

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет»
Министерство науки и высшего образования

На правах рукописи

КВАШУК Алина Витальевна

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

Специальность: 2.1.2. Основания и фундаменты, подземные сооружения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

Член-корреспондент РААСН, Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Р.А. Мангушев

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ПРИ ИХ ЗАГРЯЗНЕНИИ НЕФТЬЮ И НЕФТЕПРОДУКТАМИ.....	14
1.1. Физико-механические процессы, происходящие в грунте при загрязнении нефтью и нефтепродуктами	14
1.2. Изменение классификационных и физических характеристик песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами.....	18
1.3. Изменение прочностных и деформационных характеристик песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами.....	31
1.4. Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования.....	37
ГЛАВА 2. ЛАБОРАТОРНЫЕ И МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ И ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ НЕФТЬЮ И НЕФТЕПРОДУКТАМИ.....	40
2.1. Исследование изменения гранулометрического состава песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами	40
2.1.1. Методика проведения лабораторных исследований изменения гранулометрического состава поли- и -монофракционных песков.....	40
2.1.2. Результаты лабораторных исследований	41
2.2. Исследование изменения коэффициента фильтрации песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами	47
2.2.1. Методика проведения лабораторных испытаний по определению изменения коэффициента фильтрации песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами	47
2.2.2. Результаты лабораторных испытаний	50
2.3. Исследование изменения удельного веса песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами	60
2.3.1. Методика проведения лабораторных испытаний по определению изменения удельного веса песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами.....	60
2.3.2. Оценка результатов лабораторных испытаний.....	61
2.4. Модельное исследование распределения концентрации нефти и нефтепродуктов по глубине песчаного массива	62

2.4.1.Методика и лабораторное оборудование для проведения модельного исследования распределения концентрации нефти и нефтепродукта по глубине песчаного массива	62
2.4.2.Анализ результатов модельного эксперимента	68
2.5. Выводы по главе 2.....	75
ГЛАВА 3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ НЕФТЬЮ И НЕФТЕПРОДУКТАМИ.....	76
3.1. Методика проведения лабораторных испытаний по определению изменений механических характеристик песчаных грунтов при их загрязнении нефтью и нефтепродуктами	76
3.1.1.Результаты выполненных лабораторных испытаний.....	79
3.2. Многофакторный регрессионный анализ влияния заданных факторов на интенсивность изменения прочностных характеристик песчаных грунтов...	83
3.3. Выводы по главе 3.....	92
ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ПРИ ИХ ЗАГРЯЗНЕНИИ НЕФТЬЮ И НЕФТЕПРОДУКТАМИ НА СОСТОЯНИЕ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ МЕСТНОГО РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННОГО ДАВЛЕНИЯ	94
4.1. Оценка изменения величины расчетного сопротивления песчаных грунтов основания при загрязнении нефтью и нефтепродуктами.....	94
4.2. Оценка изменения предельного давления на песчаный грунт основания при загрязнении нефтью и нефтепродуктами	98
4.3. Оценка изменения величины конечной осадки, определенной методом послойного суммирования	100
4.4. Прогноз фильтрационной консолидации песчаных оснований при загрязнении нефтью и нефтепродуктами	103
4.5. Сравнительный анализ результатов определения конечной осадки методом послойного суммирования и численным методом в ПК PLAXIS...	105
4.6. Анализ развития дополнительных неравномерных осадок фундаментов резервуаров при локальном загрязнении основания нефтью и нефтепродуктами численным методом в ПК PLAXIS 3D.....	109
4.7. Рекомендации по методике расчета фундаментов зданий и сооружений на территориях, подверженных загрязнению нефтью и нефтепродуктами	120
4.8. Выводы по главе 4.....	121

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	125
ПРИЛОЖЕНИЕ №1. Паспорта нефтепродуктов и песка	137
ПРИЛОЖЕНИЕ №2. Протоколы испытаний ЛПСиЭ.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ №3. Вспомогательные расчеты к прогнозу фильтрационной консолидации грунта.....	144
ПРИЛОЖЕНИЕ №4. Справка о внедрении результатов исследования.....	149

ВВЕДЕНИЕ

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 нефти и нефтепродуктов в грунты основания, приводит не только к экономическим и экологическим последствиям, но и влияет на их строительные свойства.

Анализ существующих исследований по обозначенной теме 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., Абильдин 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., Eid W.K, Evgin, E., Faris Rashled Ahmed, Hamed M. Jassim, Ismael N.F., Ijimdiya T. S., Igboro T., Khamenchiyan 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., Глазовской М.А., Голованова А.И., Гольдберг В.М. и др.

Отметим, что исследование изменения свойств песчаных грунтов при взаимодействии с нефтью и нефтепродуктами может также рассматриваться с точки зрения возможности улучшения строительных свойств песков путем добавления высокосмолистых нефтей. Анализ литературы показал, что одной из областей, где достаточно широко применяются грунты, загрязненные нефтепродуктами, является дорожное строительство. Первые упоминания о возможности укрепления грунтов сырыми высокосмолистыми нефтями датируются 1915 г. в работах Некрасова К.П. Позднее, в разные годы авторами: Богомолов Ю.Н., Безрук В.М., Бируля А.К., Лейтланд В.Г., Линцер А.В., Попандопуло Г.А., Рацен З.Э., Сасько Г.А., Фридман А.А., Юрченко В.А. и т.д. были проведены научно-исследовательские работы по укреплению песчаных грунтов битумными эмульсиями совместно с цементом, что создало предпосылки для использования в этих целях сырой маловязкой нефти, улучшенной структурирующими добавками, такими как известь и цемент.

Вопросами исследования неравномерных деформаций оснований под фундаментами стальных резервуаров посвящены работы Абелева М.Ю., Большакова Н.В., Буренина В.А., Городновой Е.В., Гохман А.С., Галеева В.Б., Землянскогo 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 основания 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 площадках строительства на территории Петербургского нефтяного терминала, а также на площадке контейнерного терминала КТСП и при реконструкции причалов №102 и №102а Большого Морского порта Санкт-Петербурга.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается:

- в установлении закономерностей изменения физико-механических свойств песчаных грунтов разной крупности при 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 по изменению физико-механических свойств песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами и возможности их использования в качестве оснований фундаментов зданий и сооружений.

2. Выполнение лабораторных исследований для оценки характера и степени изменения физико-механических характеристик песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами.

3. Многофакторный регрессионный анализ влияния заданных факторов на интенсивность изменения прочностных характеристик песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами.

4. Выполнение модельных исследований для оценки глубины и скорости распространения нефти и нефтепродуктов в песчаных грунтах с учетом их крупности.

5. Использование эмпирических формул для оценки изменения состояния песчаных грунтов основания при загрязнении нефтью и нефтепродуктами.

6. Сравнительный анализ результатов определения конечной осадки аналитическим методом механики грунтов и численным методом.

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. Согласно сформулированной цели научной работы, ее научной новизне и установленной практической и теоретической значимости, 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 и выводов 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: LXXVI Научная конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов СПбГАСУ «Архитектура-строительство-транспорт» 19 октября 2022 года. Санкт-Петербург; Межвузовская научно-практическая конференция «Проблемы военного строительства, военной экономики, финансового и квартирно-эксплуатационного обеспечения ВС РФ», 19 октября 2022 года,

Санкт-Петербург; 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 диссертационной работы 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; зав. учебной лабораторией – Константина Вахтанговича Мчедлидзе и ассистента Александру Викторовну Вагурину за содействие в организации и проведении лабораторных и модельных исследований, а также технического директора ООО «КИНЕФ», кандидата технических наук Алексея Викторовича Камешкова за сырьевое обеспечение для успешной реализации диссертационного исследования.

ГЛАВА 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ПРИ ИХ ЗАГРЯЗНЕНИИ НЕФТЬЮ И НЕФТЕПРОДУКТАМИ

1.1. Физико-механические процессы, происходящие в грунте при загрязнении нефтью и нефтепродуктами

Изучение физико-механических процессов, происходящих в песчаных грунтах, загрязненных нефтепродуктами (далее НП), является методически сложной задачей ввиду многофакторного химического состава нефти в зависимости от места ее добычи, влияния температурного режима на вязкость НП, большого количества существующих методик приготовления опытных образцов, изменения пористости, влажности и фильтрационных свойств по глубине грунтового массива, многообразия возможных минералогических составов песков, так как породообразующий минерал определяет интенсивность химического взаимодействия между НП и твердой фазой грунта. В настоящее время сформировались две различные точки зрения на миграцию НП в дисперсных грунтах [37].

Авторы [37,75,15,39] описывают первый возможный вариант миграции НП в грунте следующим образом: «...часть компонентов нефти растворяется в жидкой компоненте грунтов или смешивается с ней, образуя эмульсию, но основная часть нефти представляет собой несмешивающуюся с водой жидкую фазу, которая по законам физики должна приобретать форму капли... принимается, что во влагонасыщенных грунтах нефть занимает центральную часть поры и не соприкасается с минеральными частицами, а в маловлажных часть нефти может соприкасаться с минеральными частицами и сорбироваться их активными центрами».

Противоположную теорию выдвинул В. А. Королев в начале 2000-х годов, в соответствии с которой нефть имеет свойство проникать сквозь пленки связанной воды и адсорбироваться на поверхности минеральных частиц. Взаимодействие между твердой фазой грунта и НП заключается в образовании

маслянистых оболочек вокруг частиц и их агрегировании, что фиксируется на снимках под микроскопом [37,33,41].

В настоящее время теория В. А. Королева наиболее популярна, так как получила множественные лабораторные подтверждения на предмет образования маслянистых пленок, изменения гранулометрического состава (как в сторону агрегирования, так и диспергирования) и снижения фильтрационных свойств грунтов, загрязненных нефтепродуктами.

Например, авторы [37,91,93] проводили лабораторные исследования гранулометрического состава песков, загрязненных легкой нефтью в концентрациях 4, 8 и 12 %, и пришли к выводу, что под воздействием нефтепродукта меняется не только гранулометрический состав, но и поверхность самих частиц (рисунок 1.1).

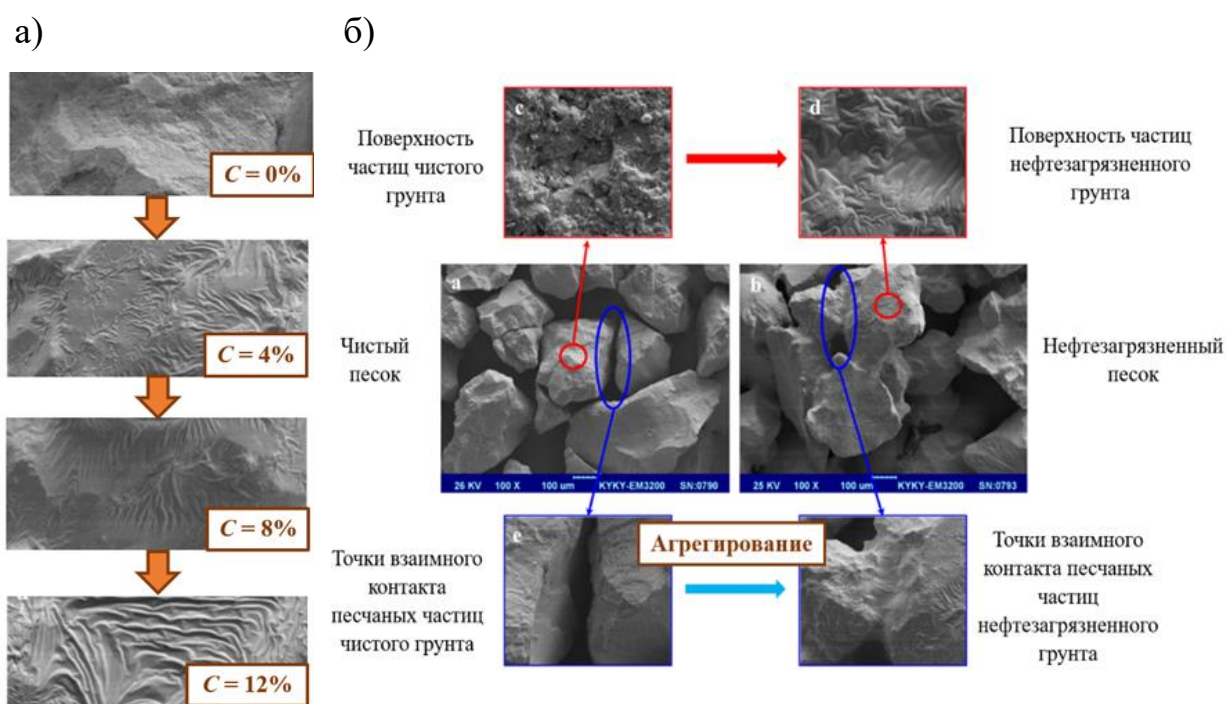


Рисунок 1.1. Изменение гранулометрического состава песков, загрязненных легкой нефтью: а — изменение поверхности минеральной частицы песчаного грунта; б — изменение гранулометрического состава песчаного грунта (агрегирование частиц) [91,93]

Так, в песках, загрязненных легкой нефтью, вне зависимости от ее концентрации наблюдается агрегирование частиц (рисунок 1.1) и уменьшение объема порового пространства как за счет изменения формы частиц, так и за счет заземленного воздуха (газа) в процессе агрегации трех и более частиц.

Кроме процессов агрегирования частиц песчаного грунта, при загрязнении нефтепродуктами возможен и обратный процесс — диспергирование, т. е. расщепление микроагрегатов на более мелкие фракции. В исследованиях [53] экспериментально установлено, что при добавлении в грунт 2,5 % нефти происходит агрегация частиц размером менее 0,005 мм, а при загрязнении 10 % нефти — диспергирование микроагрегатов. Диспергирование песчаного грунта наблюдалось в работах [31, 17] при загрязнении мазутом и бензином; агрегирование имело место в работе [32], где в качестве нефтепродукта использовалось соляровое масло.

Процесс агрегирования может увеличить фильтрационную способность грунта, а диспергирования — наоборот, привести к снижению скорости фильтрации. Однако важно учитывать химические составы и вязкость используемых НП, а также начальный гранулометрический и минералогический состав песков, обращая внимание на наличие/отсутствие в них инертных минералов, т. е. не реагирующих (слабо реагирующих) с НП.

Важно отметить, что процессы агрегирования и диспергирования грунта могут протекать одновременно — так как природный грунт всегда представляет собой совокупность частиц разной крупности.

Существующие решения задач многофазной фильтрации основываются на предположении, что характер вытеснения нефти водой определяется гидрофильными или гидрофобными свойствами грунта. Грунты, которые смачиваются водой лучше, чем нефтью, называются гидрофильными, а те, что смачиваются нефтью лучше, чем водой, — гидрофобными. К гидрофильным грунтам относят глинистые грунты, известняки, доломиты и т. д, а к гидрофобным — грунты, не имеющие структурных связей, т.е. несвязные грунты, такие как гравий, щебень, пески и т. д. Авторы [61] пишут: «...в гидрофильном грунте вода под действием капиллярного давления вытесняет нефть в более крупные поры...» (рисунок 1.2) «...где после вытеснения отдельные капли нефти не имеют контакта с минеральными частицами и

полностью окружены поровой водой. В то время как в гидрофобной среде вода, как не смачивающая фаза, движется по более широким порам, а нефть — как смачивающая фаза покрывает поверхность минеральных частиц, образуя маслянистые оболочки, и остается в сужениях поровых каналов, из-за чего снижается количество сообщающихся пор».

Обозначенный механизм взаимодействия двух несмешивающихся жидкостей в песчаном грунте согласуется с теорией, выдвинутой В. А. Королевым, в соответствии с которой нефть адсорбируется на минеральных частицах. Адсорбционная способность песков, в свою очередь, объясняет образование маслянистых пленок вокруг частиц песка, появление эффекта «проскальзывания» частиц и снижение угла внутреннего трения песчаных грунтов, что подтверждается в работах [56,36,81,13,89,97].

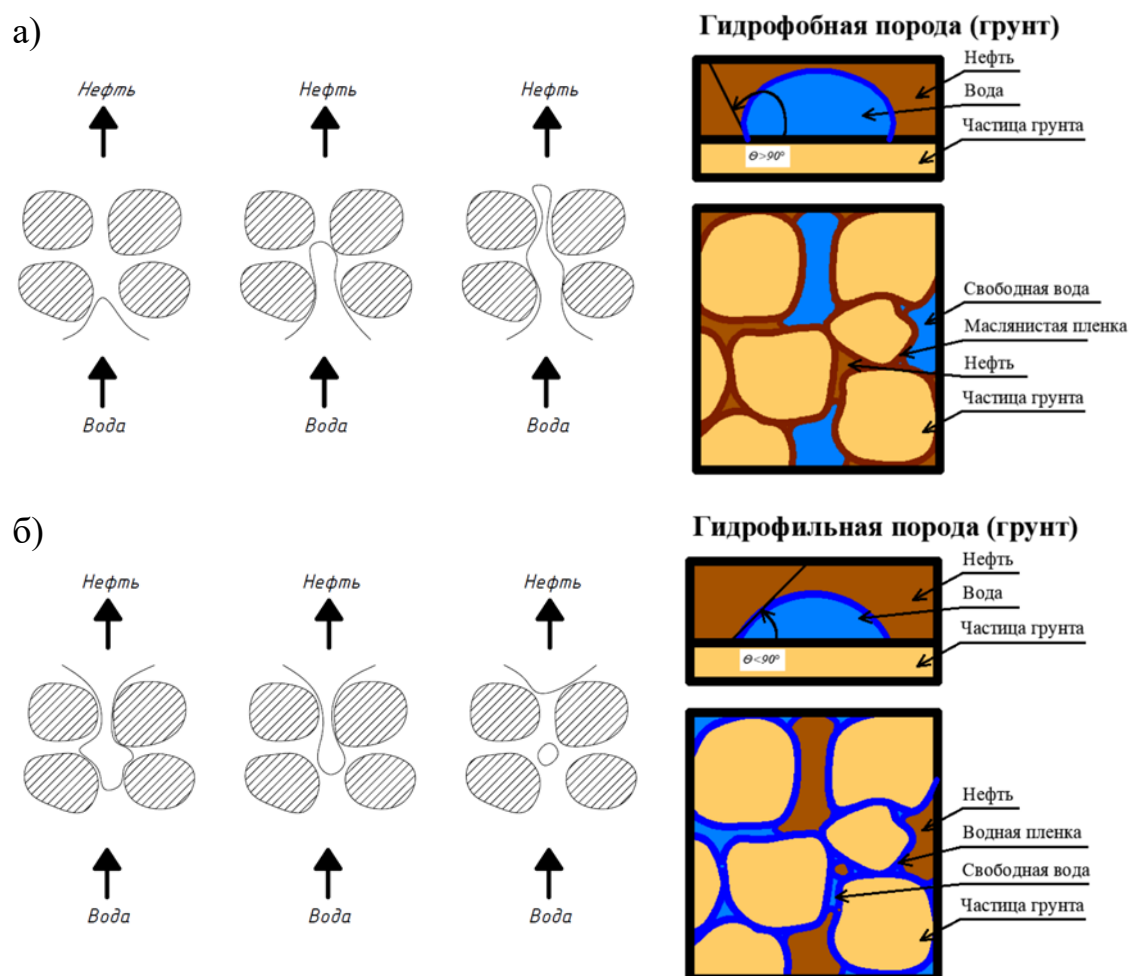


Рисунок 1.2. Характер вытеснения нефти водой в гидрофобном (а) и гидрофильном (б) грунте [61]

1.2. Изменение классификационных и физических характеристик песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами

Гранулометрический состав

Результаты многочисленных лабораторных исследований отечественных и зарубежных авторов о влиянии загрязнения песчаных грунтов нефтепродуктами на их физико-механические свойства подтверждают гипотезы о изменении их состава и свойств [83,82,102,98,99,101].

Так, авторы [32,36,81,13,97] констатируют снижение угла внутреннего трения песчаных грунтов при взаимодействии с нефтепродуктами, предполагая, что подобное изменение вызвано появлением маслянистых пленок, обволакивающих поверхность песчаных частиц и способствующих образованию микроагрегатов. С учетом длительности загрязнения, воздействия внешних климатических факторов, химических реакций на границе раздела жидкой и твердой фаз, образовавшиеся пленки могут отвердевать, увеличивая при этом диаметр минеральных частиц за счет **агрегирования**.

Подтверждением данной гипотезы являются результаты лабораторных исследований [92], где рассматривалось изменение гранулометрического состава мелких песков, загрязненных нефтью в концентрации 2,10,20% по массе сухого грунта. Укрупненная под микроскопом фотофиксация образцов показала, что при взаимодействии несвязного грунта с НП меняются форма поверхности минеральной фазы, а также увеличивается диаметр частиц (рисунок 1.3). Аналогичные результаты получены в исследованиях [41,91,93,33].

Об изменении структуры песчаного грунта вследствие агрегирования частиц также свидетельствуют исследования [85] и [92], где выполнялись наблюдения с помощью микроскопа. Авторы связывают подверженность песчаных частиц процессам агрегирования с образованием маслянистых нефтяных оболочек вокруг зерен песка. Результаты показали, что

интенсивность процесса агрегирования частиц связана с концентрацией нефтепродукта - с увеличением концентрации, интенсивность процесса образования микроагрегатов увеличивалась.

