – Классификация мелких песков по водопроницаемости при загрязнении НП

Песок мелкий							
С, %	Влажность	Разновидность грунта по водопроницаемости в соответствии с ГОСТ 25100					
		Бензин А95		Дизельное топливо		Тяжелая нефть	
		Рыхлое сложение	Плотное сложение	Рыхлое сложение	Плотное сложение	Рыхлое сложение	Плотное сложение
0	Сухой	ОС	ОС	ОС	ОС	ОС	ОС
	Водонасыщенный	СВ	СВ	СВ	СВ	СВ	СВ
2	Сухой	СВ	СВ	СВ	СВ	СлВ	ВН
	Водонасыщенный	СВ	СВ	СВ	ВП	ВП	ВН
4	Сухой	СВ	СВ	СВ	СВ	СлВ	ВН
	Водонасыщенный	СВ	СВ	СВ	ВП	ВП	ВН
6	Сухой	СВ	СВ	СВ	ВП	СлВ	ВН
	Водонасыщенный	СВ	СВ	СВ	ВП	СлВ	ВН
8	Сухой	СВ	СВ	СВ	ВП	СлВ	ВН
	Водонасыщенный	СВ	СВ	СВ	ВП	СлВ	ВН
10	Сухой	СВ	СВ	СВ	ВП	СлВ	ВН
	Водонасыщенный	СВ	СВ	СВ	ВН	СлВ	ВН
12	Сухой	СВ	СВ	СВ	ВП	СлВ	ВН
	Водонасыщенный	ВП	ВП	СВ	ВН	СлВ	ВН

Легенда (в соответствии с ГОСТ 25100—2020, табл. 4)

Разновидность грунтов	Аббревиатура	k_f , м/сут		k_f , см/с	
Водонепроницаемый	ВН	<=	0,005	<=	0,00001
Слабоводонепроницаемый	СлВ	0,005	0,3	0,00001	0,0003
Водопроницаемый	ВП	0,3	3	0,0003	0,003
Сильноводонепроницаемый	СВ	3	30	0,003	0,035
Очень сильноводонепроницаемый	ОС	30	<	0,035	<

В третьей главе представлены результаты лабораторных испытаний по определению характера и степени изменения механических характеристик песчаных грунтов при загрязнении НП.

Угол внутреннего трения и удельное сцепление. Испытания по определению прочностных характеристик, проводились методом одноплоскостного среза в соответствии с ГОСТ 12248.1-2020 «Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза» на монофракционных песчаных образцах различной крупности (рис. 4). В качестве загрязняющего нефтепродукта использовался бензин, дизельное топливо и нефть. Концентрация нефтепродукта составляла $C = 2, 6$ и 12% . Нормальное давление p на этапе предварительного уплотнения составляло $0,1; 0,2; 0,3$ МПа.



Рис. 4. Образец песчаного грунта, загрязненного дизельным топливом, после проведения испытания на одноплоскостной срез

Результаты лабораторных испытаний показали, что угол внутреннего трения φ° песчаного грунта снижается при взаимодействии с НП в диапазоне от 5 до 22 % в зависимости от крупности песка, вида НП и его концентрации, в то время как удельное сцепление песчаного грунта увеличивается в диапазоне от 12 % до 10 раз (рис. 5,6).

Максимальное снижение угла внутреннего трения φ наблюдается при загрязнении песчаного грунта тяжелой нефтью. С увеличением концентрации от 0 до 12 %, угол внутреннего трения φ снижается на 8–22 % в зависимости от крупности песка. Наименьшее снижение φ наблюдается при загрязнении песчаного грунта бензином. С увеличением концентрации от 0 до 12 %, угол внутреннего трения снижается на 5–17 % в зависимости от крупности песка.

Максимальное увеличение удельного сцепления c (кПа) наблюдается при загрязнении песчаного грунта тяжелой нефтью. С увеличением концентрации от 0 до 12 % удельное сцепление увеличивается от 30% до 10 раз в зависимости от крупности песка.

Наименьшее увеличение c (кПа) наблюдается при загрязнении песчаного грунта бензином – с увеличением концентрации от 0 до 12 % удельное сцепление увеличивается в диапазоне от 12 % до 6 раз в зависимости от крупности песка.

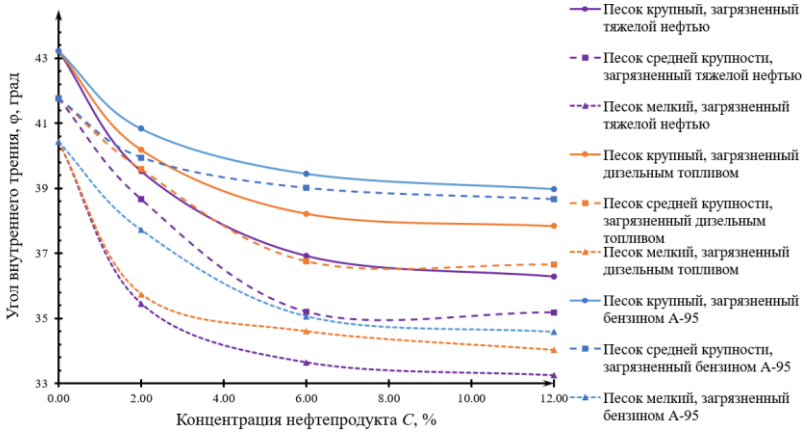


Рис. 5. График зависимости изменения значений угла внутреннего трения φ° от концентрации нефтепродукта C % для песков разной крупности

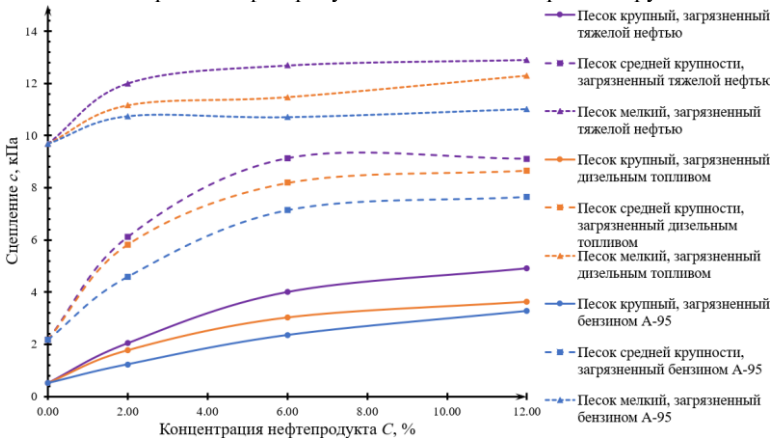


Рис. 6. График зависимости изменения значений удельного сцепления c , кПа от концентрации нефтепродукта C % для песков разной крупности

Одометрический модуль деформации. Испытания проводились методом компрессионного сжатия в диапазоне давлений 100–200 кПа в соответствии с ГОСТ 12248.4–2020 «ГРУНТЫ. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия» для монофракционных песчаных образцов различной крупности.

Результаты лабораторных испытаний показали, что одометрический модуль деформации E_{oed} песчаного грунта снижается в диапазоне от 40 до 85% при взаимодействии с НП в зависимости от крупности песка, вида НП и его концентрации (рис. 7).

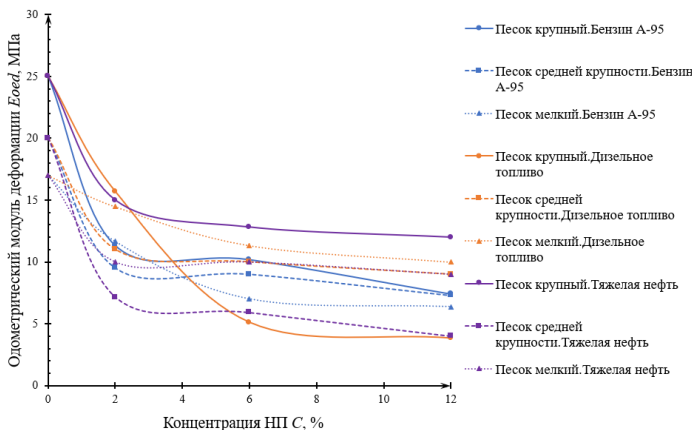


Рис. 7. График зависимости изменения значений одометрического модуля деформации E_{oed} от концентрации нефтепродукта C % для песков разной крупности