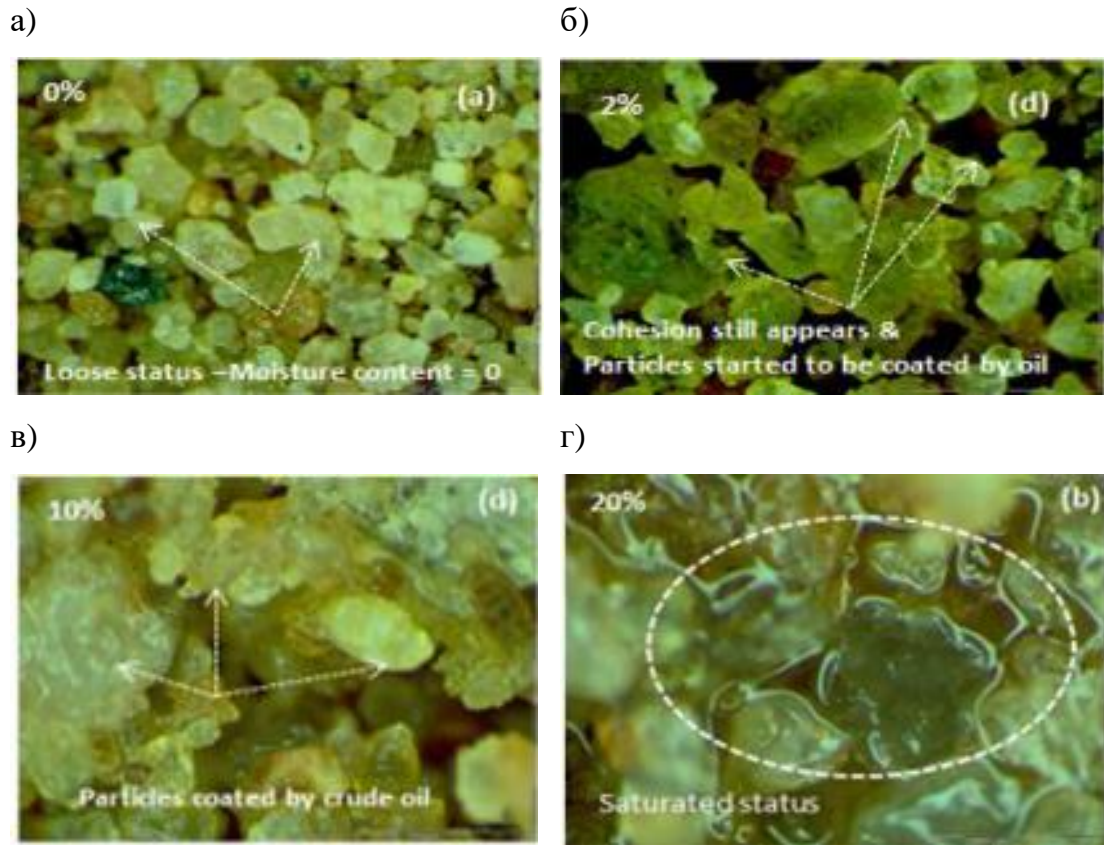


Рисунок 1.3. Фотографии песчаных частиц мелкой фракции а) незагрязненного, б) загрязненного сырой нефтью в концентрации 2%, в) загрязненного сырой нефтью в концентрации 10%, г) загрязненного сырой нефтью в концентрации 20% [92]

На ряду с обозначенными результатами, существует альтернативное мнение о характере изменения гранулометрического состава песков при взаимодействии с нефтепродуктами. Так, в исследованиях [53] экспериментально установлено, что при добавлении в грунт 10% нефти наблюдается диспергирование, то есть расщепление частиц песка на более мелкие фракции. Диспергирование песчаного грунта также зафиксировано в работах [31,17], где в качестве загрязняющего нефтепродукта использовался мазут и бензин.

Авторы [90,77] указывают на подверженность глинистых частиц процессам коагуляции при загрязнении машинным маслом. В исследовании

[77], в качестве испытуемых образцов принимались супесь и суглинок с переменным содержанием песчаной пылеватой и глинистой фракций. В качестве нефтепродукта использовалось моторное масло. Результаты исследований показали, что процессам агрегирования и диспергирования подвержены все фракции, однако наличие и интенсивность того или иного процесса обусловлены концентрацией нефтепродукта и начальным размером частиц. (рисунок 1.4).

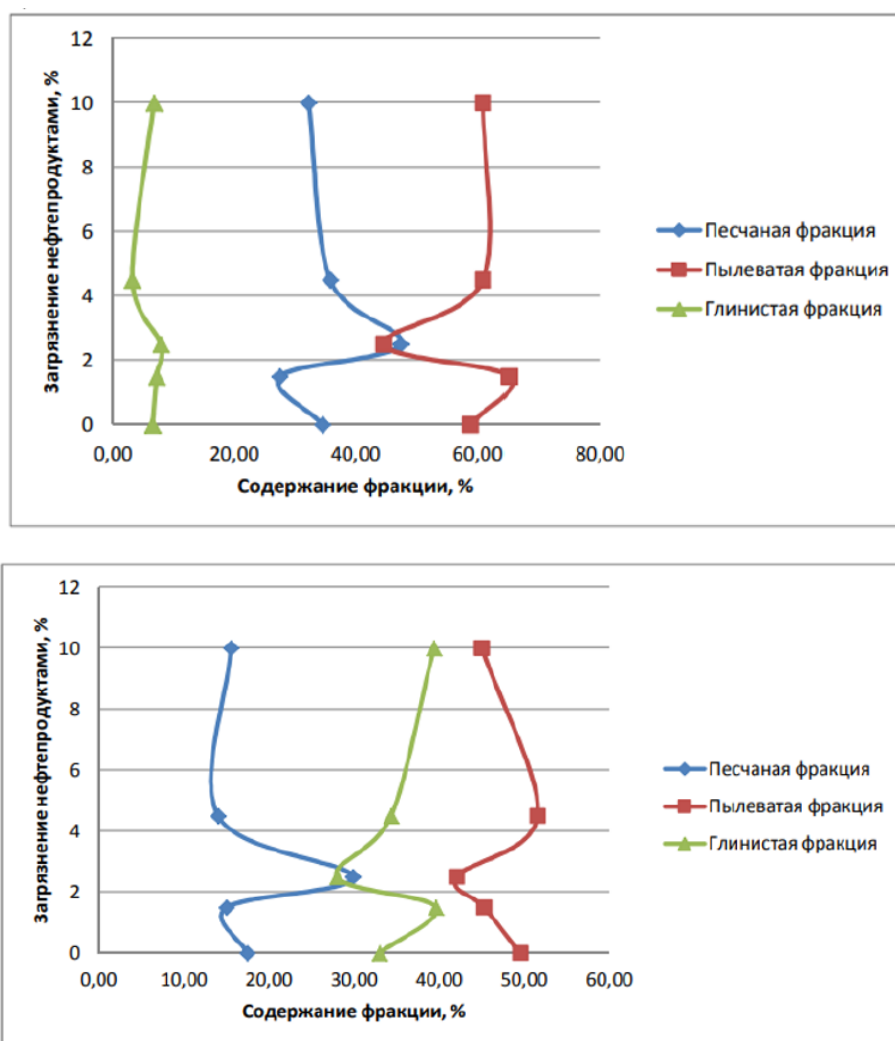


Рисунок 1.4. Изменение гранулометрического состава грунта при загрязнении моторным маслом – а) суглинка; б) супеси [77]

В то же время Rajab M. Abousnina [92] пришел к выводу, что песчаные частицы диспергируют при малых (0,5%) концентрациях, но агрегируют при увеличении концентрации нефтепродукта.

В исследовании [13] авторы констатируют агрегирование пылевой, мелкой, средней и крупной фракций песчаного грунта при загрязнении сырой нефтью (рисунок 1.5). Исследования Дашко Р.Э. и Ланге И.Ю. [32, 47] показали, что нефтяное загрязнение приводит к агрегированию воздушно-сухих песков и диспергированию водонасыщенных. В ряде исследований в области почвоведения установлено, что вокруг частицы грунта, вне зоны аэрации, при воздействии нефтепродукта образуется слой из бактериальных клеток, толщина которого варьируется в диапазоне от 0,1 до 0,5 мкм [103, 104]. Однако для песчаных грунтов, расположенных в зоне аэрации, вклад микробиологической деятельности незначителен, так как основным фактором, влияющим на преобразование нефтепродуктов в данной зоне, является окисление поступающим кислородом, сопровождающееся сорбцией нефтепродукта на поверхности частиц [47].

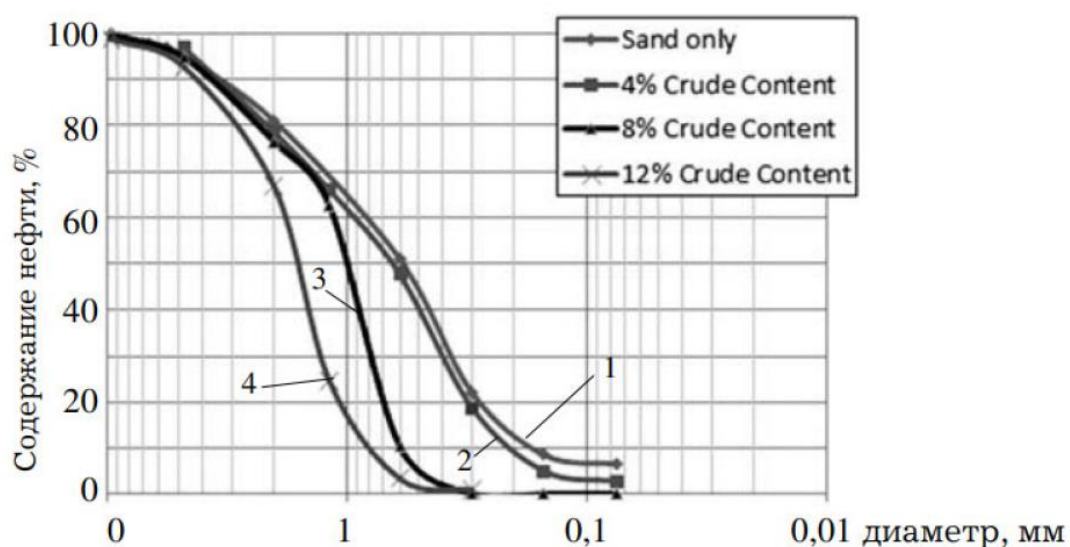


Рисунок 1.5. Гранулометрический состав песка с различным содержанием нефтяного загрязнения: 1- чистый песок, 2 – загрязнение 4%, 3- загрязнение 8%, 4 - загрязнение 12% [13]

Вывод о подверженности песчано-глинистых грунтов (супеси и суглинка) процессам диспергирования также сделан в исследовании [17], где выполнялись полевые исследования грунтов на территории автозаправочных станций с целью их реконструкции в г. Томске.

Анализ изменения гранулометрического состава песчаных грунтов при взаимодействии с нефтепродуктами представлен в таблице 1.1 с более подробным описанием исследуемой фракции песка, вида НП и характера изменения гранулометрического состава грунта.

Таблица 1.1

Анализ результатов исследований изменения гранулометрического состава песчаных грунтов при взаимодействии с НП

Авторы	НП	Фракция песчаного грунта			
		Глинистая	Пылеватая	Мелкая	Средняя
Ядзинская М.Р. [77]	Мотор. масло	Агрегирование при малых концентрациях НП, далее диспергирование	Агрегирование при малых концентрациях НП, далее диспергирование	Диспергирование при малых концентрациях, далее агрегирование	Диспергирование при малых концентрациях, далее агрегирование
Середин В.В. [78]	Мотор. масло	Агрегирование			
Ланге И.Ю. [47]	Соляр. масло				Агрегирование
Ланге И.Ю., Дашко Р.Э. [32]	Соляр. масло				Диспергирование песчаных грунтов в водонасыщенном состоянии
Шевченко Л.В., Ширшова И.В. [75]	Нефть	Агрегирование, диспергирование			
Аль-Адили [13]	Нефть		Агрегирование	Агрегирование	Агрегирование
Namid Rajabi [85]	Нефть			Агрегирование	

Rajab Aboushina [92]	Нефть			Диспергирование, после-агрегирование (с ростом концентрации)	
Бракоренко Н.Н., Емельянова Т.Я. [17]	Бензин			Диспергирование	Диспергирование

Коэффициент фильтрации

Анализ литературы об изменении коэффициента фильтрации песчаных грунтов, загрязненных НП, показал, что большинство авторов констатируют снижение коэффициента фильтрации с увеличением концентрации нефтепродукта в составе испытуемых образцов. Результаты лабораторных испытаний Akinwumi, Al-Sanad и др. [81, 98, 79,80,87,94,96] сведены на рисунке 1.6 [93].

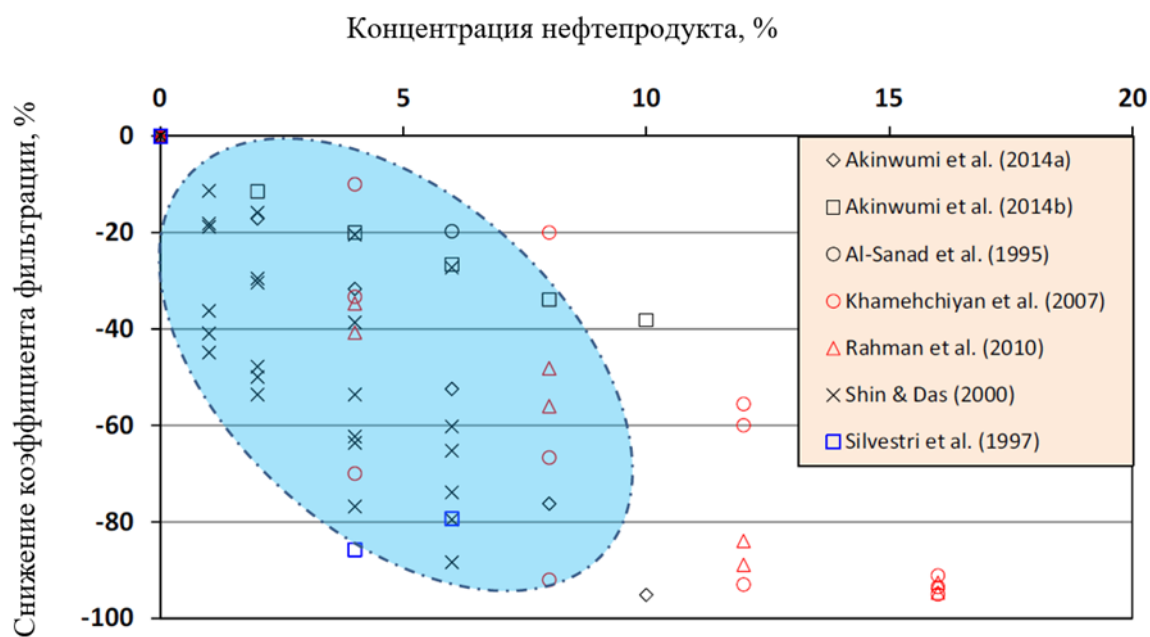


Рисунок 1.6. Зависимость коэффициента фильтрации песчаного грунта от концентрации НП [93]

В то же время, авторы исследования [32] пришли к выводу, что коэффициент фильтрации водонасыщенного песка снижается с ростом концентрации солярового масла, а коэффициент фильтрации песка в

воздушно-сухом состоянии увеличивается (рисунок 1.8). Принимая во внимание полученные результаты можно предположить, что изменение коэффициента фильтрации зависит от начальной влажности грунта, а именно от характера взаимодействия несмешивающихся жидкостей при многофазной фильтрации (нефтепродукт + вода). Данный вопрос в настоящее время является актуальным для специалистов в области физики пласта, так как уточнение и оптимизация существующих теоретических решений многофазной фильтрации позволят увеличить нефтеотдачу коллекторов (нефтеносных пластов).

В экспериментах [35] проводилось исследование скорости инфильтрации керосина и дизельного топлива в мелкие пески. Используемые в рамках эксперимента фильтрующие жидкости – керосин и дизельное топливо – имели практически одинаковые значения плотности, однако скорость инфильтрации дизельного топлива оказалась ниже, чем керосина. На основании полученных результатов был сделан вывод о зависимости коэффициента фильтрации нефтепродукта через незагрязненный грунт от вязкости фильтрующей жидкости, а именно – скорость инфильтрации нефтепродукта падает по мере возрастания вязкости фильтрующей жидкости. Стоит отметить, что в рамках работы [13] проводились также эксперименты по исследованию фильтрации воды через пески, предварительно загрязненные керосином и дизельным топливом. Скорость инфильтрации воды через незагрязненный грунт оказалась выше, чем через загрязненные образцы.

К противоположным выводам пришли Prasanna G. и Shimna Manoharan в работе [90], где зафиксировали обратную зависимость между коэффициентом фильтрации и концентрацией нефтепродукта в песчаном грунте. Авторы связывают снижение скорости фильтрации по мере возрастания концентрации загрязняющего песок нефтепродукта с частичным заполнением порового пространства нефтепродуктом, что снижает объем, который потенциально мог быть заполнен грунтовыми водами. Результаты, экспериментально

полученные Khamehchiyan M. [87], согласуются с выводами [90] о снижении скорости фильтрации воды в песке, загрязненном нефтепродуктом, по мере увеличения концентрации, что связано со снижением объема пор вследствие заземления песчаными частицами нефти.

В то же время, в исследовании [87] установлено, что снижение коэффициента фильтрации по мере увеличения концентрации нефтепродукта невелико даже при концентрации $C = 16\%$. Полученные зависимости представлены на рисунке 1.7.

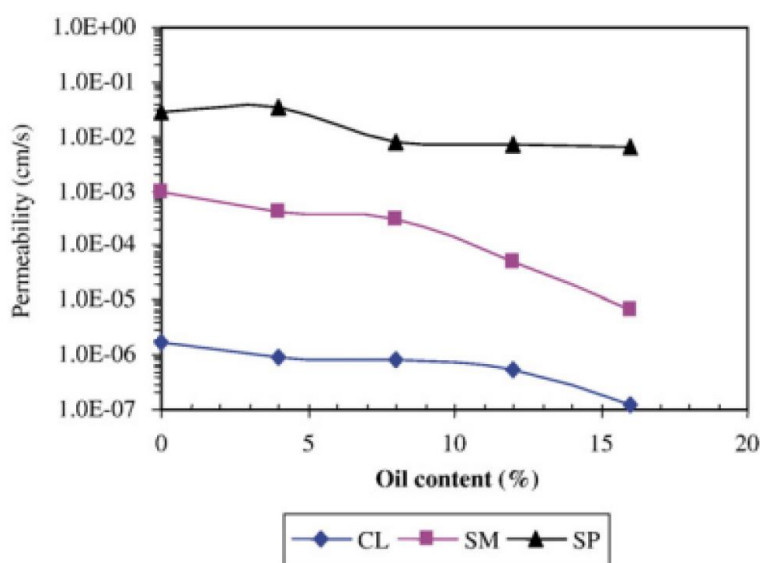


Рисунок 1.7. Влияние концентрации нефтяного загрязнения на коэффициент фильтрации образцов грунта (CL (lean clay) – тугопластичная глина, SM (silty sand) – пылеватый песок, SP (poorly graded sand) – разнородный песок) [87]

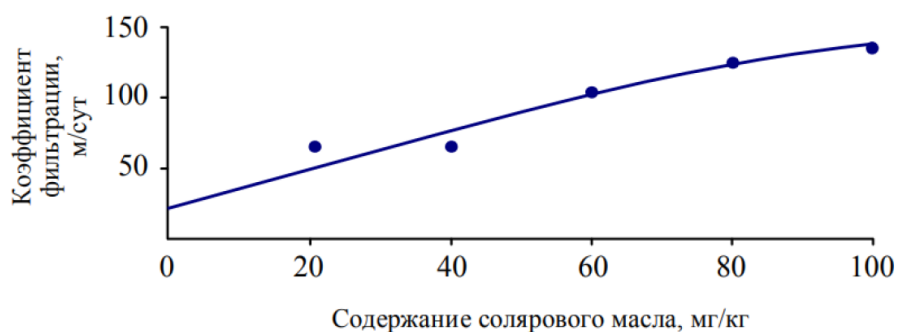


Рисунок 1.8. Изменение коэффициента фильтрации песков с различным содержанием солярового масла (при градиенте напора $I = 3$) [32]

К выводу о возрастании коэффициента фильтрации для песка, загрязненного нефтепродуктом (моторным маслом), пришли также Красильников П.А., Середин В.В., Леонович М.Ф. [44].

Особенности процесса инфильтрации нефтепродукта в грунтовый массив описан в исследовании Усина В.В. [68]. Перемещение нефтепродукта при проливе происходит в двух направлениях – горизонтальном по поверхности и вертикальном в толщу грунта. Вертикальное распространение нефтепродукта может быть замедлено в результате снижения концентрации нефтепродукта в грунте, наличия в грунтовом массиве нефтенепроницаемого слоя и достижения уровня подземных вод. Автором отмечается снижение скорости инфильтрации нефтепродуктов при переходе исследуемых фракций от более крупных к более мелким. Также отмечается зависимость скорости инфильтрации от вида нефтепродукта - скорость инфильтрации падает в ряду: бензин, дизельное топливо, керосин, нефть. Выделяемые Усиным В.В. факторы, влияющие на скорость инфильтрации представлены на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9. Факторы, влияющие на скорость просачивания (инфильтрации) нефтепродуктов в песчаные грунты [68]

Анализ изменения коэффициента фильтрации песчаных грунтов представлен в таблице 1.2 с более подробным описанием исследуемой фракции песка, вида НП и характера изменения коэффициента фильтрации песчаного грунта.

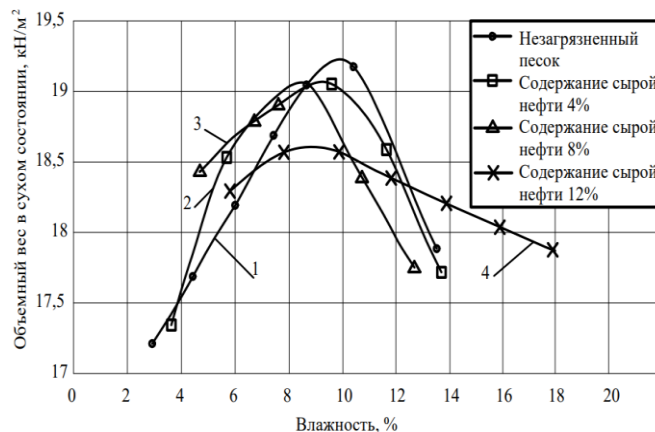
Анализ результатов исследований изменения коэффициента фильтрации песчаных грунтов при взаимодействии с НП

Автор	Нефтепродукт	Грунт	Изменение коэффициента фильтрации
М. Khamehchiyan [87]	Нефть	Пылеватый песок	Снизился
		Разнозернистый песок	Снизился
Дашко Р.Э., Ланге И.Ю. [32]	Соляровое масло	Песок средней крупности	Увеличился
Красильников П.А., Середин В.В., Леонович М.Ф. [44]	Моторное масло	Песок мелкий	Увеличился
		Песок средней крупности	Увеличился
Усин В.В. [68]	Бензин А-80	Гравий	Снизился
		Крупный песок	Снизился
		Песок средней крупности	Снизился
		Мелкий песок	Снизился
		Ил	Снизился
	Дизельное топливо	Гравий	Снизился
		Крупный песок	Снизился
		Песок средней крупности	Снизился
		Мелкий песок	Снизился
		Ил	Снизился
	Керосин	Гравий	Снизился
		Крупный песок	Снизился
		Песок средней крупности	Снизился
		Мелкий песок	Снизился
		Ил	Снизился
	Нефть	Гравий	Снизился
		Крупный песок	Снизился
		Песок средней крупности	Снизился
		Мелкий песок	Снизился
		Ил	Снизился
Кардава М.Г. [35]	Керосин	Песок мелкий	Снизился
	Дизельное топливо		Снизился

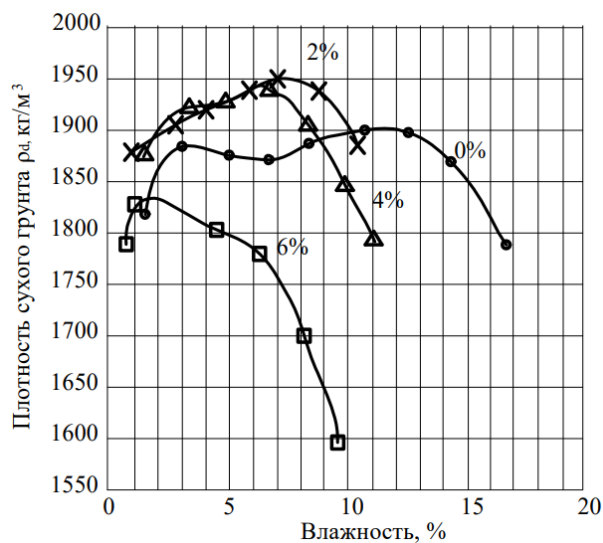
Оптимальная влажность грунта

Наличие нефти и нефтепродуктов в составе песчаного грунта также приводит к изменению оптимальной влажности, при которой обеспечивается максимальная плотность грунта. Результаты лабораторных исследований [17,81,13,87,95,88] свидетельствуют о снижении объема влаги, необходимой для достижения максимальной плотности, при увеличении процентного содержания нефти и нефтепродуктов в испытуемых образцах (рисунок 1.10). Полученные результаты обусловлены полным или частичным заполнением порового пространства нефтепродуктом, что приводит грунт в состояние рыхлой несвязной породы в сравнении с условно чистым песчаным грунтом. Необходимо отметить высокую сходимость результатов исследований [17,81,13,87,95,88], где величина оптимальной влажности снизилась в среднем на 5%.

а)



б)



в)

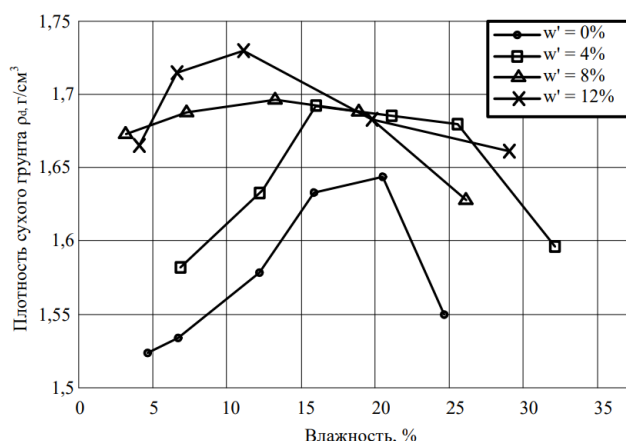


Рисунок 1.10. Зависимость плотности от влажности грунта при различных процентных содержаниях сырой нефти: а — по источнику [13]; б — [81]; в — [88]

Плотность скелета

Плотность скелета грунта связана с его влажностью следующей зависимостью:

$$\rho_d = \rho / (1 + w),$$

где ρ — плотность грунта; w — влажность грунта.

Из формулы следует, что при увеличении влажности грунта плотность его скелета будет уменьшаться, после того как будет достигнуто значение максимальной плотности грунта при его оптимальной влажности. Данная зависимость подтверждается лабораторными испытаниями отечественных и зарубежных авторов [81, 13]. В исследовании [32] отмечается уменьшение плотности скелета песчаного грунта от 1,65 до 1,3 г/см³ при увеличении содержания солярового масла от 0 до 100 мг/кг в предельно плотном сложении и от 1,4 до 1 г/см³ при увеличении содержания солярового масла от 0 до 100 мг/кг в рыхлом сложении. Уменьшение плотности скелета грунта может быть вызвано уменьшением пористости грунта из-за агрегирования частиц в результате воздействия нефтепродукта.

Следует отметить, что увеличение процентного содержания нефтепродукта в составе грунта увеличивает влажность не только песчаных, но и глинистых грунтов [76].

Коэффициент пористости

Как отмечалось ранее, наличие нефти и нефтепродуктов в составе песчаного грунта может приводить к агрегации его частиц и, как следствие, к изменению гранулометрического состава песка, а именно — к образованию более крупных частиц без изменения коэффициента неоднородности. Ввиду образования агрегатов повышается пористость, что приводит к увеличению влагоемкости (способности грунта вмещать воду, но не удерживать) [38].

Автором [86] были проведены исследования зависимости коэффициента пористости песков при разном процентном содержании нефтепродукта в образце грунта нарушенного сложения под нагрузкой различной интенсивности. Результаты исследований представлены в таблице 1.3. Значение коэффициента пористости увеличилось от 0,33 до 0,35 при увеличении концентрации нефтепродукта от 0 до 2 %, далее по мере увеличения концентрации от 2 до 6% — коэффициент пористости снизился до 0,23, при концентрации нефтепродукта 8 % — вновь увеличился до 0,37. Следует отметить, что изменение коэффициента пористости в рамках данного исследования незначительно (менее 9 %), не имеет общей закономерности и находится в пределах погрешности измерений [38].

Таблица 1.3

Коэффициент пористости песка при разном процентном содержании нефтепродукта и различной степени нагружения [86]

Давление, кН/м ²	Содержание нефтепродукта, %				
	0	2	4	6	8
50	0,335741	0,360884	0,329049	0,237694	0,377693
100	0,335562	0,360767	0,328749	0,237043	0,376161
200	0,33418	0,358912	0,327805	0,236807	0,374907
400	0,333067	0,3565	0,3565	0,235993	0,374235
800	0,332308	0,352875	0,324608	0,234342	0,37256
1600	0,332141	0,352423	0,322818	0,233808	0,372446

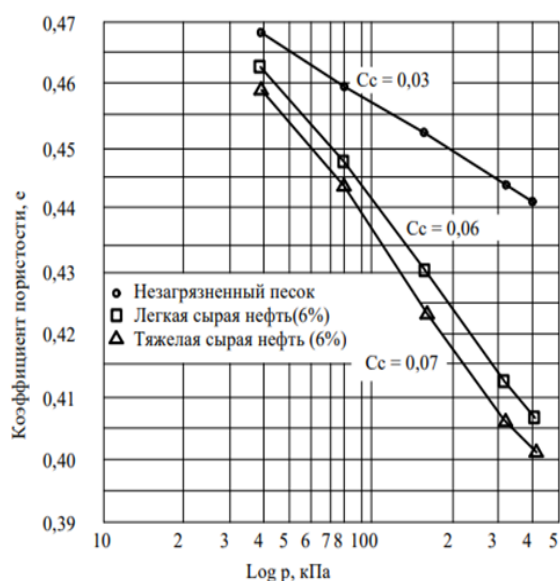


Рисунок 1.11. Зависимость коэффициента пористости грунта от приложенной нагрузки [86]

В исследованиях [81] изменение коэффициента пористости определялось с использованием разной по плотности сырой нефти при ее одинаковом процентном содержании в образце песчаного грунта. Испытания показали снижение пористости от 0,47 до 0,40 вне зависимости от вида загрязнителя в сравнении с образцом грунта, не загрязненным нефтью (рисунок 1.11).

Следует отметить изменение (более 10 %) коэффициента пористости в рамках данных исследований в сравнении с результатами исследований [47]. Однако степень снижения коэффициента пористости при увеличении нагрузки зависит от начального коэффициента пористости испытываемых образцов и плотности их сложения. В исследованиях [86] и [81] начальные коэффициенты пористости отличались более чем на 20 %, влажности — более чем на 10 %.

При лабораторных исследованиях [32] также наблюдается незначительное снижение пористости песчаного грунта при его загрязнении соляровым маслом вне зависимости от плотности сложения испытываемых образцов.

1.3. Изменение прочностных и деформационных характеристик песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами

Удельное сцепление.

Анализ отечественной и зарубежной литературы по заданной теме показал, что удельное сцепление песчаных грунтов может увеличиваться по

мере увеличения концентрации нефтепродукта в составе грунта или увеличиваться до определенного значения и далее снижаться по неизученной зависимости.

Авторы исследования [13] зафиксировали увеличение удельного сцепления с 8 до 23 кПа при увеличении концентрации нефтепродукта от 0 до 16% (таблица 1.4). Схожие результаты были получены в исследовании [102].

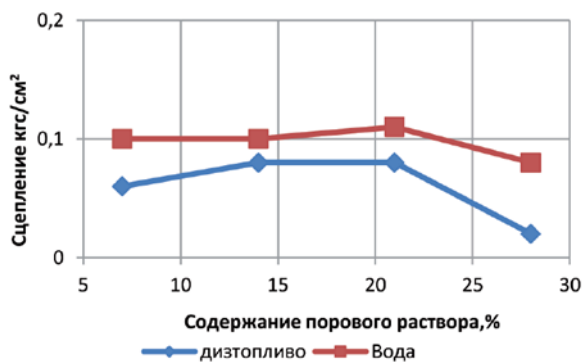
Таблица 1.4

Характеристики образцов песка с различным процентным содержанием нефти [13]

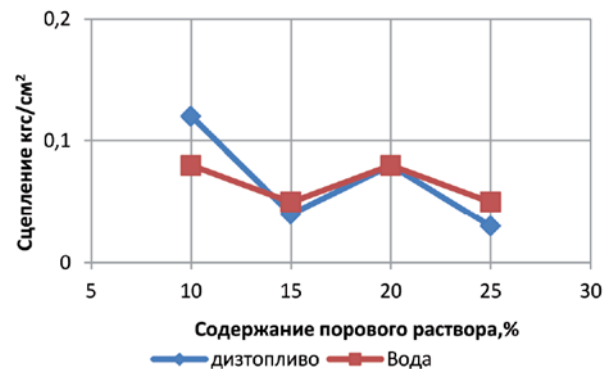
Содержание нефти в песке, %	Сцепление с	φ°	Оптимальная влажность, %
0	8	37,8	10,2
4	12	36,2	9,5
8	17	33,5	8,5
12	19	31,4	8,2
16	23	29,7	8

К противоположному результату пришли авторы исследования [56], в рамках которого определялось удельное сцепление песков различной крупности методом одноплоскостного среза (рисунок 1.12)

а)



б)



в)

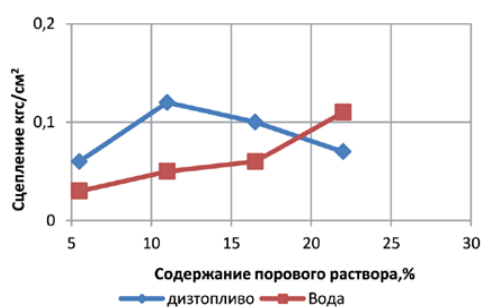


Рисунок 1.12. Изменение сцепления (с) в зависимости от влажности и содержания дизельного топлива (а) в мелких песках; (б) в песках средней крупности; (с) в крупных песках [56]

Из полученных результатов можно сделать вывод о том, что удельное сцепление мелких и крупных песков при содержании дизельного топлива от 7 до 13% увеличивается, далее наблюдается снижение сцепления при увеличении концентрации нефтепродукта. Для песков средней крупности изменение сцепления не имеет общей закономерности и во многом величина удельного сцепления грунта зависит от начальной крупности песка.

Данное предположение также нашло подтверждение в исследованиях [36], в рамках которого было проведено более 90 испытаний на сдвиг песков различной крупности, влажности и степени загрязнения. Авторами установлено, с увеличением процентного содержания нефтепродукта сцепление увеличивается. Для песков средней крупности при объеме машинного масла в испытуемом образце 10 мг сцепление составило $c = 8$ кПа, а при 40 мг - $c = 10$ кПа. Для разнозернистых песков наблюдались те же закономерности, что и для песков средней крупности.

Следует отметить, что в ряде работ [17, 47] указывается на увеличение содержания пылевой фракции при взаимодействии грунта с нефтепродуктами, что подтверждается результатами инженерно-геологических изысканий на объектах с проливами нефти [31].

С учетом этого, уместно предположить, что увеличение пылевой фракции сопровождается увеличением удельного сцепления до достижения определенного содержания нефтепродукта в составе грунта, после достижения

которого начинается обратный процесс, в рамках которого содержание пылеватой фракции постоянно, а сцепление уменьшается по неизученной зависимости.

Угол внутреннего трения

Авторы исследования [36] определяли угол внутреннего трения песков средней крупности при их загрязнении машинным маслом и пришли к выводу, что с увеличением концентрации нефтепродукта угол внутреннего трения уменьшается. При концентрации машинного масла 10 мг угол трения составил $24,5^\circ$, а при 40 мг – 22° . Для разнозернистого песка при содержании машинного масла 20 мг и 30 мг наблюдается та же закономерность, однако конкретных значений угла внутреннего трения авторы не приводят.

Исследования [32,13] также констатируют снижение трения между частицами песка по мере увеличения процентного содержания нефти (табл.4).

Однако, к противоположным результатам пришли авторы [56]. Например, у мелких песков было зафиксировано увеличение угла внутреннего трения на 5° при повышении содержания порового раствора с 21 до 28%, при содержании от 14 до 21% - угол внутреннего трения не изменялся, при содержании от 7 до 14% - снижение угла внутреннего трения было незначительным (примерно на 2°).

В Кувейтском университете было проведено комплексное исследование характера и степени изменения прочностных характеристик песчаных грунтов, загрязненных разными видами нефтепродуктов [81]. В качестве изменяемых параметров были приняты вид нефтепродукта (легкая и тяжелая нефти, бензин), концентрация нефти и нефтепродуктов (4%, 6%) и плотность сложения образцов. Графики полученных зависимостей представлены в осях « φ » и « D_r », где D_r – это относительная плотность песков нарушенного сложения. В российской инженерной практике аналогом D_r является показатель (индекс) плотности I_d (рисунок 1.13).

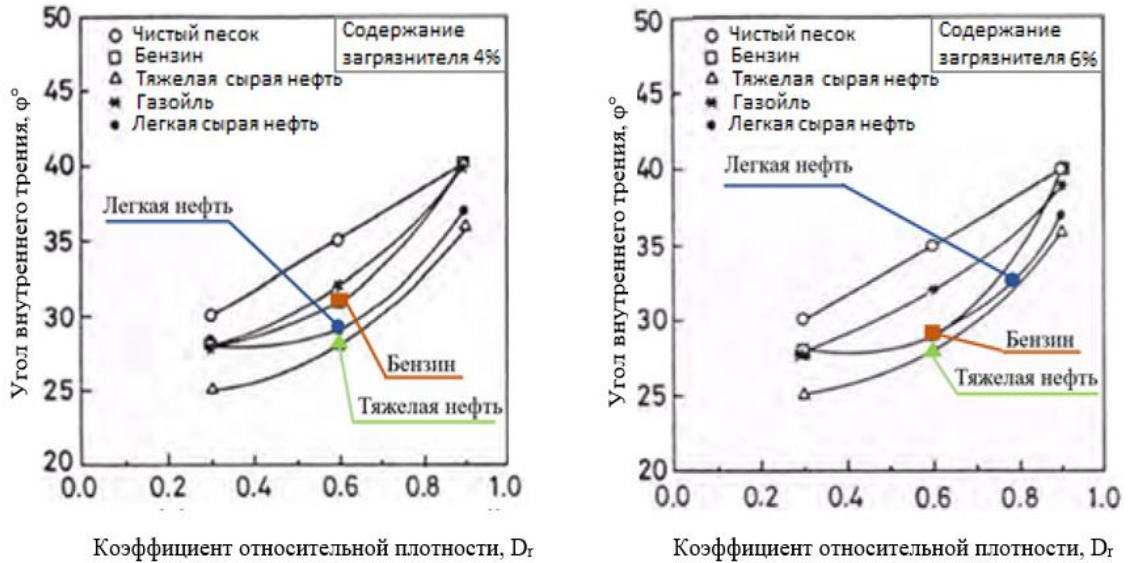


Рисунок 1.13. Изменение угла внутреннего трения в зависимости от коэффициента относительной плотности песчаного грунта и содержания нефтепродукта (D_r (relative density) – отношение плотности песка к плотности загрязняющего вещества) [81]

В результатах зафиксировано снижение угла внутреннего трения при увеличении процентного содержания нефтепродукта на 2% (от 4% до 6%), при этом максимальное снижение трения зафиксировано у образцов, загрязненных бензином (при $D_r=0.6$ $\varphi=30^\circ$ и 27° при 4% и 6 %-ом содержании нефтепродукта соответственно). Отметим, что небольшое снижение трения в рамках данного исследования может быть обусловлено небольшим увеличением концентрации.

В то же время, значительное снижение угла внутреннего трения отметили в своих исследованиях E.C. Shin и J.B. Lee [97]. Испытывались образцы песка средней крупности нарушенного сложения при содержании сырой нефти 1%, 2%, 3%, 4% при $D_r=0,75$ и $0,5$. В результате, при увеличении содержания нефтепродукта менее, чем на 2% угол внутреннего трения снизился от 42° до 35° при $D_r=0,75$ и от 35° до 29° при $D_r=0,5$ (рисунок 1.14). Авторы заключили, что 4%-я концентрация нефтепродукта приводит к снижению угла внутреннего трения на 25%. Результаты данного исследования противоречат результатам исследований [81], где при увеличении концентрации всего на 2% угол внутреннего трения изменился не более чем на 3° .

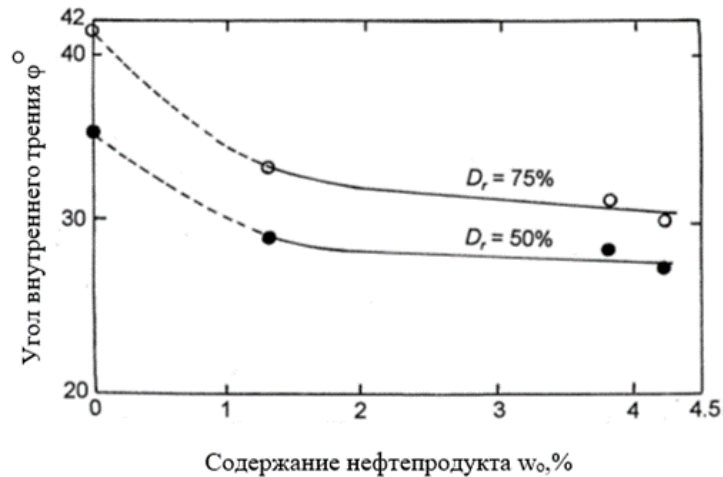


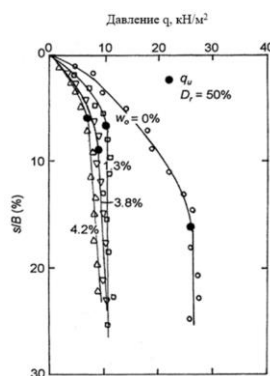
Рисунок 1.14. График зависимости угла внутреннего трения от процентного содержания нефтепродукта в составе песчаного грунта при $D_r=0,75$ и 0.5 [97]

Модуль деформации

В исследовании [97] выполнялись модельные испытания столбчатого фундамента на песчаном основании, загрязненном нефтью (рисунок 1.15). Фундамент был смоделирован в виде алюминиевой пластины размером 75×3175 мм.