Совокупность выполненных лабораторных испытаний позволила установить, что наиболее интенсивное изменение характеристик наблюдается при концентрации НП $C \leq 6$ %, при последующем росте концентрации в диапазоне $6 \% \leq C \leq 12$ % снижение угла внутреннего трения, удельного сцепления и одометрического модуля деформации незначительно и составляет не более 10 %.

В четвертой главе представлены результаты анализа влияния изменения физико-механических свойств песчаных грунтов при их загрязнении НП на состояние песчаных грунтов основания при действии местного равномерно распределенного давления.

Расчетное сопротивление определялось при ширине фундамента $b = 1$ м, с глубиной заложения подошвы фундамента $d = 3$ м для однородного грунтового основания, сложенного песком заданной крупности без учета уровня подземных вод. Характеристики грунта назначались по результатам лабораторных исследований. Коэффициенты условий работы γ_{c1} и γ_{c2} принимались равными 1 для опосредованной оценки изменения расчетного сопротивления в виду изменения физико-механических свойств грунта основания.

Результаты расчетов показали, что значения расчетного сопротивления грунта снижаются в диапазоне от 10 % до почти 40 % в зависимости от крупности песка, вида нефтепродукта и его концентрации, однако даже при максимальном снижении расчетного сопротивления грунта среднее давление под подошвой фундамента $p=200$ кПа не превышает R , что свидетельствует о сохранении линейного характера деформирования основания и его работе в до предельной стадии, и, как следствие, возможности применения модели прочности Мора-Кулона при численном моделировании и метода

последнего суммирования для определения конечной осадки фундамента (рис. 8).

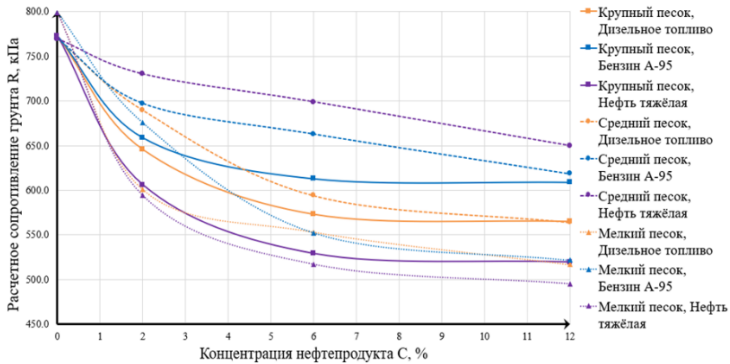


Рис. 8. График зависимости значений расчетного сопротивления грунта R от концентрации нефти и нефтепродуктов C %

Конечная осадка фундамента определялась методом послойного суммирования для однородного основания, сложенного песками заданной крупности без учета уровня подземных вод. Среднее давление по подошве фундамента принималось $p = 200$ кПа, габаритные размеры фундамента $b = 1$ м, $l = 10$ м, глубина заложения подошвы $d = 3$ м. Общий модуль деформации определен с учетом принятого коэффициента Пуассона $\nu = 0,3$.

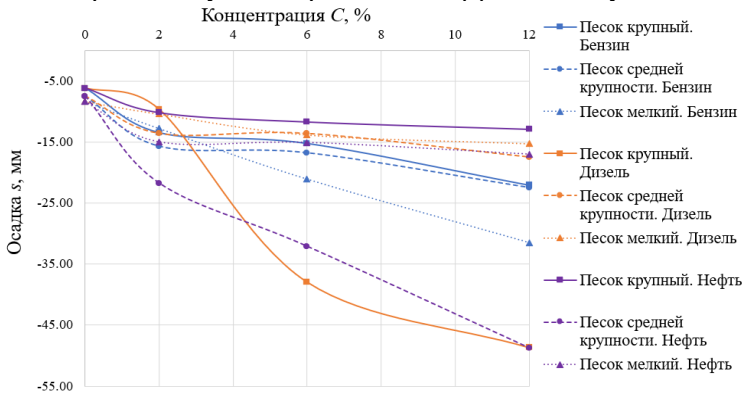


Рис. 9. График зависимости конечной осадки S ленточного фундамента от концентрации нефти и нефтепродуктов C %

Результаты расчетов показали, что при загрязнении крупного песчаного грунта НП осадка фундамента увеличивается в сравнении с осадкой на чистом основании вплоть до 8 раз; песчаного грунта средней крупности – в 6,5 раз; мелкого песчаного грунта – в 4 раза в зависимости от вида НП и его концентрации (рис. 9).

Прогноз фильтрационной консолидации грунта выполнялся с целью определения увеличения времени стабилизации осадки однородного песчаного основания заданной крупности в случае его загрязнения НП с учетом снижения фильтрационных свойств грунта и увеличения коэффициента относительной сжимаемости. Интенсивность действующего давления принималась равной $p = 200$ кПа. Рассматриваемая толщина деформируемого слоя $h = 5$ м.

Результаты расчетов показали, что загрязнение песчаного основания НП приводит к увеличению сроков стабилизации осадки вплоть до 17,5 лет в зависимости от крупности песка, вида НП и его концентрации (табл. 2).

Таблица 2 – Время стабилизации осадки песчаных оснований разной крупности при загрязнении НП при действии равномерно распределенного давления

t_стабилизации, годы							
НП	С, %	Крупность песчаного грунта					
		крупный		средней крупности		мелкий	
		при $c_{v,max}$	при $c_{v,min}$	при $c_{v,max}$	при $c_{v,min}$	при $c_{v,max}$	при $c_{v,min}$
Бензин	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002
	2	0.000	0.000	0.001	0.002	0.004	0.005
	6	0.000	0.001	0.002	0.003	0.010	0.014
	12	0.001	0.001	0.004	0.005	0.015	0.020
ДТ	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002
	2	0.000	0.000	0.002	0.003	0.009	0.011
	6	0.005	0.005	0.017	0.021	0.048	0.057
	12	0.040	0.048	0.024	0.029	10.897	13.007
Нефть	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.002
	2	0.006	0.007	0.079	0.088	6.286	6.997
	6	0.012	0.014	0.120	0.133	9.666	10.760
	12	0.033	0.036	0.236	0.262	15.715	17.493

Примечание: 1 месяц = 0,08 лет, 1 день = 0,003 года.

Коэффициент консолидации $c_{v,min}$ определен при удельном весе поровой жидкости, принятом как удельный вес воды $\gamma_w = 10$ кН/м³; $c_{v,max}$ определен при удельном весе поровой жидкости, принятом как удельный вес НП

Сравнительный анализ результатов определения конечной осадки методом послойного суммирования и численным методом с использованием ПК PLAXIS. Численное моделирование напряженно-деформированного со-

стояния однородного песчаного основания заданной крупности под ленточным фундаментом стального вертикального цилиндрического резервуара объемом 20 тыс. м³, загрязненного НП, выполнялось в упруго-пластической модели Мора-Кулона при плоской и осесимметричной постановке задачи без учета уровня подземных вод.

Ширина подошвы фундамента принималась равной $b = 1$ м, среднее давление по подошве фундамента $p = 200$ кПа, глубина заложения подошвы $d = 3$ м, при решении осесимметричной задачи диаметр днища резервуара принимался равным $D = 50$ м. В качестве исходных данных принимались значения физико-механических характеристик грунта по результатам выполненных лабораторных испытаний.

Результаты сравнительного анализа показали, что в случае, когда *основание сложено крупным песком* численный метод (МКЭ) расчета дает большее значение осадки в сравнении с аналитическим методом послойного суммирования, в то время как для *оснований, сложенных песком средней крупности и мелким*, величина осадки, рассчитанная аналитически, больше, чем с помощью численного метода. Сходимость аналитического и численного методов расчета составляет 70 % до 99 % в зависимости от крупности песка, вида НП и его концентрации.