Испытания выполнялись в боксе, боковые стенки которого были жестко зафиксированы с целью снижения горизонтальных деформаций при уплотнении песка. Уплотнение песка сопровождалось увеличением процентного содержания нефти. Далее модель фундамента помещалась в центре бокса, а давление по подошве фундамента имитировалось с помощью поршня с гидравлическим приводом.

а)



б)

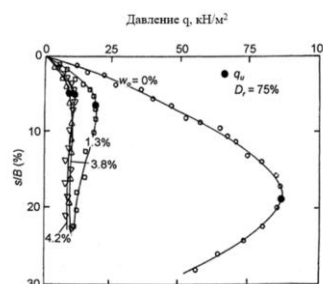


Рисунок 1.15. График зависимости давления q от величины S/B (S - осадка, B -ширина фундамента) при коэффициенте относительного уплотнения (а) $D_r=50\%$; (б) $D_r=75\%$ [97]

Результаты показали, что модуль деформации загрязненного грунта уменьшился как при первичном его загрязнении на 1,3 %, так и при последующем увеличении концентрации до 4,2%. Также следует отметить, что с увеличением процентного содержания нефтепродукта предельное давление q_u уменьшается от с 25 кН/м² до 6 кН/м² при увеличении концентрации нефтепродукта с 0% до 4,2% (при $D_r=0,5$) и с 88 кН/м² до 6 кН/м² при $D_r=0.75$.

Исследования [13] показали, что пески, загрязненные в 8, 12 и 16 % -ом соотношениях S/b дают большую осадку на 24, 14,5 и 60% соответственно. В то же время, при 4%-ом содержании нефтепродукта осадка уменьшилась примерно на 28%. Отсюда можно сделать вывод о том, что невысокая концентрация нефтепродукта в составе грунта может приводить к его упрочнению и увеличению деформационных характеристик.

Отметим, что укрепление пылеватых песков маловязкой нефтью с добавлением цемента или извести, как новая технология закрепления грунтов, появилась примерно в 1970-ых гг. и использовалась, преимущественно, в дорожном строительстве, однако не получила широкого применения в виду необоснованности ее использования с точки зрения экологической безопасности [20-24,59,60,64,65].

1.4. Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования

На основании анализа научных исследований установлено:

1) При взаимодействии песчаного грунта с нефтью и нефтепродуктами, происходят изменения гранулометрического состава грунта, обусловленные процессами агрегирования и/или диспергирования минеральных частиц. Наличие обозначенных процессов и степень их влияния на гранулометрический состав зависит от множества факторов, таких как начальная крупность грунта, минералогический состав, наличие примесей, вид нефтепродукта, его химический состав, концентрация и т.д.

2) Наличие нефти и нефтепродуктов в грунте приводит к снижению коэффициента фильтрации в виду сужения поровых каналов и уменьшения количества сообщающихся пор, через которые возможно течение свободной поровой жидкости. Однако в ряде работ отмечается увеличение коэффициента фильтрации, что может быть обусловлено наличием примеси, например, в виде гипса – растворимого в воде минерала.

3) Образование маслянистых оболочек из нефти и нефтепродуктов приводит к появлению эффекта «проскальзывания» частиц относительно друг друга, из-за чего снижается трения между частицами, и, следовательно угол внутреннего трения уменьшается, тем не менее характер и степень изменения угла внутреннего трения во многом зависят от крупности песчаного грунта, вида нефтепродукта, его концентрации.

4) Снижение трения между частицами приводит к увеличению сжимаемости и, следовательно, к снижению модуля деформации. В то же время в дорожном строительстве существуют методы, позволяющие повысить деформационные свойства грунта с добавлением нефти и вяжущих, таких как известь или цемент.

5) Удельное сцепление песчаных грунтов может увеличиваться по мере увеличения концентрации нефтепродукта в составе грунта или увеличиваться до определенного значения и далее снижаться по неизученной зависимости.

Из результатов проведенного обзора следует, что выполненные ранее исследования не дают возможности определенно обозначить общие закономерности изменения физико-механических свойств песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами. При этом большинство работ по обозначенной теме направлены на оценку возможности использования нефтезагрязненных грунтов в народно-хозяйственных целях, а также на решение геоэкологических задач, в то время как вопросы, связанные с особенностями их строительных свойств для проектирования фундаментов на таких грунтах, остаются малоизученными.

На основе проведенного анализа сформулированы цель и задачи исследования.

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.

ГЛАВА 2. ЛАБОРАТОРНЫЕ И МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КЛАССИФИКАЦИОННЫХ И ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ НЕФТЬЮ И НЕФТЕПРОДУКТАМИ

2.1. Исследование изменения гранулометрического состава песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами

2.1.1. Методика проведения лабораторных исследований изменения гранулометрического состава поли- и -монофракционных песков

Исследование изменения гранулометрического состава песчаных грунтов при взаимодействии с нефтью и нефтепродуктами проводилось с целью:

- определения характера и степени изменения гранулометрического состава песчаного грунта при взаимодействии с нефть и нефтепродуктами;
- оценки возможности перехода песчаного грунта в более крупные или более мелкие песчаные разности.

На первом этапе в качестве испытуемого грунта использовались *монофракционные* навески крупного песка, средней крупности и мелкого. На втором этапе исследования проводились на предварительно просеянных навесках *полифракционного* крупного песка, средней крупности, мелкого и пылеватого, скомбинированные по таблице 2.1.

В качестве нефтепродукта использовались:

- тяжелая сургутская нефть;
- бензин А-95;
- летнее дизельное топливо.

Концентрация нефтепродукта $C = 1\%$ задавалась по массе навески (1 г нефтепродукта на 100 г грунта). Лабораторные испытания проводились ситовым методом в соответствии с ГОСТ 12536 – 2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава». Паспорта нефтепродуктов и сертификат соответствия строительного песка представлены в Приложении №1.

Таблица 2.1

Программа подготовки песчаных полифракционных навесок для определения характера и степени изменения гранулометрического состава грунта при взаимодействии с нефтепродуктами

№ п/п	Разновидность песка по гран. составу	Масса фракции в составе навески, г				Нефтепродукт
		Крупная	Средняя	Мелкая	Пылеватая	
1	Крупный (монофракционный)	100	-	-	-	Бензин А-95, 1г
2						Дизельное топливо, 1г
3						Тяжелая нефть, 1г
4	Крупный (полифракционный)	76	8	8	8	Бензин А95, 1г
5						Дизельное топливо, 1г
6						Тяжелая нефть, 1г
7	Средней крупности (монофракционный)	-	100	-	-	Бензин А-95, 1г
8						Дизельное топливо, 1г
9						Тяжелая нефть, 1г
10	Средней крупности (полифракционный)	8	76	8	8	Бензин А-95, 1г
11						Дизельное топливо, 1г
12						Тяжелая нефть, 1г
13	Мелкий (монофракционный)	-	-	100	-	Бензин А-95, 1г
14						Дизельное топливо, 1г
15						Тяжелая нефть, 1г
16	Мелкий (полифракционный)	8	8	76	8	Бензин А95, 1г
17						Дизельное топливо, 1г
18						Тяжелая нефть, 1г
19	Пылеватый (Монофракционный)	-	-	-	100	Бензин А95, 1г
20						Дизельное топливо, 1г
21						Тяжелая нефть, 1г

2.1.2. Результаты лабораторных исследований

Этап 1. Монофракционный песчаный грунт

Результаты лабораторных испытаний по определению характера и степени изменения гранулометрического состава монофракционного песчаного грунта представлены в таблице 2.2. Образцы монофракционного песка представлены на рисунке 2.1.

Результаты лабораторных испытаний по определению характера и степени изменения гранулометрического состава монофракционного песчаного грунта

№ п/п	Нефтепродукт	Характер и степень изменения (%) гранулометрического состава песчаных образцов после загрязнения по отношению к массе чистой фракции							
		Крупная		Средняя		Мелкая		Пылеватая	
		До загряз.	После загряз.	До загряз.	После загряз.	До загряз.	После загряз.	До загряз.	После загряз.
		Степень изменения		Степень изменения		Степень изменения		Степень изменения	
Песок крупный (монофракционный)									
1	Бензин А-95	100,00 г	89,75 г	0,00 г	10,25 г	-		-	
		↓ 10,25 г (10%)		↑ 10,25 г					
2	Дизельное топливо	100,00 г	93,50 г	0,00 г	6,50 г	-		-	
		↓ 6,5 г (7%)		↑ 6,50 г					
3	Тяжелая нефть	100,00 г	94,90 г	0,00 г	5,10 г	-		-	
		↓ 5,10 г (5%)		↑ 5,10 г					
Песок средней крупности (монофракционный)									
1	Бензин А-95	0,00 г	0,65 г	100,00 г	91,65 г	0,00 г	7,70 г	-	
		↑ 0,65 г		↓ 8,35 г (8%)		↑ 7,70 г			
2	Дизельное топливо	0,00 г	3,35 г	100,00 г	89,50 г	0,00 г	7,15 г	-	
		↑ 3,35 г		↓ 10,50 (11%)		↑ 7,15 г			
3	Тяжелая нефть	-		100,00 г	96,50 г	0,00 г	3,50 г	-	
				↓ 3,50 г (4%)		↑ 3,50 г			
Песок мелкий (монофракционный)									
1	Бензин А-95	-		0,00 г	0,15 г	100,00 г	93,80 г	0,00 г	6,05 г
				↑ 0,15 г		↓ 6,20 г (6%)		↑ 6,05 г	
2	Дизельное топливо	-		0,00 г	3,05 г	100,00 г	91,75 г	0,00 г	5,20 г
				↑ 3,05 г		↓ 8,25 г (8%)		↑ 5,20 г	
3	Тяжелая нефть	-		0,00 г	4,05 г	100,00 г	90,10 г	0,00 г	5,85 г
				↑ 4,05 г		↓ 9,90 г (10%)		↑ 5,85 г	
Песок пылеватый (монофракционный)									
1	Бензин А-95	-		-		0,00 г	8,30 г	100,00 г	91,70 г
						↑ 8,30 г		↓ 8,30 г (8%)	
2	Дизельное топливо	-		-		0,00 г	15,80 г	100,00 г	84,20 г
						↑ 15,80 г		↓ 15,80 г (16%)	
3	Тяжелая нефть	-		-		0,00 г	19,20 г	100,00 г	80,80 г
						↑ 19,20 г		↓ 19,20 г (19%)	

Примечание:

- снижение массы фракции;

- увеличение массы фракции.

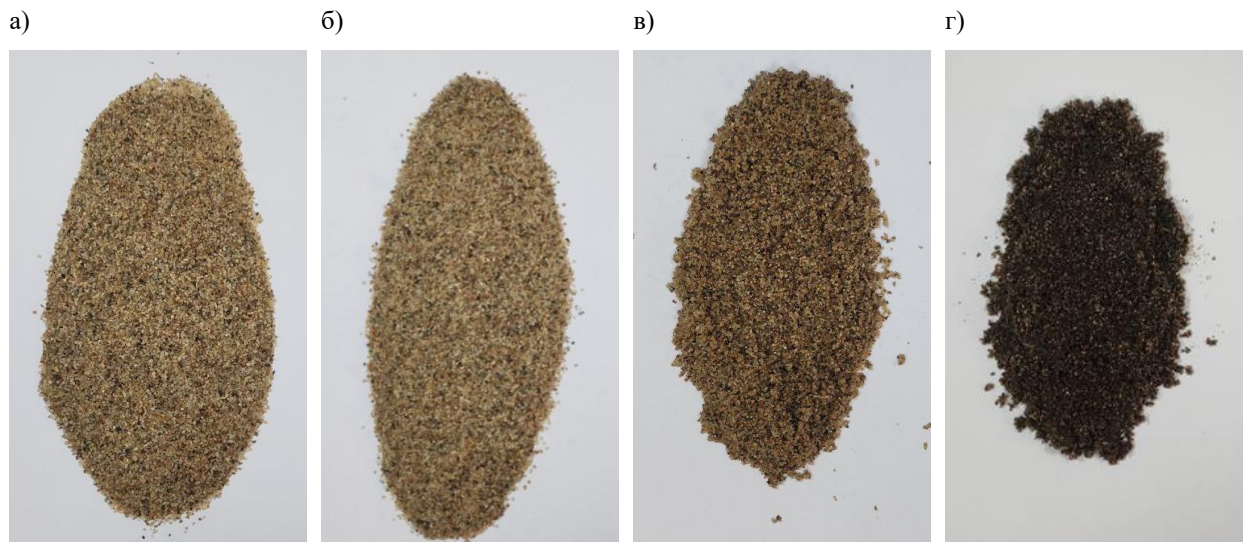


Рисунок 2.1. Песок крупный монофракционный, а – условно чистый, б – загрязненный бензином А-95, в – загрязненный дизельным топливом, г – загрязненный тяжелой нефтью

Крупный песок:

Содержание крупной фракции снижается на 5-10% (диспергирование). Наибольшее снижение массы крупной фракции наблюдается при загрязнении бензином (10%).

Песок средней крупности:

Зафиксировано агрегирование частиц при загрязнении бензином (от 0 г до 0,65 г) и дизельным топливом (от 0 г до 3,35 г) и диспергирование в сторону мелкой фракции при загрязнении всеми видами нефтепродуктов (бензин: от 0 г до 7,7 г; дизельное топливо: от 0 г до 7,15 г; нефть: от 0 г до 3,5 г). Наибольшее снижение массы средней фракции наблюдается при загрязнении дизельным топливом (11%). Интенсивность процесса диспергирования значительно превалирует над интенсивностью процесса агрегирования.

Песок мелкий:

Зафиксированы как процессы агрегирования (бензин: от 0 г до 0,15 г; дизельное топливо: от 0 г до 3,05 г; нефть: от 0 г до 4,05 г), так и диспергирования минеральных частиц (бензин: от 0 г до 6,05 г; дизельное топливо: от 0 г до 5,2 г; нефть: от 0 г до 5,85 г). Наибольшее снижение массы мелкой фракции наблюдается при загрязнении тяжелой нефтью (10%).

Интенсивность процесса диспергирования значительно превалирует над интенсивностью процесса агрегирования.

Песок пылеватый:

Зафиксирован процесс агрегирования частиц при взаимодействии со всеми видами нефтепродуктов. Наибольшее снижение массы пылевой фракции наблюдается при загрязнении нефтью (19%).

Этап 2. Полифракционный песчаный грунт

Результаты лабораторных испытаний по определению характера и степени изменения гранулометрического состава полифракционного песчаного грунта представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Результаты лабораторных испытаний по определению характера и степени изменения гранулометрического состава полифракционного песчаного грунта

№ п/п	Нефтепродукт	Характер и степень изменения (%) гранулометрического состава песчаных образцов после загрязнения по отношению к массе чистой фракции							
		Крупная		Средняя		Мелкая		Пылеватая	
		До загряз.	После загряз.	До загряз.	После загряз.	До загряз.	После загряз.	До загряз.	После загряз.
		Степень изменения		Степень изменения		Степень изменения		Степень изменения	
песок крупный (полифракционный)									
1	бензин А95	76,00 г	67,25 г	8,00 г	16,00 г	8,00 г	9,00 г	8,00 г	7,75 г
		↓ 8,75 г (12%)		↑ 8,00 г (100%)		↑ 1,00 г (13%)		↓ 0,25 г (3%)	
2	дизельное топливо	76,00 г	75,35 г	8,00 г	12,60 г	8,00 г	8,35 г	8,00 г	3,70 г
		↓ 0,65 г (1%)		↑ 4,60 г (58%)		↑ 0,35 г (4%)		↓ 4,30 г (54%)	
3	тяжелая нефть	76,00 г	73,2 г	8,00 г	15,80 г	8,00 г	1,75 г	8,00 г	3,65 г
		↓ 2,80 г (4%)		↑ 7,8 г (98%)		↓ 6,25 г (78%)		↓ 4,35 г (54%)	
песок средней крупности (полифракционный)									
1	бензин А95	8,00 г	8,20 г	76,00 г	69,85 г	8,00 г	13,80 г	8,00 г	7,85 г
		↑ 0,20 г (2%)		↓ 6,15 г (8%)		↑ 5,80 г (73%)		↓ 0,15 г (2%)	
2	дизельное топливо	8,00 г	9,30 г	76,00 г	73,30 г	8,00 г	14,35 г	8,00 г	3,05 г
		↑ 1,30 г (16%)		↓ 2,70 г (4%)		↑ 6,35 г (79%)		↓ 4,95 г (62%)	
3	тяжелая нефть	8,00 г	13,40 г	76,00 г	79,25 г	8,00 г	3,20 г	8,00 г	4,15 г
		↑ 5,40 г (68%)		↑ 3,25 г (4%)		↓ 4,80 г (60%)		↓ 3,85 г (48%)	
песок мелкий (полифракционный)									
1	бензин А95	8,00 г	7,25 г	8,00 г	9,85 г	76,00 г	70,95 г	8,00 г	12,05 г
		↓ 0,75 г (9%)		↑ 1,85 г (23%)		↓ 5,05 г (7%)		↑ 4,05 г (51%)	
2	дизельное топливо	8,00 г	6,80 г	8,00 г	16,40 г	76,00 г	70,75 г	8,00 г	6,05 г
		↓ 1,20 г (15%)		↑ 8,40 г (105%)		↓ 5,25 г (7%)		↓ 1,95 г (24%)	
3	тяжелая нефть	8,00 г	7,90 г	8,00 г	12,30 г	76,00 г	77,65 г	8,00 г	2,15 г
		↓ 0,10 г (1%)		↑ 4,30 г (54%)		↑ 1,65 г (2%)		↓ 5,85 г (73%)	

Примечание:

- снижение массы фракции; - увеличение массы фракции;

В составе крупного песчаного грунта наблюдается снижение массы крупной фракции на 1-12% в зависимости от вида нефтепродукта. Наибольшее снижение массы происходит при загрязнении бензином (12%).

Масса средней фракции увеличивается от 58% до двух раз в зависимости от вида нефтепродукта.

Масса мелкой фракции незначительно увеличивается при загрязнении дизельным топливом и бензином. При загрязнении нефтью – снижается на 78%.

Масса пылевой фракции снижается на 3-54% в зависимости от вида нефтепродукта.

В составе песка средней крупности наблюдается увеличение массы крупной фракции на 2-68% в зависимости от вида нефтепродукта.

Масса средней фракции снижается на 4-8% при загрязнении бензином и дизельным топливом и увеличивается на 4% при загрязнении нефтью.

Масса мелкой фракции увеличивается на 73-79% при загрязнении бензином и дизельным топливом и снижается на 60% при загрязнении нефтью.

Масса пылевой фракции снижается на 2-62% в зависимости от вида нефтепродукта.

В составе мелкого песка зафиксировано снижение крупной фракции на 1-15% в зависимости от вида нефтепродукта.

Масса средней фракции увеличивается от 23% до двух раз в зависимости от вида нефтепродукта.

Масса мелкой фракции снижается на 7% при загрязнении бензином и дизельным топливом и увеличивается на 2% при загрязнении нефтью.

Масса пылевой фракции увеличивается на 51% при загрязнении бензином и снижается на 24-73% при загрязнении дизельным топливом и нефтью.

Для подтверждения гипотезы об образовании агрегатов – появления более крупной песчаной разности был выполнен снимок под микроскопом с 4000

кратным увеличением пылеватого песка, загрязненного дизельным топливом (рисунок 2.2.).

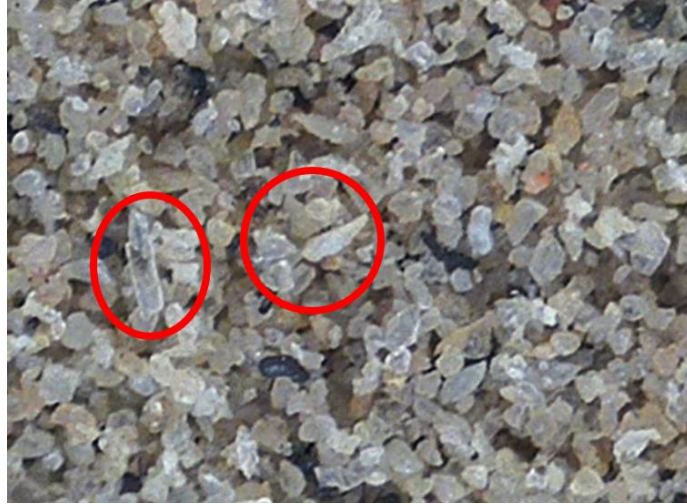


Рисунок 2.2. Снимок под микроскопом- пылеватый песок, загрязненный дизельным топливом в концентрации 1 %. Образование агрегатов (появление более крупной песчаной разности)

По результатам лабораторных исследований изменения гранулометрического состава песков при их загрязнении нефтепродуктами, можно сделать следующие выводы:

1) При загрязнении песчаного грунта нефтепродуктом наблюдаются как процессы агрегирования, т.е. перехода минеральных частиц из более мелкой фракции в более крупную, так и диспергирования, т.е. расщепления частиц на более мелкие. Однако, наличие и интенсивность обозначенных процессов зависят от вида загрязняющего нефтепродукта и исследуемой фракции песчаного грунта;

2) Изменение гранулометрического состава крупной фракции обусловлено диспергированием минеральных частиц, сопровождающаяся появлением средней фракции;

3) Изменение гранулометрического состава средней фракции песка обусловлено процессами диспергирования и агрегирования, сопровождающихся появлением крупной и мелкой фракций;

4) Изменение гранулометрического состава мелких песков, так же как песков средней крупности, обусловлено процессами агрегирования и

диспергирования минеральных частиц, сопровождающихся появлением средней и пылевой фракций;

5) Изменение гранулометрического состава пылеватых песков обусловлено агрегированием минеральных частиц, сопровождающееся появлением мелкой фракции;

6) Процессы агрегирования и диспергирования минеральных частиц приводят к изменению гранулометрического состава, однако в результате взаимодействия песчаного грунта с нефтью и нефтепродуктами классификационных изменений крупности песка не выявлено.

2.2. Исследование изменения коэффициента фильтрации песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами

2.2.1. Методика проведения лабораторных испытаний по определению изменения коэффициента фильтрации песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами

В рамках серии испытаний по определению коэффициента фильтрации песчаных грунтов при взаимодействии с нефтепродуктами в качестве изменяемых параметров были приняты крупность песка, его влажность, плотность сложения и концентрация нефтепродуктов.

Испытания проводились для монофракционных образцов песков крупных, средней крупности и мелких в соответствии с ГОСТ 25584—2023 «Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации» на приборе КФ-1 в стационарном режиме фильтрации (при гидравлическом градиенте $i = 1$). Разделение песчаного грунта на фракции осуществлялось просеиванием на ситах размером ячейки 0,5, 0,25, 0,1 мм в соответствии с ГОСТ 12536-2014 (рисунок 2.3.).

В качестве фильтрующей жидкости использовалась чистая вода, в качестве нефтепродукта – тяжелая нефть, дизельное топливо, бензин А-95. Песчаные

образцы затворялись нефтепродуктами в концентрации $C = 2, 4, 6, 8, 10, 12\%$ по массе песка (рисунок 2.4.).

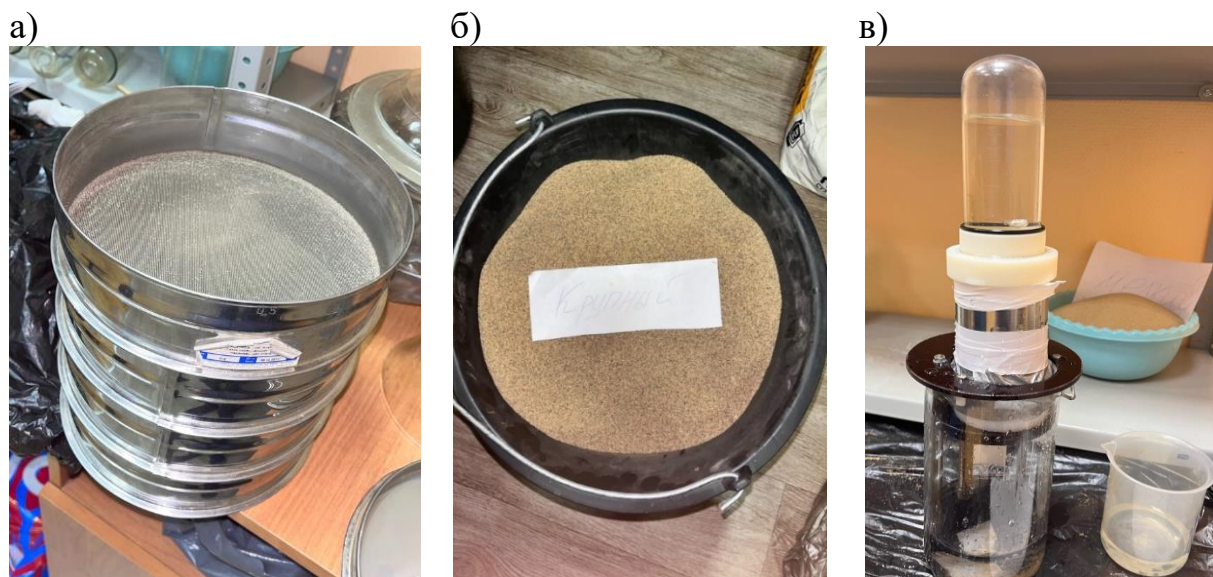


Рисунок 2.3. Методика проведения лабораторных испытаний по определению коэффициента фильтрации песчаных грунтов при взаимодействии с нефтепродуктами: а) просеивание полифракционного песка через сита 0,5 мм, 0,25 мм, 0,1 мм; б) просеянный монофракционный песок; в) прибор для определения коэффициента фильтрации песчаных грунтов КФ-1.



Рисунок 2.4. Подготовка образца, загрязненного нефтью

Испытания проводились для песчаных грунтов в воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях. Программа лабораторных испытаний по

определению коэффициента фильтрации песчаных грунтов, загрязненных нефтепродуктами, представлена в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Программа лабораторных испытаний по определению коэффициента фильтрации песчаных грунтов, загрязненных нефтепродуктами

Фракция	Плотность сложения	w, %	C, %						Итого испытаний
			2	4	6	8	10	12	
Бензин-А95, $\rho = 737,8 \text{ кг/м}^3$									
Песок крупный	Рыхлое сложение	0	6	6	6	6	6	6	1296
		100	6	6	6	6	6	6	
	Плотное сложение	0	6	6	6	6	6	6	
		100	6	6	6	6	6	6	
Песок средней крупности	Рыхлое сложение	0	6	6	6	6	6	6	
		100	6	6	6	6	6	6	
	Плотное сложение	0	6	6	6	6	6	6	
		100	6	6	6	6	6	6	
Песок мелкий	Рыхлое сложение	0	6	6	6	6	6	6	
		100	6	6	6	6	6	6	
	Плотное сложение	0	6	6	6	6	6	6	
		100	6	6	6	6	6	6	
Дизельное топливо, $\rho = 837,8 \text{ кг/м}^3$									
Песок крупный	Рыхлое сложение	0	6	6	6	6	6	6	
		100	6	6	6	6	6	6	
	Плотное сложение	0	6	6	6	6	6	6	
		100	6	6	6	6	6	6	
Песок средней крупности	Рыхлое сложение	0	6	6	6	6	6	6	
		100	6	6	6	6	6	6	
	Плотное сложение	0	6	6	6	6	6	6	
		100	6	6	6	6	6	6	
Песок мелкий	Рыхлое сложение	0	6	6	6	6	6	6	
		100	6	6	6	6	6	6	
	Плотное сложение	0	6	6	6	6	6	6	
		100	6	6	6	6	6	6	
Тяжелая нефть, $\rho = 898,4 \text{ кг/м}^3$									
Песок крупный	Рыхлое сложение	0	6	6	6	6	6	6	
		100	6	6	6	6	6	6	
	Плотное сложение	0	6	6	6	6	6	6	
		100	6	6	6	6	6	6	
Песок средней крупности	Рыхлое сложение	0	6	6	6	6	6	6	
		100	6	6	6	6	6	6	
	Плотное сложение	0	6	6	6	6	6	6	
		100	6	6	6	6	6	6	
Песок мелкий	Рыхлое сложение	0	6	6	6	6	6	6	
		100	6	6	6	6	6	6	

Фракция	Плотность сложения	w, %	C, %						Итого испытаний
			2	4	6	8	10	12	
	Плотное сложение	0	6	6	6	6	6	6	
	100	6	6	6	6	6	6		

2.2.2. Результаты лабораторных испытаний

Коэффициент фильтрации песчаного грунта, загрязненного бензином

Результаты лабораторных испытаний приведены в таблице 2.5.

Полученные зависимости представлены на рисунках 2.5 и 2.6.

Таблица 2.5

Коэффициент фильтрации песков при загрязнении бензином А-95

Бензин А-95						
C, %	k_f , см/с					
	Песок крупный		Песок средней крупности		Песок мелкий	
	Сухой	Водонасыщ.	Сухой	Водонасыщ.	Сухой	Водонасыщ.
	Рыхлое сложение					
0	0,419	0,237	0,258	0,103	0,123	0,026
2	0,329	0,210	0,136	0,060	0,025	0,010
4	0,251	0,179	0,093	0,044	0,016	0,007
6	0,199	0,147	0,072	0,041	0,009	0,005
8	0,160	0,130	0,054	0,036	0,005	0,004
10	0,151	0,118	0,048	0,035	0,004	0,003
12	0,144	0,112	0,048	0,035	0,003	0,002
	Плотное сложение					
0	0,236	0,165	0,122	0,048	0,072	0,009
2	0,112	0,083	0,026	0,017	0,010	0,005
4	0,071	0,066	0,017	0,013	0,0061	0,0035
6	0,050	0,059	0,014	0,011	0,0060	0,0032
8	0,050	0,059	0,014	0,008	0,0057	0,0029
10	0,048	0,056	0,015	0,008	0,0052	0,0028
12	0,045	0,053	0,015	0,008	0,0051	0,0024

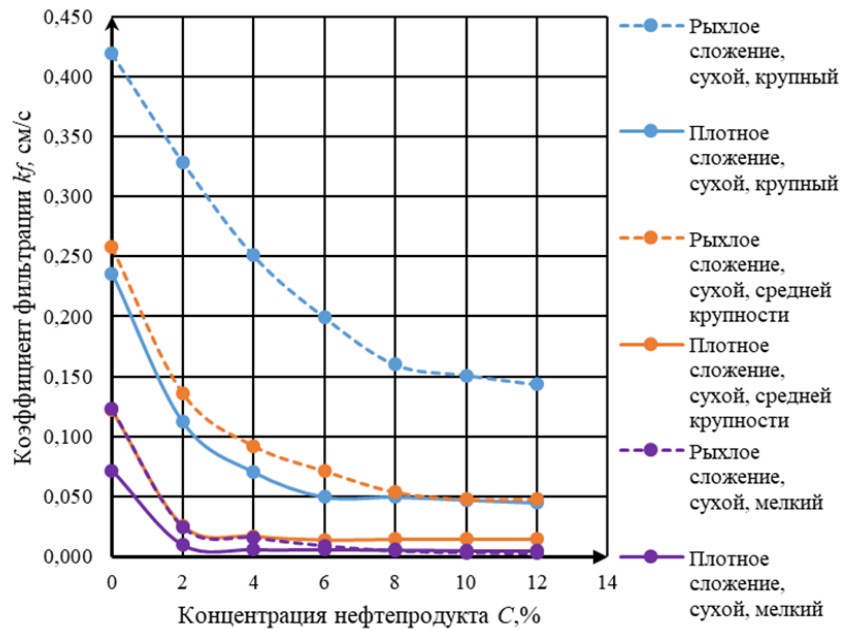


Рисунок 2.5. Изменение коэффициента фильтрации песчаного грунта, загрязненного бензином А-95 в сухом состоянии в зависимости от концентрации $C\%$

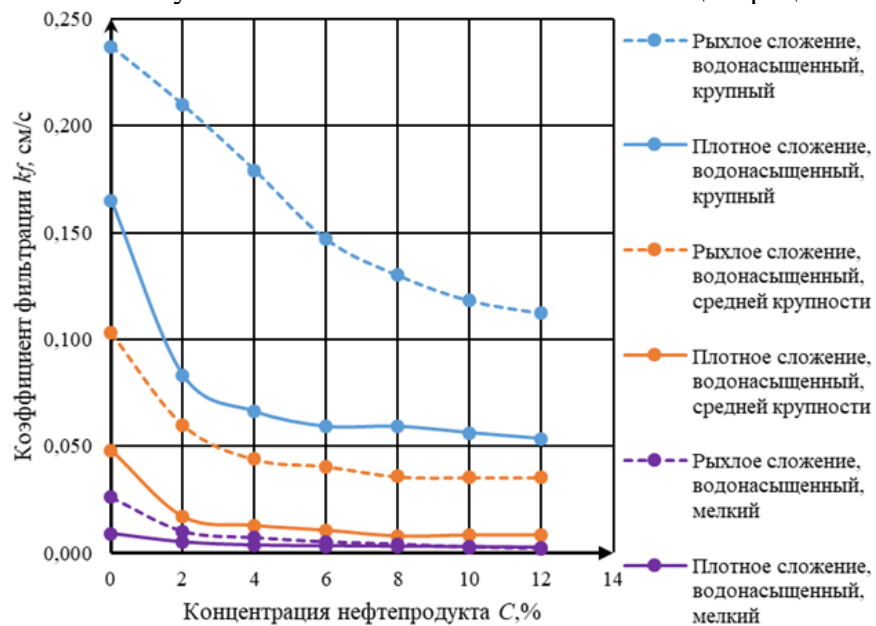


Рисунок 2.6. Изменение коэффициента фильтрации песчаного грунта, загрязненного бензином А-95 в водонасыщенном состоянии в зависимости от концентрации $C\%$

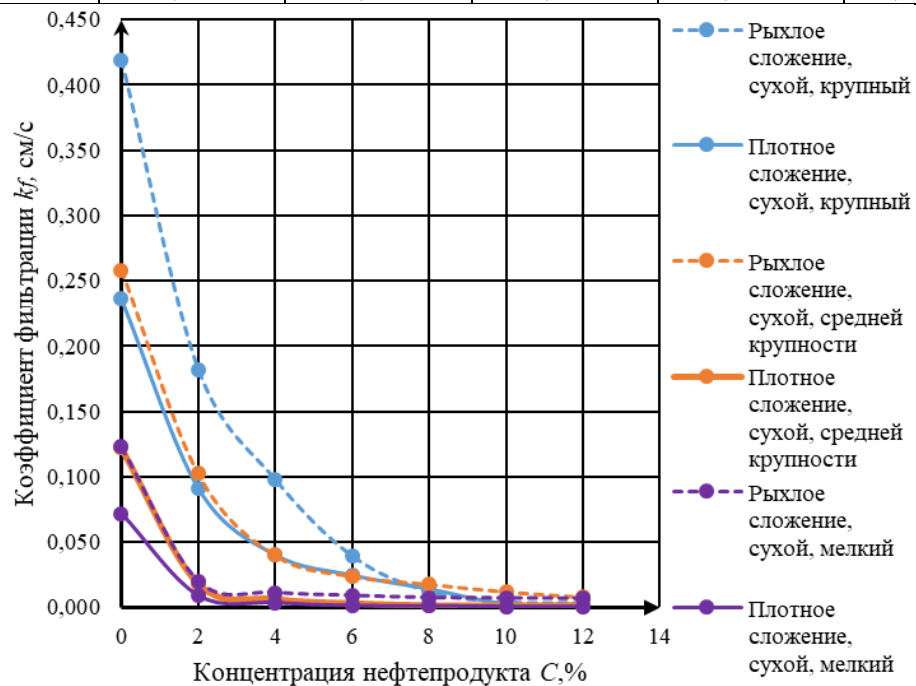
Коэффициент фильтрации песчаного грунта, загрязненного дизельным

ТОПЛИВОМ

Результаты лабораторных испытаний приведены в таблице 2.6. Полученные зависимости представлены на рисунках 2.7 и 2.8.

Коэффициент фильтрации песков при загрязнении дизельным топливом

Дизельное топливо						
C, %	k_f , см/с					
	Песок крупный		Песок средней крупности		Песок мелкий	
	Сухой	Водонасыщ.	Сухой	Водонасыщ.	Сухой	Водонасыщ.
Рыхлое сложение						
0	0,419	0,237	0,258	0,103	0,123	0,026
2	0,182	0,146	0,102	0,024	0,020	0,011
4	0,098	0,071	0,040	0,014	0,011	0,008
6	0,040	0,034	0,024	0,014	0,009	0,006
8	0,012	0,016	0,018	0,013	0,007	0,005
10	0,004	0,007	0,012	0,012	0,007	0,005
12	0,004	0,004	0,008	0,008	0,007	0,004
Плотное сложение						
0	0,236	0,165	0,122	0,048	0,072	0,009
2	0,091	0,083	0,018	0,010	0,0090	0,002
4	0,040	0,028	0,006	0,004	0,0034	0,001
6	0,025	0,011	0,003	0,002	0,0011	0,0005
8	0,014	0,008	0,002	0,001	0,0010	0,0003
10	0,003	0,002	0,002	0,001	0,0005	0,00002
12	0,003	0,002	0,001	0,001	0,0004	0,000002

Рисунок 2.7. Изменение коэффициента фильтрации песчаного грунта, загрязненного дизельным топливом в сухом состоянии в зависимости от концентрации C %

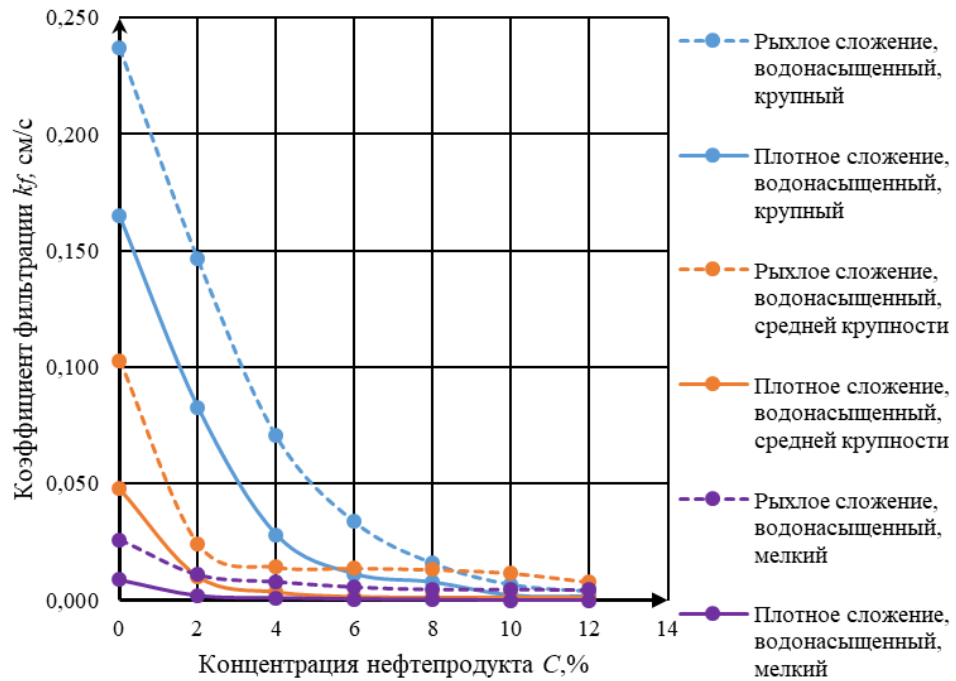


Рисунок 2.8. Изменение коэффициента фильтрации песчаного грунта, загрязненного дизельным топливом в водонасыщенном состоянии в зависимости от концентрации $C\%$

Коэффициент фильтрации песчаного грунта, загрязненного нефтью

Результаты лабораторных испытаний приведены в таблице 2.7.

Полученные зависимости представлены на рисунках 2.9 и 2.10.

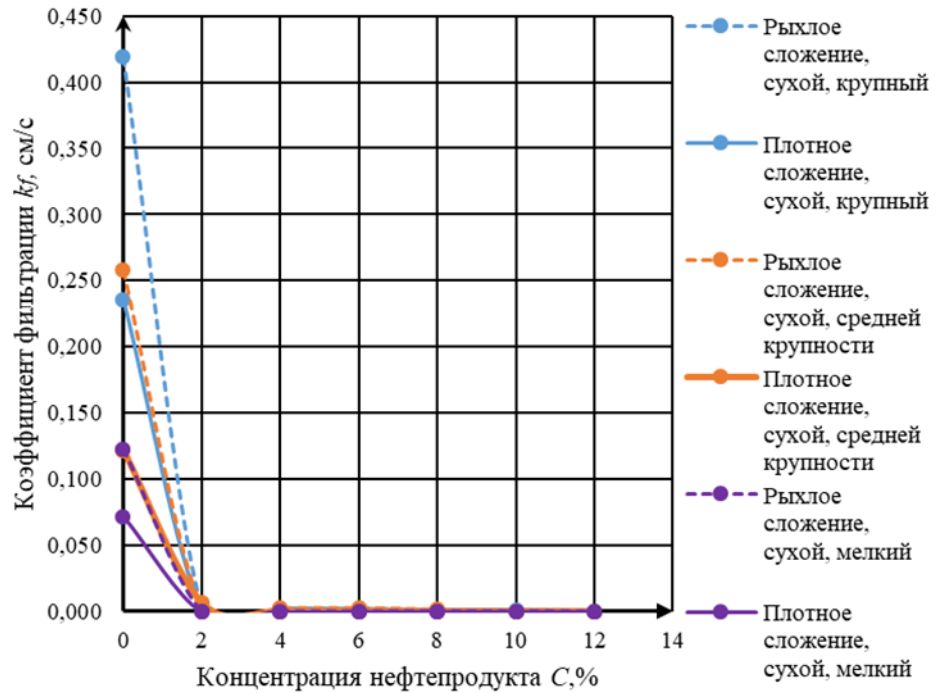
Таблица 2.7.