Данный результат обусловлен разным набором исходных физико-механических характеристик грунта, учитываемых при расчете, а также влиянием этих характеристик (с учетом характера и степени их изменения) на состояние грунта основания. Так, например, метод послойного суммирования не учитывает возможность развития пластических деформаций более, чем на глубину $0,25b$, а также изменение, и наличие в целом, прочностных характеристик грунта при загрязнении НП, в частности снижение угла внутреннего трения на 5–22 %, сопровождающееся увеличением сцепления у песков средней крупности и мелких вплоть до 13 кПа, в то время как у крупного песка – до 5 кПа.

Отсюда следует, что при наличии у песчаного грунта, загрязненного НП, характерных свойств связных грунтов (песков средней крупности и мелких), таких как низкая водопроницаемость и наличие сцепления, аналитический метод расчета будет давать большие значения осадок, чем МКЭ, при условии практически 100% сходимости численного и аналитического методов определения конечной осадки чистого песчаного основания (рис. 10).

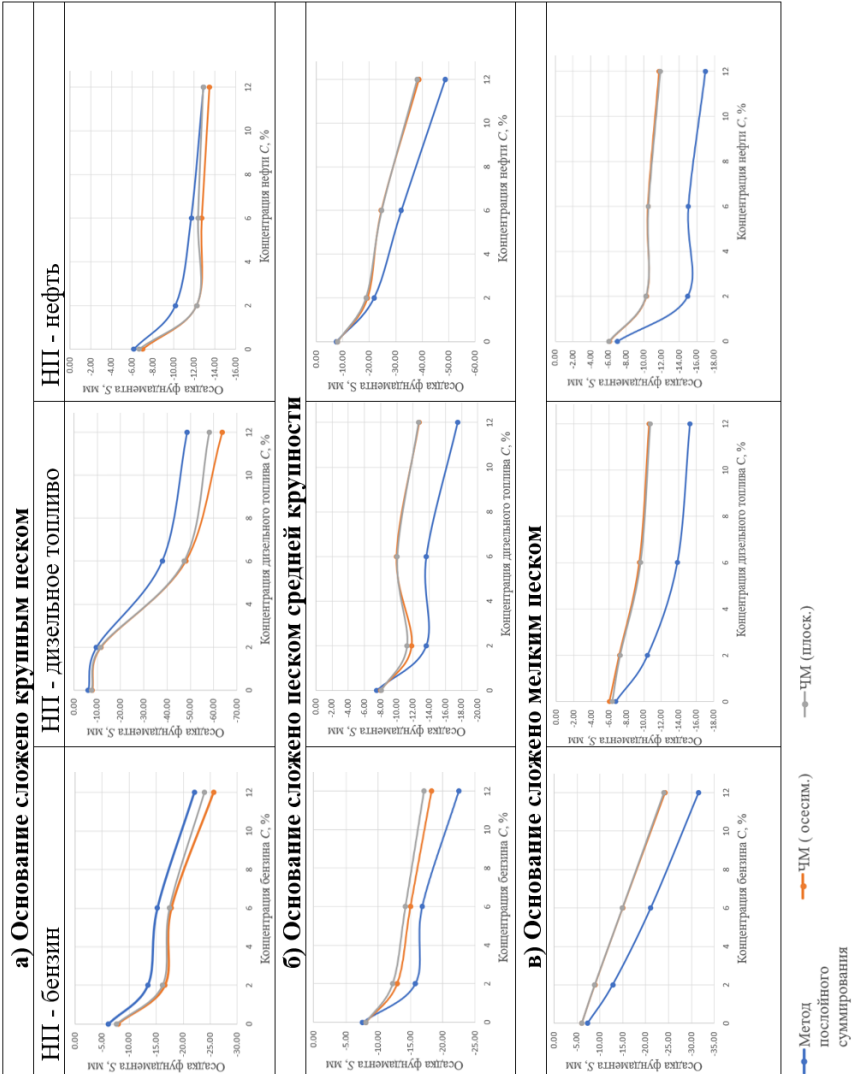


Рис.10. График зависимости конечной осадки от концентрации НП (%):
 а – для крупного песчаного грунта; б – для песчаного грунта средней крупности;
 в – для мелкого песчаного грунта