Коэффициент фильтрации песков при загрязнении нефтью

Тяжелая нефть						
C, %	k_f , см/с					
	Песок крупный		Песок средней крупности		Песок мелкий	
	Сухой	Водонасыщ.	Сухой	Водонасыщ.	Сухой	Водонасыщ.
	Рыхлое сложение					
0	0.4190	0.2370	0.2580	0.1030	0.1230	0.0260
2	0.0027	0.0050	0.0019	0.0040	0.0003	0.0005
4	0.0018	0.0032	0.0013	0.0029	0.0002	0.0004
6	0.0010	0.0030	0.0009	0.0028	0.0002	0.0002
8	0.0009	0.0025	0.0007	0.0024	0.0001	0.0002
10	0.0009	0.0020	0.0007	0.0015	0.00004	0.0001
12	0.0009	0.0008	0.0007	0.0006	0.00003	0.00003
C, %	Плотное сложение					
0	0.2360	0.1650	0.1220	0.0480	0.0720	0.0090
2	0.0022	0.0030	0.0007	0.0005	0.000003	0.000005
4	0.0016	0.0020	0.0004	0.0005	0.000003	0.000005

6	0.0009	0.0018	0.0004	0.0004	0.000002	0.000003
8	0.0008	0.0012	0.0004	0.0004	0.000002	0.000003
10	0.0008	0.0009	0.0003	0.0004	0.000002	0.000003
12	0.0008	0.0007	0.0003	0.0003	0.000002	0.000002

а)



б)

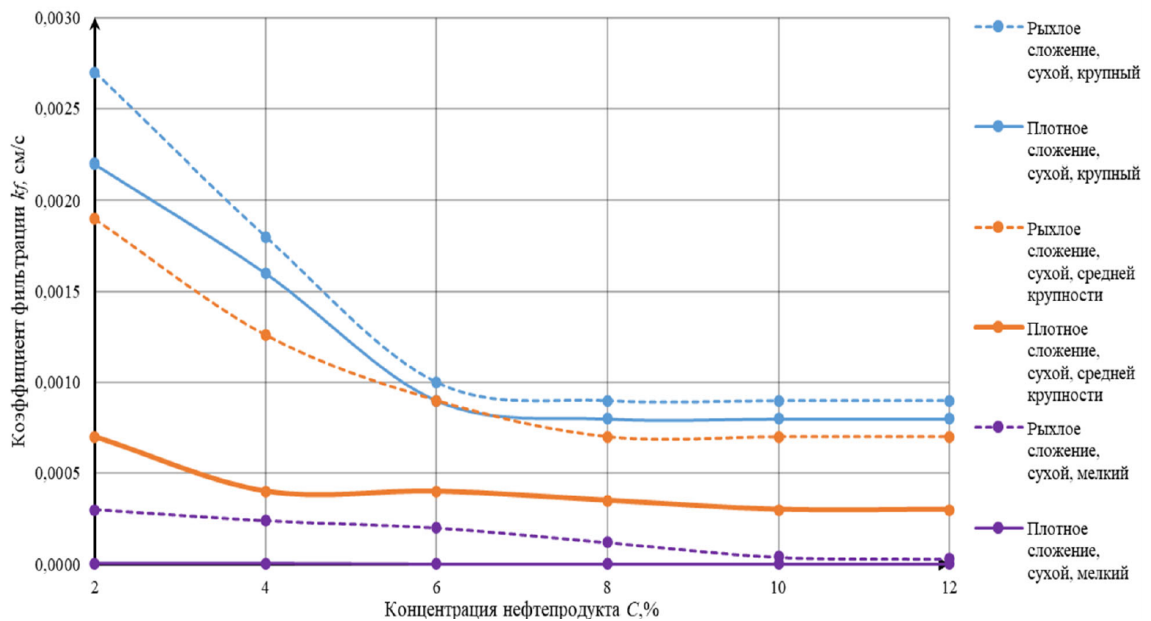
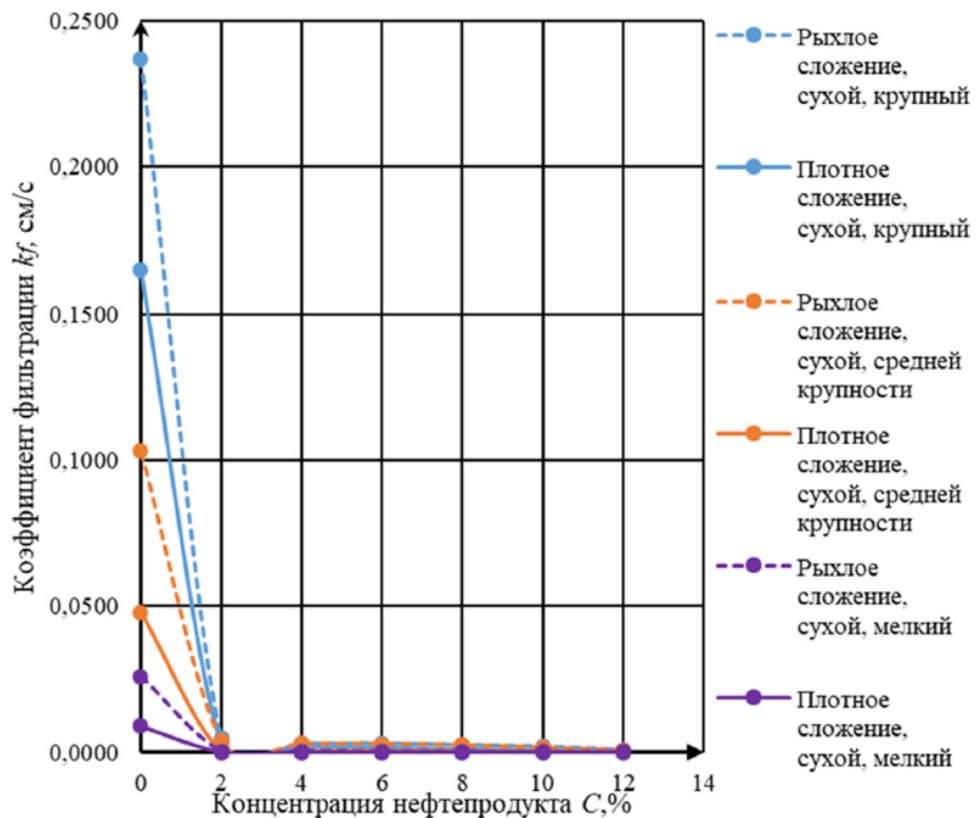


Рисунок 2.9. Изменение коэффициента фильтрации песчаного грунта, загрязненного тяжелой нефтью в сухом состоянии в зависимости от концентрации C : а) – при $0\% \leq C \leq 12\%$, б) – при $2\% \leq C \leq 12\%$

а)



б)

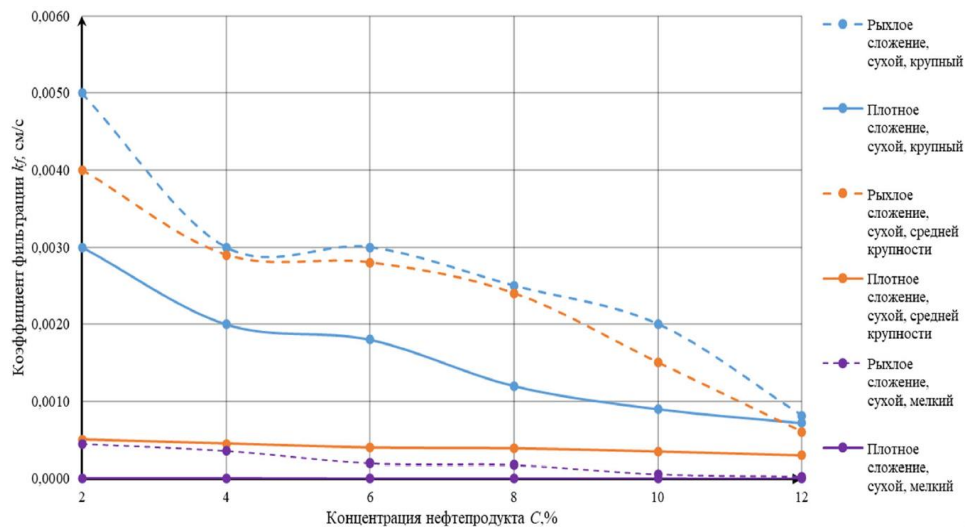


Рисунок 2.10. Изменение коэффициента фильтрации песчаного грунта, загрязненного тяжелой нефтью в водонасыщенном состоянии в зависимости от концентрации C : а) – при $0\% \leq C \leq 12\%$, б) – при $2\% \leq C \leq 12\%$

Изменение коэффициента фильтрации для мелких песков, загрязненных нефтепродуктами:

1. Попадание в сухой мелкий песок нефтепродукта в концентрации $C = 2\%$

приводит к снижению коэффициента фильтрации более чем на 80% (в сравнении с коэффициентом фильтрации чистого песка) вне зависимости от плотности сложения песчаного грунта и типа нефтепродукта.

2. По мере увеличения концентрации нефтепродукта до 4% коэффициент фильтрации мелких песков в рыхлом сложении снижается на 87 и 91% при загрязнении бензином и дизельным топливом соответственно.

3. По мере последовательного увеличения концентрации нефтепродукта от 4% до 12% коэффициент фильтрации мелкого сухого песка в плотном сложении снижается незначительно (не более 3%) вне зависимости от вида загрязняющего нефтепродукта.

4. Мелкий водонасыщенный песок в плотном сложении, загрязненный дизельным топливом в концентрациях $C=10-12\%$ является водонепроницаемым.

5. Мелкий сухой песок в рыхлом сложении, загрязненный тяжелой нефтью, является слабоводопроницаемым при любом значении концентрации.

6. Мелкий водонасыщенный песок в рыхлом сложении, загрязненный тяжелой нефтью, является слабоводопроницаемым при значениях концентрации $C=6-12\%$.

7. Мелкий песок в плотном сложении, загрязненный тяжелой нефтью, является водонепроницаемым при любой концентрации, вне зависимости от влажности.

Изменение коэффициента фильтрации для песков средней крупности, загрязненных нефтепродуктами:

1. Загрязнение 2% нефтепродукта песка средней крупности как в воздушно-сухом, так и в водонасыщенном состояниях снижает коэффициент фильтрации на 42-79% в зависимости от типа нефтепродукта и плотности сложения песка. Исключением из закономерности является песок в воздушно-сухом состоянии в плотном сложении, загрязненный дизельным топливом, коэффициент фильтрации которого снизился на 85%.

2. Загрязнение песка средней крупности (в рыхлом и плотном сложениях в воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях) дизельным топливом в концентрации 2% приводит к снижению коэффициента фильтрации не менее, чем на 60%.

3. По мере последовательного увеличения концентрации нефтепродукта от 4% до 12% коэффициент фильтрации снижается незначительно (не более 2%) вне зависимости от типа нефтепродукта, влажности и плотности сложения образцов.

4. Попадание тяжелой нефти в песок средней крупности приводит к снижению коэффициента фильтрации более, чем на 96% в плотном и рыхлом сложениях, в сухом и водонасыщенном состояниях.

5. Песок средней крупности сухой в плотном сложении, загрязненный тяжелой нефтью, является слабоводопроницаемым при значениях концентрации $C = 10\%$.

6. Песок средней крупности водонасыщенный и сухой в плотном сложении, загрязненный тяжелой нефтью, является слабоводопроницаемым при концентрации $C = 12\%$.

Изменение коэффициента фильтрации для крупных песков, загрязненных нефтепродуктами:

1. Загрязнение 2% нефтепродукта крупного песка как в воздушно-сухом, так и в водонасыщенном состояниях снижает коэффициент фильтрации на 38-61% в зависимости от типа нефтепродукта и плотности сложения песка. Исключением является песок в воздушно-сухом и водонасыщенном состояниях в плотном сложении, загрязненный бензином А-95, коэффициент фильтрации которого снизился на 11-22%.

2. С увеличением концентрации нефтепродукта от 4% до 8% коэффициент фильтрации для песка крупного снижается при загрязнении дизельным топливом более, чем на 70% вне зависимости от плотности сложения и влажности песчаных образцов; более, чем на 38% при загрязнении бензином

А-95. Исключением является песок в водонасыщенном состоянии в рыхлом сложении, загрязненный бензином А-95 в концентрации $C=4\%$, коэффициент фильтрации которого снизился на 24%.

3. С увеличением концентрации нефтепродукта от 8% до 12% коэффициент фильтрации для песка крупного снижается незначительно (не более 5%) вне зависимости от типа нефтепродукта, влажности и плотности сложения образцов.

4. Минимальная концентрация (2%) тяжелой нефти в крупном песке приводит к снижению коэффициента фильтрации на 98-99% в плотном и рыхлом сложениях, в сухом и водонасыщенном состояниях.

По результатам лабораторных испытаний песчаных грунтов, загрязненных нефтепродуктами, для определения характера и степени изменения коэффициента фильтрации разработаны сводные классификационные таблицы, где условия водопроницаемости заданы в соответствии с ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация» (рисунок 2.11).

а)

Песок крупный							
С, %	Влажность	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	ОС	ОС	ОС	ОС	ОС	ОС
2	Сухой	ОС	ОС	ОС	ОС	ВП	ВП
	Водонасыщенный	ОС	ОС	ОС	ОС	СВ	ВП
4	Сухой	ОС	ОС	ОС	ОС	ВП	ВП
	Водонасыщенный	ОС	ОС	ОС	СВ	ВП	ВП
6	Сухой	ОС	ОС	ОС	СВ	ВП	ВП
	Водонасыщенный	ОС	ОС	СВ	СВ	ВП	ВП
8	Сухой	ОС	ОС	СВ	СВ	ВП	ВП
	Водонасыщенный	ОС	ОС	СВ	СВ	ВП	ВП
10	Сухой	ОС	ОС	СВ	СВ	ВП	ВП
	Водонасыщенный	ОС	ОС	СВ	ВП	ВП	ВП
12	Сухой	ОС	ОС	СВ	СВ	ВП	ВП
	Водонасыщенный	ОС	ОС	СВ	ВП	ВП	ВП

б)

Песок средней крупности							
С, %	Влажность	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	ОС	ОС	ОС	ОС	СВ	СВ
2	Сухой	ОС	СВ	ОС	СВ	ВП	ВП
	Водонасыщенный	ОС	СВ	СВ	СВ	СВ	ВП
4	Сухой	ОС	СВ	ОС	СВ	ВП	ВП
	Водонасыщенный	ОС	СВ	СВ	СВ	ВП	ВП
6	Сухой	ОС	СВ	СВ	СВ	ВП	ВП
	Водонасыщенный	ОС	СВ	СВ	ВП	ВП	ВП
8	Сухой	ОС	СВ	СВ	ВП	ВП	ВП
	Водонасыщенный	ОС	СВ	СВ	ВП	ВП	ВП
10	Сухой	ОС	СВ	СВ	ВП	ВП	СлВ
	Водонасыщенный	ОС	СВ	СВ	ВП	ВП	ВП
12	Сухой	ОС	СВ	СВ	ВП	ВП	СлВ
	Водонасыщенный	ОС	СВ	СВ	ВП	ВП	СлВ

в)

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

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

Рисунок 2.11. Классификация по водопроницаемости **песчаных грунтов**, загрязненных нефтепродуктами в соответствии с ГОСТ 25100: а) – крупных песков; б) – песков средней крупности; в) – мелких песков.

В соответствии с разработанными классификационными таблицами можно заключить следующее:

1. **Крупные пески** загрязнения бензином, дизельным топливом и нефтью являются водопроницаемыми, сильно водопроницаемыми и очень сильно водопроницаемыми в соответствии с ГОСТ 25100-2020 «Грунты.

Классификация» в зависимости от плотности сложения, концентрации и вида загрязняющего НП.

2. *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 являются слабоводопроницаемыми в соответствии с ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация».

3. *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 слабоводопроницаемыми при загрязнении нефтью в концентрации от 6 % до 12% вне зависимости от плотности сложения и влажности.

4. С учетом обозначенных изменений в коэффициенте фильтрации песчаных грунтов при взаимодействии с нефтепродуктами различного вида возможно длительное развитие осадки во времени в случае пролива нефтепродукта, что необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации сооружений.

2.3. Исследование изменения удельного веса песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами

2.3.1. Методика проведения лабораторных испытаний по определению изменения удельного веса песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами

Для проведения испытаний использовался монофракционный песчаный грунт: крупный, средней крупности и мелкий. В качестве загрязняющего нефтепродукта принимались нефть, дизельное топливо и бензин. Концентрация нефтепродукта назначалась по массе сухого грунта и составляла $C=2,6,12\%$.

Затворение грунта нефтепродуктом осуществлялось в отдельной емкости, после чего масса перемешивалась до однородности, и, далее,

перемещалась послойным уплотнением в деревянный герметизированный лоток с габаритными размерами 40x30x25. Лабораторные исследования характера и степени изменения удельного веса песчаного грунта при взаимодействии с нефтью и нефтепродуктами проводились методом режущего кольца в соответствии с ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик».

2.3.2. Оценка результатов лабораторных испытаний

Результаты лабораторных испытаний по определению характера и степени изменения удельного веса песчаного грунта при загрязнении нефтью и нефтепродуктами представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8

Результаты лабораторный исследований характера и степени изменения удельного веса песчаного грунта при загрязнении нефтью и нефтепродуктами

С, %	Бензин			Дизельное топливо			Нефть		
	Крупность песчаного грунта:								
	К – крупный песок, С – песок средней крупности, М – мелкий песок								
	К	С	М	К	С	М	К	С	М
	Удельный вес условно чистого песчаного грунта (концентрация нефтепродукта С=0%, γ (кН/м ³))								
0	17,289	18,666	18,924	17,289	18,666	18,924	17,289	18,666	18,924
	Удельный вес песчаного грунта после загрязнения нефтью и нефтепродуктами, $\gamma_{нп}$ (кН/м ³)								
2	17,313	18,437	18,793	17,585	18,292	18,793	17,196	17,636	18,630
6	17,388	17,848	18,035	17,456	18,254	18,401	17,276	17,630	17,694
12	17,558	16,737	17,305	17,464	17,121	17,347	17,362	16,804	17,177

1) Удельный вес песчаного грунта при загрязнении **бензином** в концентрации от 2 до 12%:

- Крупный песок - снижается не более чем на 2%;
- Песок средней крупности – снижается не более чем на 10%;

- Мелкий песок – снижается не более чем на 9%;

2) Удельный вес песчаного грунта при загрязнении **дизельным топливом 2 до 12%:**

- Крупный песок - снижается не более чем на 1%;

- Песок средней крупности – снижается не более чем на 8%;

- Мелкий песок – снижается не более чем на 5%;

3) Удельный вес песчаного грунта при загрязнении **нефтью 2 до 12%:**

- Крупный песок - снижается не более чем на 1%;

- Песок средней крупности – снижается не более чем на 10%;

- Мелкий песок – снижается не более чем на 9%.

Принимая во внимание полученные результаты, можно заключить следующее:

1. Удельный вес песчаного грунта различной крупности при загрязнении нефтью и нефтепродуктами в концентрации от 2% до 12% снижается не более, чем на 10% в сравнении с удельным весом условно чистого (незагрязненного) грунта.

2. Снижение удельного веса песчаного грунта при загрязнении нефтью и нефтепродуктами обусловлено меньшей плотностью нефти и нефтепродуктов (бензин: $\rho=737,8$ кг/м³; дизельное топливо: $\rho=837,8$ кг/м³; нефть: $\rho=898,4$ кг/м³) в сравнении с плотностью воды ($\rho=1000$ кг/м³).

3. Снижение удельного веса песчаного грунта при загрязнении нефтью и нефтепродуктами необходимо учитывать при геотехнических расчетах наряду с изменениями механических характеристик.

2.4. Модельное исследование распределения концентрации нефти и нефтепродуктов по глубине песчаного массива

2.4.1. Методика и лабораторное оборудование для проведения модельного исследования распределения концентрации нефти и нефтепродукта по глубине песчаного массива

Модельное исследование распределения концентрации нефти и

нефтепродуктов по глубине песчаного массива выполнялись в два этапа.

Этап 1. Исследование глубины распространения нефти и нефтепродуктов по глубине грунтового массива

Моделирование исследуемого процесса осуществлялось с помощью адаптированной версии колбы Лебедева, которая используется в методе высоких колонн при определении максимальной молекулярной влагоемкости песков [48]. Оригинальная конструкция колбы Лебедева состоит из стеклянной трубки диаметром 3-4 см и длиной до 100 см. Трубка имеет боковые отверстия диаметром 1,5-2 см, расположенные друг от друга на расстоянии 10 см. Нижнее боковое отверстие находится на расстоянии 5 см от края трубки. В дно трубки впаяна небольшая трубочка с сеткой. К этой трубочке при установке прибора присоединяют шланг от напорного бака (рисунок 2.12).

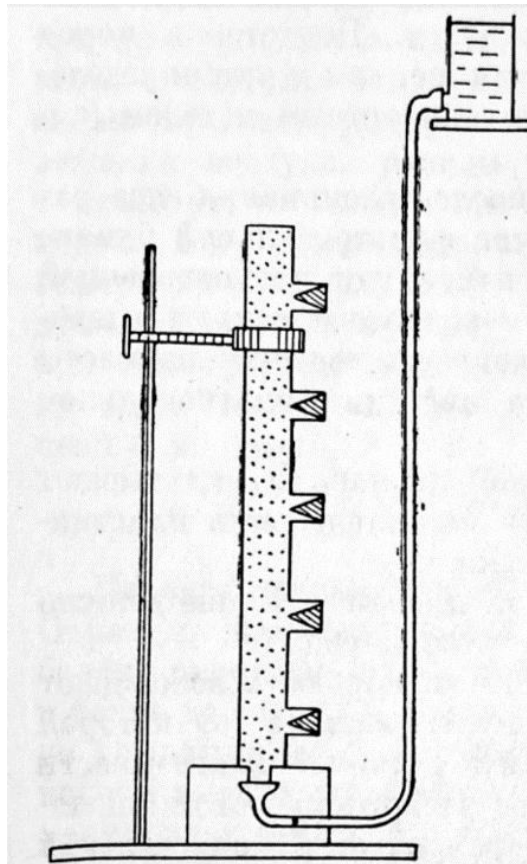


Рисунок 2.12. Установка для определения максимальной молекулярной влагоемкости песков методом высоких колонн (колба Лебедева)

Для проведения модельных исследований глубины распространения нефти и нефтепродуктов по глубине грунтового массива конструкция прибора была адаптирована для поставленной задачи и изготовлена под заказ из более прочного и износостойкого органического стекла. Также были изменены геометрические размеры колбы: высота - 1000 мм, внешний диаметр - 62 мм, внутренний диаметр – 58 мм, толщина стенки - 4 мм, количество отверстий для изъятия образцов грунта – 9 шт., расположенных с шагом 100 мм. Конструкция адаптированной версии колбы Лебедева представлена на рисунке 2.13.

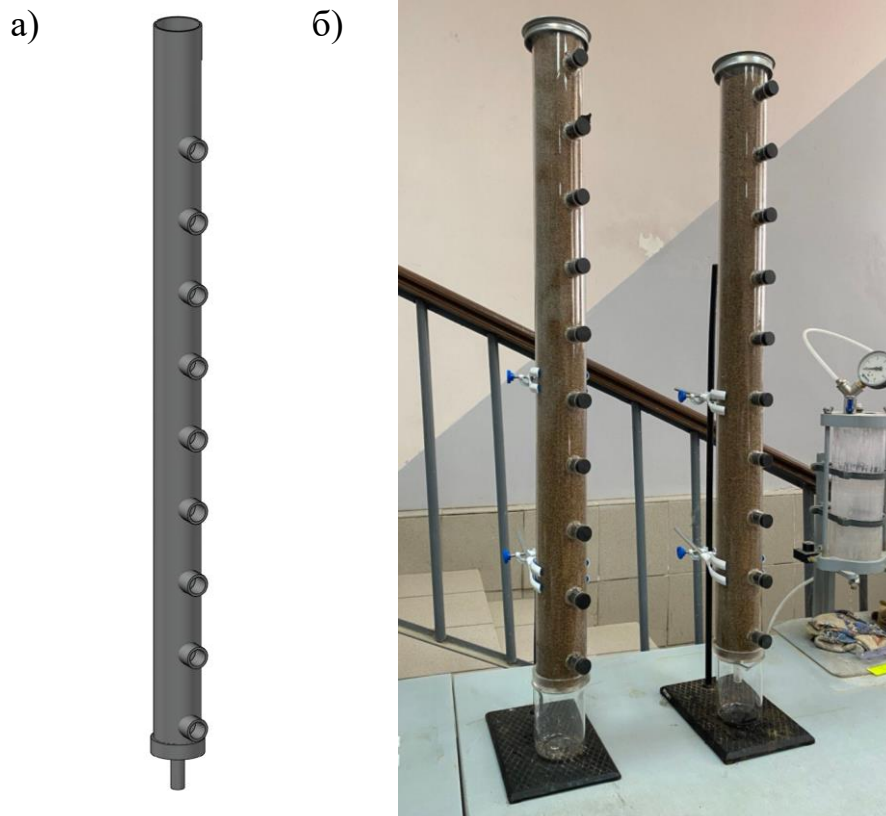


Рисунок 2.13. Конструкция адаптированной версии колбы Лебедева для проведения модельных исследований распределения концентрации нефти и нефтепродуктов по глубине грунтового массива: а) – эскиз для изготовления; б) – адаптированная версия.

Для моделирования процесса распространения нефти и нефтепродуктов по глубине грунтового массива использовался крупный песок, средней крупности и мелкий. Заполнение колбы грунтом осуществлялось с поэтапным уплотнением до отметки -5 см от верха колбы. Для предотвращения потери

песка через нижнее отверстие, предназначенное для стекания жидкости, на дно колбы укладывалась латунная сетка фильтрационного прибора КФ-1. Вертикальное положение колбы, необходимое для равномерного течения жидкости в объеме грунта, обеспечивалось лабораторным штативом и двумя металлическими зажимами.

После заполнения колбы песком, добавлялась нефть и нефтепродукты в концентрации 2% по массе песка в колбе после чего производились замеры глубины их вертикального распространения во времени до условной стабилизации отметки по глубине колбы.

Этап 2. Определение массовой концентрации нефтепродукта гравиметрическим методом

Метод очистки песчаного грунта от нефти и нефтепродуктов (битум, мазут) гравиметрическим методом с помощью растворителей активно используется в дорожном строительстве и при проведении инженерно-экологических изысканий. Суть метода в соответствии с ПНД Ф 16.1.41-04 «Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах почв гравиметрическим методом» заключается многократной последовательной промывке грунта растворителем и последующем высушивании грунта до достижения постоянной массы. Далее, при необходимости определения начальной степени загрязнения нефтепродуктом, искомую величину определяют по разности масс грунта до и после высушивания.

В рамках инженерно-экологических изысканий используются более точные методы определения концентрации нефти и нефтепродуктов в грунте, такие как:

- инфракрасная спектрометрия – измерение интенсивности оптического излучения, отраженного от исследуемого образца, и перерасчет полученной интенсивности в содержание нефтепродуктов;

- ультрафиолетовая люминесценция – определение концентрации нефтепродукта по интенсивности флуоресценции, возникающей в процессе облучения образца ультрафиолетовыми лучами;

- газовая и жидкостная хроматография - физико-химическое разделение анализируемого вещества на монокомпоненты и т.д.

Цель данного исследования - общая оценка характера распределения нефти и нефтепродуктов по глубине грунтового массива, в связи с чем для определения концентрации использовался гравиметрический метод, который является наименее трудоемким и не требующим использования профильного лабораторного оборудования.

Адаптированная методика определения массовой концентрации нефти и нефтепродуктов в песчаном грунте гравиметрическим методом при загрязнении бензином и дизельным топливом

1. Пробу загрязненного песчаного грунта поместить в предварительно взвешенный бюкс. Зафиксировать массу бюкса с загрязненным песком.

2. Залить пробу средством для очистки от нефтепродуктов МАСТЕРХИМ до уровня, покрывающего песок. Отстаивать не менее 20 минут.

3. Долить в бюкс воды до уровня верхней кромки бюкса.

4. Перемешивать содержимое бюкса металлической лопаткой до приобретения жидкостью белого оттенка.

5. Аккуратно слить жидкость из бюкса на сито прибора (рис.28-29), не допуская потерь песчаной фракции. В случае попадания песчаных частиц на сита, разместить воронку над бюксом, перевернуть сито и промыть сито чистой водой.

6. Повторять пункты 3-5 до тех пор, пока сливаемая в цилиндр жидкость не станет прозрачной.

7. По достижении жидкостью прозрачности поставить открытый бюкс на песчаную баню, нагретую до 55°. Высушивать до воздушно-сухого состояния грунта.

8. Зафиксировать массу бюкса с высушенным грунтом. Концентрацию определить по разности масс до промывки и после (аналогично формуле для определения влажности грунта).

Адаптированная методика определения массовой концентрации нефти и нефтепродуктов в песчаном грунте гравиметрическим методом при загрязнении нефтью

1. Пробу загрязненного песчаного грунта поместить в предварительно взвешенный бюкс. Зафиксировать массу бюкса с загрязненным песком.

2. Залить пробу растворителем УАЙТ-СПИРИТ до уровня верхней кромки бюкса. Отстаивать не менее 20 минут.

3. Перемешивать содержимое бюкса металлической лопаткой.

4. Аккуратно слить жидкость из бюкса на сито Прибора (рисунок 2.14), не допуская потерь песчаной фракции. В случае попадания песчаных частиц на сита, разместить воронку над бюксом, перевернуть сито и промыть сито УАЙТ-СПИРИТОМ.

5. Повторять пункты 3, 4 до осветления жидкости.

6. Залить пробу средством для очистки от нефтепродуктов МАСТЕРХИМ до уровня, покрывающего песок.

7. Долить в бюкс воды до уровня верхней кромки бюкса.

8. Перемешивать содержимое бюкса металлической лопаткой до приобретения жидкостью белого оттенка.

9. Аккуратно слить жидкость из бюкса на сито Прибора, не допуская потерь песчаной фракции. В случае попадания песчаных частиц на сита, разместить воронку над бюксом, перевернуть сито и промыть сито чистой водой.

10. Повторять пункты 3-5 до тех пор, пока сливаемая в цилиндр жидкость не станет прозрачной.

11. По достижении жидкостью прозрачности поставить открытый бюкс на песчаную баню, нагретую до 55°. Высушивать до воздушно-сухого состояния грунта.

12. Зафиксировать массу бюкса с высушенным грунтом. Концентрацию определить по разности масс до промывки и после (аналогично формуле для определения влажности грунта).

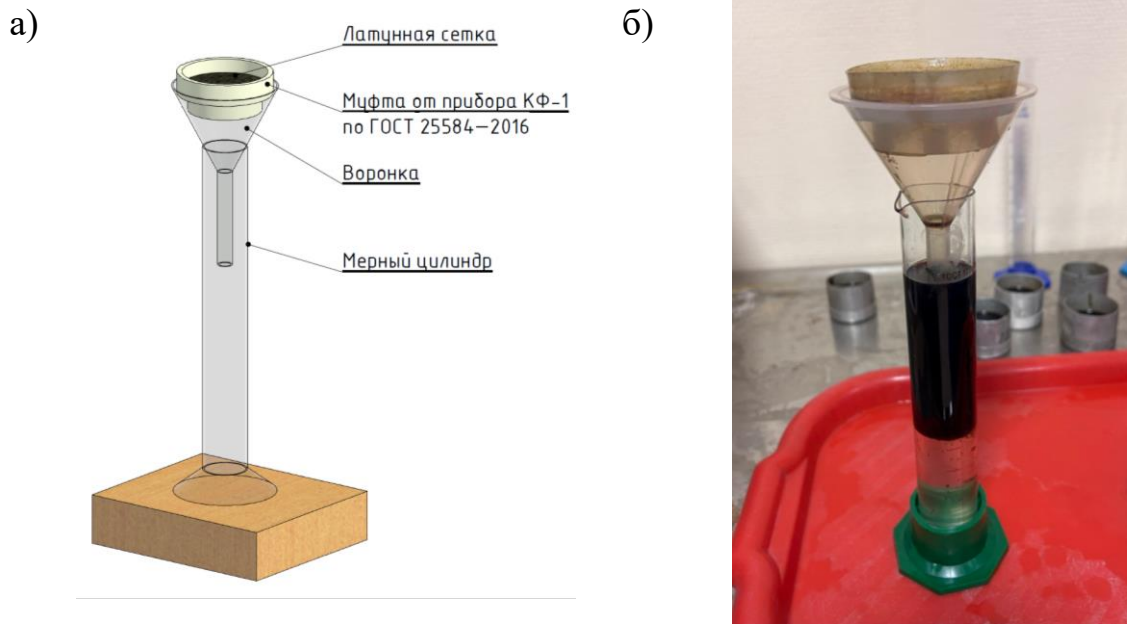


Рисунок 2.14. Прибор для лабораторного определения массовой концентрации нефтепродукта в песчаном грунте гравиметрическим методом: а) -эскиз прибора; б) – опытный образец.

2.4.2. Анализ результатов модельного эксперимента

Этап 1. Исследование глубины распространения нефти и нефтепродуктов по глубине грунтового массива

Результаты наблюдений за глубиной распространения нефти и нефтепродуктов по высоте колбы представлены на рисунке 2.15.

При исследовании глубины распространения нефти и нефтепродуктов в крупном песке наблюдался «пристенный эффект» - скорость стекания по стенкам колбы была значительно выше, чем в объеме грунта, что связано с крупностью песка, степенью окатанности частиц и плотности их прилегания к стенкам колбы, в связи с чем результаты наблюдений за глубиной

распространения нефти и нефтепродуктов в крупном песке на графике не представлены.

Результаты наблюдений показали, что возможная глубина распространения нефти и нефтепродуктов обусловлена их вязкостью – чем выше кинематическая вязкость, тем меньше глубина их вертикального распространения. Так, наибольшая глубина распространения зафиксирована у бензина, наименьшая – у нефти для песков средней крупности и мелких.

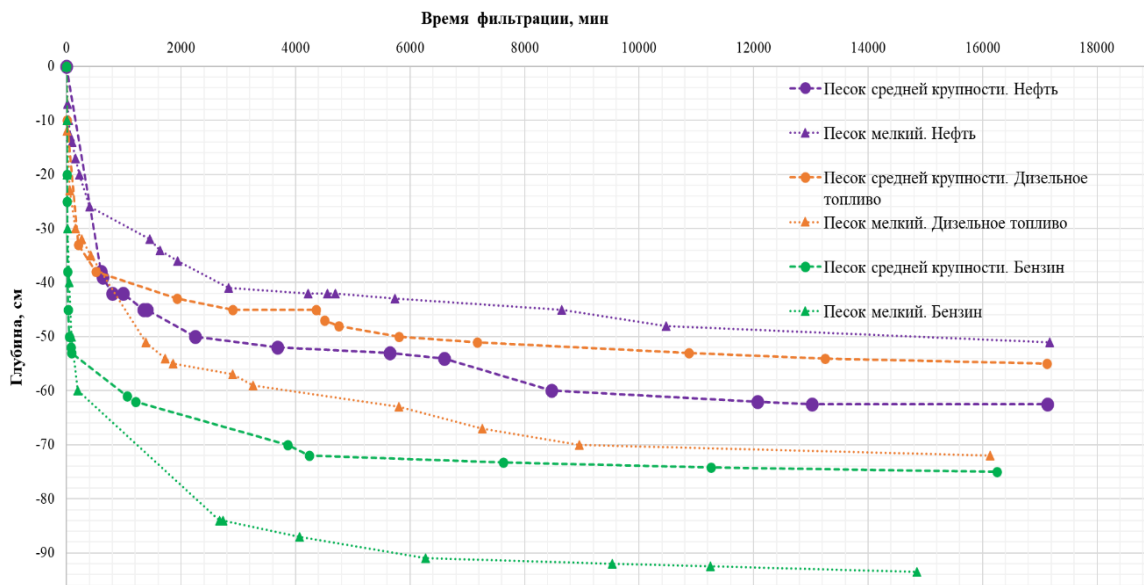


Рисунок 2.15. График зависимости глубины распространения нефти и нефтепродуктов от времени

Время стабилизации вертикального распространения нефти и нефтепродуктов по глубине колбы:

При инфильтрации нефти:

- у мелких песков – 11 000 минут \approx 7,5 дней
- у песков средней крупности – 9 000 минут \approx 6 дней

При инфильтрации дизельного топлива:

- у мелких песков – 9 000 минут \approx 6 дней;
- у песков средней крупности – 7 000 минут \approx 5 дней;

При инфильтрации бензина:

- у мелких песков – 6 000 минут \approx 4 дня;
- у песков средней крупности – 4 000 минут \approx 3 дня;

Следовательно, время стабилизации вертикального распространения нефти и нефтепродуктов по глубине грунтового массива обусловлено вязкостью нефтепродукта и крупностью песка. Так, время стабилизации вертикального распространения нефти и нефтепродуктов тем больше, чем выше вязкость нефтепродуктов и меньше крупность грунта.

Полученные результаты согласуются с выводами, представленными в исследовании [44], где изучалась глубина проникновения моторного масла в глинистый и песчаный грунты различной крупности (рисунок 2.16). Авторы [44] пришли к выводу, что скорость проникновения моторного масла в грунтовый массив обусловлена классом дисперсных грунтов: наименьшая скорость фильтрации нефтепродукта наблюдается в глинистых грунтах, в мелких песках она увеличивается и достигает максимального значения в песках средней крупности. Также в данном исследовании зафиксировано снижение скорости фильтрации с увеличением времени нефтяного воздействия.

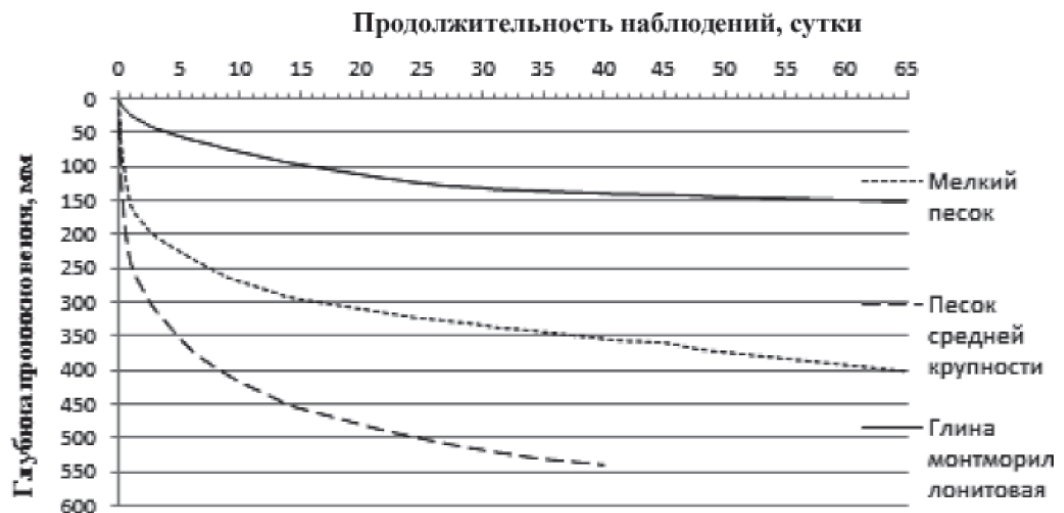


Рисунок 2.16. Изменение глубины проникновения моторного масла в песчаные и глинистые грунты [44]

К аналогичному выводу пришли в исследовании [68], зафиксировав, что глубина проникновения нефтепродуктов в грунт сильно зависит от его пористости, а также от вязкости жидкости и изменяется в широком интервале - от 1 мм в случае просачивания нефти в ил до 40 см при проникновении

бензина в гравий (рисунок 2.17).

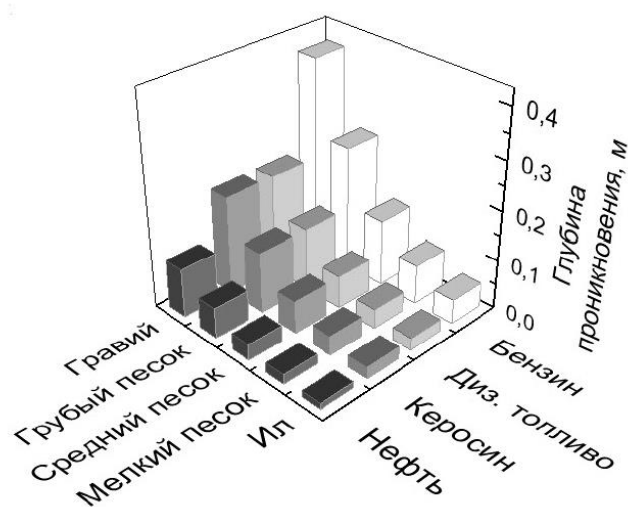


Рисунок 2.17. Глубина проникновения нефтепродуктов в различные грунты [68]

Изучение предельного значения глубины просачивания нефти и нефтепродуктов в дисперсные грунты также проводилось в работе [46], где предельная глубина просачивания бензина, керосина, дизельного топлива и нефти определялась с помощью аналитических зависимостей для песков разной крупности, песчаной морены и торфа. Авторы констатируют максимальную глубину просачивания у гравелистого песка при фильтрации бензина, минимальную – при фильтрации нефти через торф (таблица 2.9), что согласуется с полученными результатами в рамках первого этапа.

Таблица 2.9

Предельные глубины просачивания нефти и нефтепродуктов [46]

ННП	Грунт				
	песок гравелистый	песок мелкозернистый, образец 1	песок мелкозернистый, образец 2	песчаная морена	торф
Бензин АИ-92 зимний	212	203	187	152	100
Керосин	210	195	175	123	72
Дизельное топливо зимнее	194	183	162	115	48
Дизельное топливо летнее	181	177	150	105	56
Нефть легкая	164	155	139	82	25
Нефть тяжелая	158	140	115	69	2

Этап 2. Определение массовой концентрации нефтепродукта гравиметрическим методом

Результаты определения массовой концентрации нефти и нефтепродуктов гравиметрическим методом представлены на рисунке 2.18.