Анализ развития дополнительных неравномерных осадок фундаментов резервуаров при локальном загрязнении основания нефтью и нефтепродуктами выполнялся с помощью численного моделирования в ПК PLAXIS 3D (рис. 11) со следующими исходными данными: диаметр резервуара – 50 м; вместимость резервуара – 20 000 м³; глубина заложения подошвы кольцевого ленточного фундамента – 3 м; ширина ленты – 1 м; $p = 200$ кПа; габаритные размеры пятна загрязнения – 24x27 м; глубина просачивания нефти и нефтепродуктов – 3 м, 5 м, 7 м. Основание – однородное песчаное, сложенное крупным, мелким и песком средней крупности. Физико-механические характеристики грунта принимались по результатам лабораторных исследований при концентрации НП $C=12\%$.

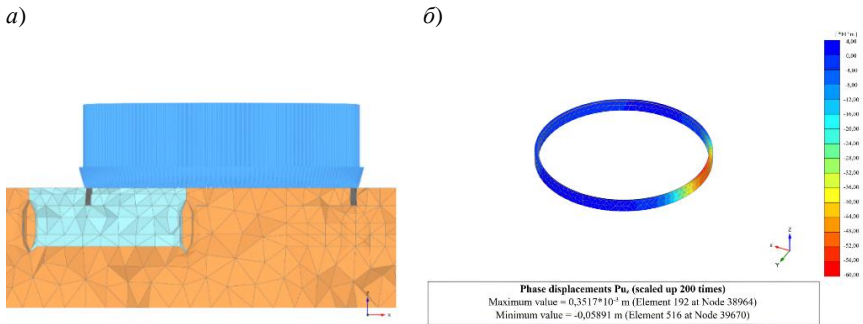


Рис. 11. Численное моделирование развития деформаций основания резервуара при локальном загрязнении грунтов нефтепродуктами в ПК PLAXIS 3D: а) конечно-элементная схема расположения зоны загрязненного грунта под резервуаром; б) деформационная схема основания фундамента резервуара

С учетом требований РД-08-95-95 и СП 43 были приняты следующие критерии оценки неравномерности осадки:

- 1) Разность отметок смежных точек по наружному контуру днища на расстоянии 6 м по периметру ΔS_c , мм не более 46 мм;
- 2) Разность отметок двух диаметрально противоположных точек по наружному контуру днища $\Delta S_{д.п.}$, мм не более 98 мм;
- 3) Разность осадок под центральной частью и под стеной (центр-периметр) $\Delta S_{ц.-п.}$ мм не более 75 мм;

Результаты численного моделирования показали следующее (табл. 3):

– при глубине распространения нефти и нефтепродуктов равной 3 м;

Значения неравномерности осадки фундамента в пределах загрязненной зоны не превышают предельных значений по всем обозначенным критериям вне зависимости от вида вытекшего нефтепродукта.

– при глубине распространения нефти и нефтепродуктов равной 5 м;

Неравномерность осадки фундамента *превышает предельное значение* для основания, сложенного крупным песком дизельным топливом и нефтью по критерию $\Delta S_{ц.-п.}$. Для оснований, сложенных песком средней крупности и мелким значений неравномерности осадки, превышающих предельные, не выявлено.

– при глубине распространения нефти и нефтепродуктов равной 7 м;

По критерию ΔS_c выявлено превышение предельного значения *неравномерности осадки* фундамента при загрязнении дизельным топливом для песчаных оснований всех крупностей.

По критерию $\Delta S_{д.п.}$ выявлено превышение предельного значения *неравномерности осадки* фундамента при загрязнении всеми видами нефтепродуктов.

По критерию $\Delta S_{ц.-п.}$ выявлено превышение предельного значения на 21–98 мм для крупного песчаного основания при загрязнении всеми видами нефтепродуктов; для песчаного основания средней крупности на 45 мм при загрязнении дизельным топливом и для мелкого песчаного основания на 35–40 мм при загрязнении бензином и дизельным топливом.

Таблица 3 – Результаты численного моделирования развития дополнительных неравномерных осадок фундаментов резервуаров при локальном загрязнении грунтового основания нефтью и нефтепродуктами

Значения неравномерности осадок при глубине просачивания 5 м (мм)									
Критерий оценки	Крупный песок			Средней крупности			Мелкий песок		
	Б	ДТ	Н	Б	ДТ	Н	Б	ДТ	Н
ΔS_c (смежные)	13	22	24	3	10	27	32	35	38
$\Delta S_{д.п.}$ (диам.п)	52	84	85	6	24	56	70	58	69
$\Delta S_{ц.-п.}$ (центр-периметр)	52	84	85	6	24	56	70	58	69

Окончание табл. 3

Значения неравномерности осадок при глубине просачивания 7 м (мм)									
Критерий оценки	Крупный песок			Средней крупности			Мелкий песок		
	Б	ДТ	Н	Б	ДТ	Н	Б	ДТ	Н
ΔS_c (смежные)	25	52	25	6	52	15	44	56	42
$\Delta S_{д.п.}$ (диам.п)	96	173	100	13	120	33	115	110	59
$\Delta S_{ц.-п.}$ (центр-периметр)	96	173	100	13	120	33	115	110	59
<p><i>Примечание:</i></p> <p> – значения неравномерности осадок, превышающих предельные, в случае если срок эксплуатации резервуара менее 20 лет;</p> <p>Б – бензин; ДТ – дизельное топливо; Н – нефть.</p>									

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Нефть и нефтепродукты являются смачивающей средой, которая покрывает поверхность минеральных частиц и остается в сужениях поровых каналов. Снижение количества сообщающихся пор приводит к снижению коэффициента фильтрации, а из-за эффекта проскальзывания частиц снижается угол внутреннего трения и увеличивается сжимаемость грунта. При взаимодействии песчаного грунта с НП происходят изменения гранулометрического состава, обусловленные процессами агрегирования и диспергирования. Степень влияния обозначенных процессов на свойства песчаного грунта зависит от крупности грунта, его минералогического состава (инертность породообразующего минерала), наличия примесей, влажности, плотности сложения, вида НП, его химического состава, концентрации и т.д.

2. Изменение гранулометрического состава крупных, средних и мелких песчаных грунтов в большей мере обусловлено диспергированием, чем агрегированием минеральных частиц вне зависимости от вида нефтепродукта. Наиболее интенсивное расщепление наблюдается при взаимодействии песчаного грунта с бензином. Наиболее интенсивное агрегирование наблюдалось при взаимодействии пылеватого песка с нефтью. Взаимодействие песчаного грунта с НП сопровождается изменением гранулометрического состава, однако интенсивность изменений не приводит к переходу песчаного грунта в более крупную или более мелкую фракции.

3. Коэффициент фильтрации песчаных грунтов снижается в диапазоне от 11 % до 99 % в зависимости от крупности песка, вида нефтепродукта и его концентрации. Установлено, что мелкие пески при высоких концентрациях нефти и дизельного топлива могут быть классифицированы как слабоводопроницаемые и водонепроницаемые в соответствии с ГОСТ 25100 «Грунты. Классификация».

4. Угол внутреннего трения снижается при взаимодействии с НП в диапазоне от 5 до 22 %; удельное сцепление увеличивается в диапазоне от 12 % до 10 раз; одометрический модуль деформации снижается в диапазоне от 40 до 85 % в зависимости от крупности песка, вида НП и его концентрации. Результаты лабораторных испытаний показали, что наиболее интенсивное изменение характеристик грунта наблюдается при концентрации НП $C \leq 6\%$, при последующем росте концентрации в диапазоне $6\% \leq C \leq 12\%$ снижение механических характеристик незначительно и составляет не более 10 %.

5. На основе проведенного расчетного анализа установлено, что сопротивление грунтов основания снижается в диапазоне от 10 до 40 %; предельное давление на грунт основания - от 17 до 60 %, в зависимости от крупности песка, вида нефтепродукта и его концентрации. Расчетная осадка фундамента на основании из крупного песка увеличивается вплоть до 8 раз; песчаного грунта средней крупности – в 6,5 раз; мелкого песчаного грунта – в 4 раза в зависимости от вида НП и его концентрации. Загрязнение песчаного основания НП приводит к увеличению сроков стабилизации осадки (вплоть до 17,5 лет) в зависимости от крупности песка, вида НП и его концентрации. При наличии у песчаного грунта, загрязненного НП, характерных свойств связных грунтов, аналитический метод расчета показывает большие значения осадок, чем МКЭ.

6. При расчете фундаментов по предельным состояниям необходимо учитывать: снижение предельного давления на грунт основания на 17–60 % в зависимости от крупности песчаного грунта, вида НП и его концентрации; снижение расчетного сопротивления грунта и вероятность развития дополнительных осадок, в разы превышающих расчетное значение, а также увеличение сроков стабилизации осадок фундаментов. При определении расчетной конечной осадки необходимо использовать методы, учитывающие не только изменение деформационных, но и прочностных характеристик песчаных грунтов, а также возможность развития пластических деформаций в области пятна загрязнения и появления неравномерных осадок, превышающих предельное значение.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в перечень ВАК

1. Квашук, А. В. Влияние загрязнения песчаного грунта нефтепродуктами на его физические свойства / **А. В. Квашук** // Вестник гражданских инженеров. – 2023. – № 1(96). – С. 57-66. – DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-1-57-66.
2. Квашук, А. В. Изменение механических свойств песчаных грунтов при их загрязнении нефтепродуктами / **А. В. Квашук** // Вестник гражданских инженеров. – 2023. – № 3(98). – С. 33-43. – DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-3-33-43.
3. Квашук, А. В. К вопросу изменения фильтрационных свойств песчаных грунтов при взаимодействии с нефтепродуктами / **А. В. Квашук** // Вестник гражданских инженеров. – 2024. – № 2(103). – С. 62-73. – DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-2-62-73.
4. Квашук, А. В. Исследование изменения гранулометрического состава монофракционного песчаного грунта при взаимодействии с нефтепродуктами / **А. В. Квашук** // Вестник гражданских инженеров. – 2024. – № 3(104). – С. 51-58. – DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-3-51-58.
5. Исследование скорости инфильтрации нефтепродуктов в песчаные грунты в зависимости от плотности фильтрующей жидкости / Р. А. Мангушев, **А. В. Квашук**, А. В. Вагурина, И. Д. Куляшов // Экономика строительства. – 2024. – № 8. – С. 173-178.

Публикации в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science

6. Mangushev, R., Kvashuk, A., Vagurina, A., & Kulyashov, I. (2024). The research of an impact in strength characteristics of oil-contaminated sandy soils. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 20(4), 172-185. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2024-20-4-172-185>.

Статьи в других печатных изданиях

7. Мангушев Р.А., **Квашук А.В.**, Вагурина А.В., Куляшов И.Д. / Исследование изменения угла внутреннего трения песчаных грунтов при загрязнении нефтепродуктами // Современные методы проектирования, подземного строительства и реконструкции оснований и фундаментов (GFAC 2024), Санкт-Петербург, 23–25 октября 2024 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2024. – С. 86.
8. **Квашук А. В.** / Изменение механических характеристик песчаных грунтов при их загрязнении нефтепродуктами // Актуальные проблемы

недропользования: тезисы докладов участников XIX Международного форума-конкурса студентов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 21–27 мая 2023 года, Том 1. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2023. – С. 302-304.

9. Мангушев Р.А., **Квашук А.В.**, Вагурина А.В./ Исследование влияния загрязнения песчаных грунтов нефтепродуктами на изменение коэффициентов фильтрации//Фундаменты глубокого заложения и проблемы геотехники территорий: Материалы III Всероссийской конференции с международным участием, г. Пермь, 29–31 мая 2024 года - г. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2024. – С. 25–36.

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 25.09.2025. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 105.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А