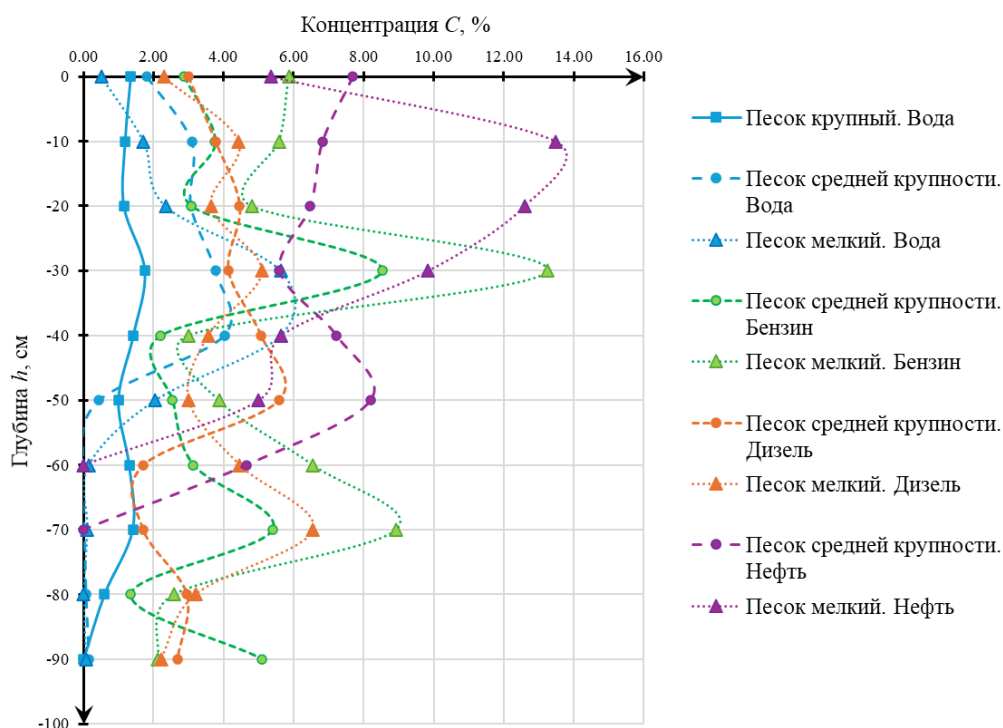


Рисунок 2.18. Распределение концентрации нефти и нефтепродуктов по глубине песчаного грунта по результатам модельных исследований в колбе Лебедева

Результаты выполненного модельного эксперимента показали отсутствие равномерного распределения нефти и нефтепродуктов по заданной глубине, что может быть обусловлено:

- наличием нефтепродукта на стенках колбы – значение массового содержания искажается за счет «пристенной» фильтрации;
- разрыхлением грунта при изъятии пробы песка через отверстие в колбе;
- незавершенностью процесса фильтрации в виду зажатых пузырьков воздуха в исследуемом объеме грунта;
- капиллярный эффект и более плотное сложение песка в нижней части колбы в совокупности с вышеописанными пунктами.

В дополнение к гравиметрическому методу определения концентрации нефти и нефтепродуктов была выполнена серия лабораторных исследований независимой аккредитованной лабораторией промышленной санитарии и экологии. Испытания проводились на приборе «Флюорат-2» модификации «Флюорат-02-5М» (рисунок 2.19), который измеряет интенсивность световых

потоков от исследуемого объекта, возникающих под действием возбуждающего оптического излучения выделенного спектрального диапазона или в результате химических реакций. Испытания проводились в соответствии с ПНД Ф 16.1:2.21-98 «Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв и грунтов флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02».

а)



б)



Рисунок 2.19. Прибор «Флюорат-2» модификации «Флюорат-02-5М»: а) прибор «Флюорат-2»; б) – подготовка к проведению лабораторных исследований.

В качестве испытуемых образцов использовался крупный песок, загрязненный нефтью и дизельным топливом. Методика подготовки образцов соответствовала методике ранее выполненных испытаний гравиметрическим методом. Результаты определения концентрации нефти и дизельного топлива для образцов крупного песчаного грунта представлены на рисунок 2.20.

Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии равномерного распределения нефти и дизельного топлива по исследуемой глубине. Также, в лабораторных исследованиях [44] было зафиксировано неравномерное распределение моторного масла в колбе схожей конструкции, высотой 50 см с мелким песком, песком средней крупности и глиной. Протоколы испытаний представлены в Приложении №2.

13. Результаты испытаний:

№ п/п	№ пробы	Рег. № образца	Отметка от дневной поверхности, см:	Определяемый показатель, ед. изм.
				Нефтепродукты, мг/кг
1	2	3	4	5
1	1 диз	03/10-07-01	-3,5	2913
2	2 диз	03/10-07-02	-13,5	3388
3	3 диз	03/10-07-03	-23,5	3144
4	4 диз	03/10-07-04	-33,5	3900
5	5 диз	03/10-07-05	-43,5	2506
6	6 диз	03/10-07-06	-53,5	4750
7	7 диз	03/10-07-07	-63,5	2631
8	8 диз	03/10-07-08	-73,5	3619
9	9 диз	03/10-07-09	-83,5	3831
10	1 неф	03/10-07-10	-3,5	12816
11	2 неф	03/10-07-11	-13,5	19188
12	3 неф	03/10-07-12	-23,5	18250
13	4 неф	03/10-07-13	-33,5	25781
14	5 неф	03/10-07-14	-43,5	36875
15	6 неф	03/10-07-15	-53,5	24344
16	7 неф	03/10-07-16	-63,5	45125
17	8 неф	03/10-07-17	-73,5	28219
18	9 неф	03/10-07-18	-83,5	29781

Рисунок 2.20. Результаты определения концентрации нефти и дизельного топлива для образцов крупного песчаного грунта на приборе Флюорат-2, выполненные ООО «ЛиК» (Лаборатория промышленной санитарии и экологии)

В условиях естественного залегания грунтов концентрация нефти и нефтепродуктов, а также глубина их просачивания зависит от механического (гранулометрического) состава грунтов, степени нарушенности их сложения, уровня подземных вод в момент загрязнения и амплитуды колебания его в течение года, перепадами порового давления, объема пролива, интенсивности излива и количества несобранной нефти, температура грунта и пролитого нефтепродукта, уровня обводненности нефти, сезона и давности разлива, уклона местности, выраженности микрорельефа, однородности физических и фильтрационных свойств грунта и т.д. [55]

Распределение нефти и нефтепродуктов по глубине грунтового массива в условиях естественного залегания грунтов обеспечивается не только за счет вертикальной фильтрации, но и за счет горизонтальной. В этой связи, изучение процесса инфильтрации нефти и нефтепродуктов в грунтовой массив с целью определения общей закономерности распространения нефти и нефтепродуктов с помощью физического моделирования является методически сложной задачей в виду необходимости имитации разнообразия всех свойств, характеристик и природных процессов в грунте в лабораторных условиях.

2.5. Выводы по главе 2

1. При загрязнении песчаного грунта нефтепродуктом наблюдаются как процессы агрегирования, т.е. перехода минеральных частиц из более мелкой фракции в более крупную, так и диспергирования, т.е. расщепления частиц на более мелкие. Наличие и интенсивность обозначенных процессов зависят от вида загрязняющего нефтепродукта и исследуемой фракции песчаного грунта, однако не приводят к классификационным изменениям крупности песка.

2. Пески средней крупности и мелкие при высоких концентрациях нефти и дизельного топлива являются слабОВОдОпроницаемыми и водонепроницаемыми в соответствии с ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация». Значительное снижение коэффициента фильтрации свидетельствует о появлении у песчаного грунта свойств связных грунтов, в связи с чем возможно длительное развитие осадки во времени в случае пролива нефтепродукта, что необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации сооружений.

3. Удельный вес песчаного грунта различной крупности при загрязнении нефтью и нефтепродуктами в концентрации от 2% до 12% снижается не более, чем на 10% в сравнении с удельным весом условно чистого (незагрязненного) грунта.

4. Глубина распространения нефти и нефтепродуктов обусловлена их вязкостью – чем выше кинематическая вязкость, тем меньше глубина их вертикального распространения. Время стабилизации вертикального распространения нефти и нефтепродуктов тем больше, чем выше вязкость нефтепродуктов и меньше крупность грунта.

5. Степень загрязнения грунтового основания нефтью и нефтепродуктами необходимо определять путем инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий, выполняемых для каждого заданного объекта с учетом особенностей геологического строения исследуемого участка и условий техногенного воздействия.

ГЛАВА 3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ПРИ ЗАГРЯЗНЕНИИ НЕФТЬЮ И НЕФТЕПРОДУКТАМИ

3.1. Методика проведения лабораторных испытаний по определению изменений механических характеристик песчаных грунтов при их загрязнении нефтью и нефтепродуктами

Испытания по определению прочностных характеристик (удельное сцепление, угол внутреннего трения), проводились методом одноплоскостного среза в соответствии с ГОСТ 12248.1-2020 «Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза» на монофракционных песчаных образцах разной крупности (рисунок 3.1).

В качестве загрязняющего нефтепродукта использовался бензин А-95, дизельное топливо и тяжелая нефть. Концентрация нефти и нефтепродуктов задавалась по массе сухого грунта и составляла $C = 2, 6$ и 12% .



Рисунок 3.1. Образец песчаного грунта, загрязненного дизельным топливом, после проведения испытания на одноплоскостной срез

Нормальное давление p на этапе предварительного уплотнения составляло $0,1; 0,2; 0,3$ МПа. Объемы нефтепродуктов (1) и воды (2), для подготовки образцов к испытанию задавались исходя из следующих выражений (рисунок 3.2):

$$V_{nn} = C \cdot V_s \cdot \frac{\rho_s}{\rho_{nn}}, \quad (1)$$

$$V_w = V_s \cdot \left(e - C \frac{\rho_s}{\rho_{nn}} \right), \quad (2)$$

где C - концентрация НП, д. е.; V_s - объем твердых частиц грунта, см^3 ; ρ_s - плотность твердых частиц грунта, $\text{г}/\text{см}^3$; ρ_{nn} - плотность НП, $\text{г}/\text{см}^3$, e - коэффициент пористости, д. е.

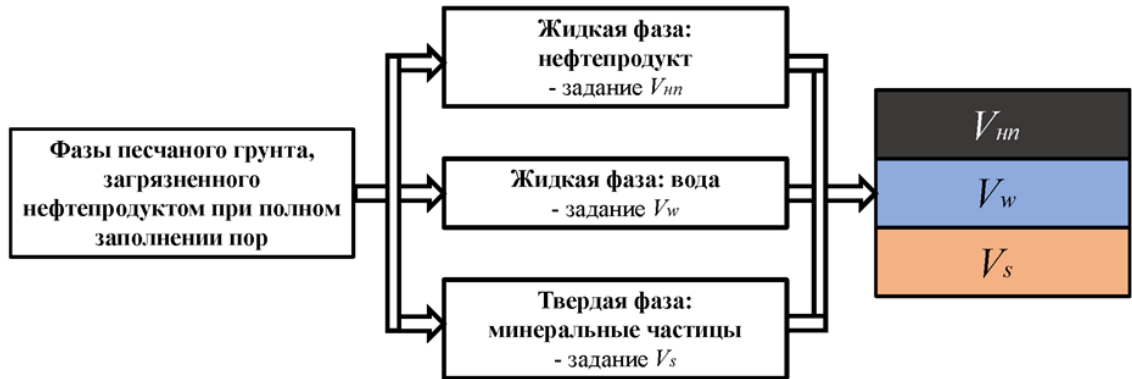


Рисунок 3.2. Этапы подготовки песчаных образцов для одноплоскостного среза

Испытания по определению деформационных характеристик песков, загрязненных нефтепродуктами, проводились методом одноосного сжатия без возможности бокового расширения в соответствии с ГОСТ 12248.4—2020 «Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия». Испытуемым образцам задавались значения влажности и концентрации нефтепродукта по массе сухого грунта в соотношении, соответствующем полному насыщению пор поровыми жидкостями, аналогично испытаниям на одноплоскостной срез. По окончании затворения песчаного грунта нефтепродуктом и водой в заданных объемах, образец перемешивался до однородности. Данные, использовавшиеся для задания необходимых влажности и концентрации при формовании испытуемых образцов, сведены в таблицу 3.1. Фотофиксация процесса формования образца представлена на рисунке 3.3.

Далее выполнялась сборка одометра с определением массы в порожнем состоянии. Одометр заполнялся песчаным грунтом, насыщенным нефтепродуктом и водой, после чего взвешивался повторно для определения

начального коэффициента пористости. Ступени нагружения для образца составляли 0,06 МПа, 0,11 МПа, 0,15 МПа, 0,18 МПа, 0,2 МПа.

Таблица 3.1

Соотношение объемов твердой и жидких фаз песчаного грунта при полном насыщении пустот поровыми жидкостями (при массе навески $m=200$ г)

Масса сухого грунта	Масса загряз.грунта	Объем сухого грунта	Плотн. грунта	Плотн. частиц грунта	Плотн. сухого грунта	Козф. порист.	Концентрация	Масса НП	Объем НП	Плотн. НП	Влажность	Масса воды	Объем воды	Плотн. воды
$m_s, \text{Г}$	$m, \text{Г}$	$V, \text{см}^3$	$\rho, \text{Г/см}^3$	$\rho_s, \text{Г/см}^3$	$\rho_d, \text{Г/см}^3$	$e, \text{Д.е.}$	$C, \%$	$m_{\text{нп}}, \text{Г}$	$V_{\text{нп}}, \text{см}^3$	$\rho_{\text{нп}}, \text{Г/см}^3$	$w, \%$	$m_w, \text{Г}$	$V_w, \text{см}^3$	$\rho_w, \text{Г/см}^3$
БЕНЗИН А-95														
200	244,53	120	2,04	2,65	1,67	0,59	0	0	0,00	0,74	22	44,53	44,53	1
200	243,11	120	2,03	2,65	1,67	0,59	2	4	5,42	0,74	20	39,11	39,11	1
200	240,26	120	2,00	2,65	1,67	0,59	6	12	16,26	0,74	14	28,26	28,26	1
200	236,00	120	1,97	2,65	1,67	0,59	12	24	32,53	0,74	6	12,00	12,00	1
ДИЗЕЛЬНОЕ ТОПЛИВО														
200	244,53	120	2,04	2,65	1,67	0,59	0	0	0,00	0,84	22	44,53	44,53	1
200	243,75	120	2,03	2,65	1,67	0,59	2	4	4,77	0,84	20	39,75	39,75	1
200	242,21	120	2,02	2,65	1,67	0,59	6	12	14,32	0,84	15	30,21	30,21	1
200	239,88	120	2,00	2,65	1,67	0,59	12	24	28,65	0,84	8	15,88	15,88	1
ТЯЖЕЛАЯ НЕФТЬ														
200	244,53	120	2,04	2,65	1,67	0,59	0	0	0,00	0,90	22	44,53	44,53	1
200	244,08	120	2,03	2,65	1,67	0,59	2	4	4,45	0,90	20	40,08	40,08	1
200	243,17	120	2,03	2,65	1,67	0,59	6	12	13,36	0,90	16	31,17	31,17	1
200	241,81	120	2,02	2,65	1,67	0,59	12	24	26,71	0,90	9	17,81	17,81	1

а)



б)

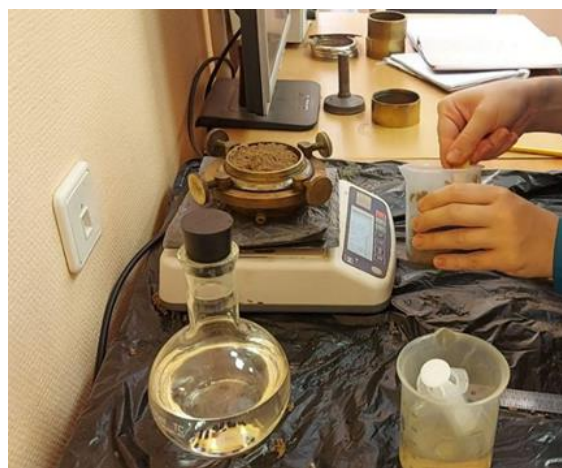


Рисунок 3.3. Процесс подготовки песчаного образца, загрязненного дизельным топливом: а) – затворение нефтепродуктом; б) – подготовка образца к испытанию.

3.1.1. Результаты выполненных лабораторных испытаний

Угол внутреннего трения

Результаты лабораторных испытаний показали, что загрязнение песчаных грунтов НП приводит к снижению угла внутреннего трения на 5 - 22% в зависимости от крупности песка, вида нефтепродукта и его концентрации (рисунок 3.4, таблица 3.2).

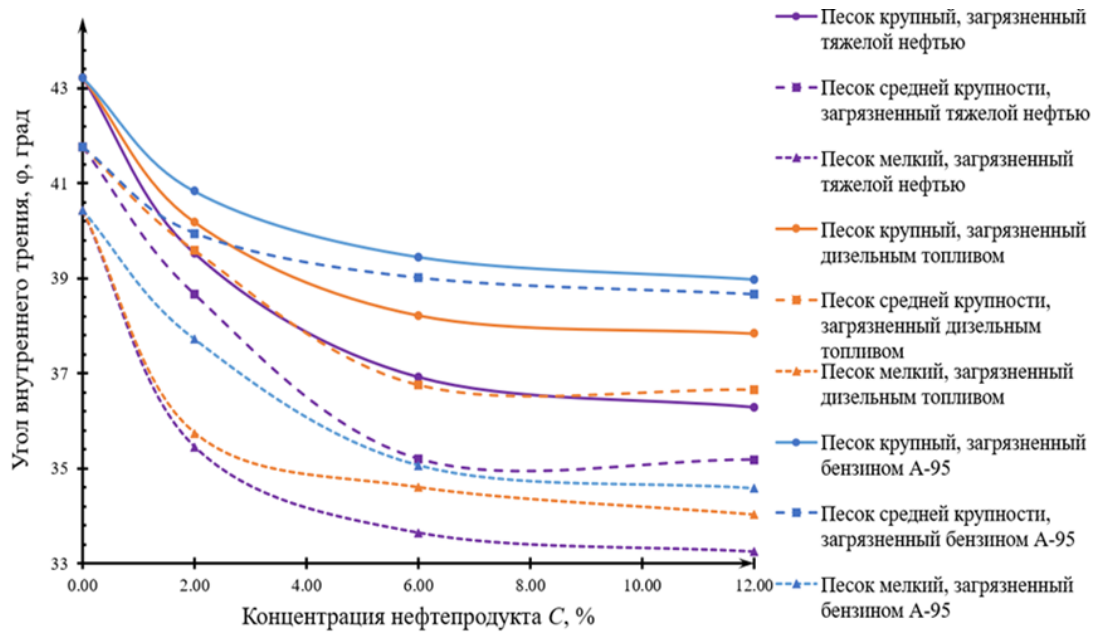


Рисунок 3.4. График зависимости угла внутреннего трения φ° от концентрации нефтепродукта $C\%$ для песков разной крупности

Таблица 3.2

Результаты лабораторных испытаний по определению угла внутреннего трения песчаного грунта при загрязнении нефтью и нефтепродуктами методом одноплоскостного среза

	Песок крупный				Песок средней крупности				Песок мелкий			
Поровое пространство заполнено тяжелой нефтью												
$C, \%$	0,00	2,00	6,00	12,00	0,00	2,00	6,00	12,00	0,00	2,00	6,00	12,00
φ°	43,23 (0%)	39,52 (9%↓)	36,91 (17%↓)	36,28 (19%↓)	41,76 (0%)	38,66 (8%↓)	35,2 (19%↓)	35,18 (19%↓)	40,42 (0%)	35,45 (14%↓)	33,65 (20%↓)	33,25 (22%↓)
Поровое пространство заполнено бензином А-95												
$C, \%$	0,00	2,00	6,00	12,00	0,00	2,00	6,00	12,00	0,00	2,00	6,00	12,00
φ°	43,23 (0%)	40,84 (6%↓)	39,45 (10%↓)	38,98 (11%↓)	41,76 (0%)	39,95 (5%↓)	39,01 (7%↓)	38,66 (8%↓)	40,42 (0%)	37,71 (7%↓)	35,06 (15%↓)	34,58 (17%↓)
Поровое пространство заполнено дизельным топливом												
$C, \%$	0,00	2,00	6,00	12,00	0,00	2,00	6,00	12,00	0,00	2,00	6,00	12,00

Φ°	43,23 (0%)	40,19 (8%↓)	38,22 (13%↓)	37,84 (14%↓)	41,76 (0%)	39,58 (5%↓)	36,75 (14%↓)	36,66 (14%↓)	40,42 (0%)	35,74 (13%↓)	34,6 (17%↓)	34,02 (19%↓)
--------------	---------------	----------------	-----------------	-----------------	---------------	----------------	-----------------	-----------------	---------------	-----------------	----------------	-----------------

Максимальное снижение угла трения наблюдается при взаимодействии с тяжёлой нефтью. При росте концентрации от 0 до 12 %, угол внутреннего трения снижается вплоть до 22 % в зависимости от крупности песка.

Минимальное снижение угла внутреннего трения наблюдается при загрязнении грунта бензином. С ростом концентрации от 0 до 12 %, угол внутреннего трения снижается вплоть до 17 % в зависимости от крупности песка.

При взаимодействии с дизельным топливом, трение между частицами снижается вплоть до 19 %. Таким образом, степень снижения угла внутреннего трения зависит от вида НП в поровом пространстве грунта и не зависит от крупности, исходя из полученных графиков, где не прослеживается определенная кучность кривых по крупности.

Удельное сцепление

Результаты лабораторных испытаний, показали, что загрязнение песчаных грунтов НП приводит к увеличению, или, в целом, к появлению удельного сцепления у грунта (рисунок 3.5, таблица 3.3).

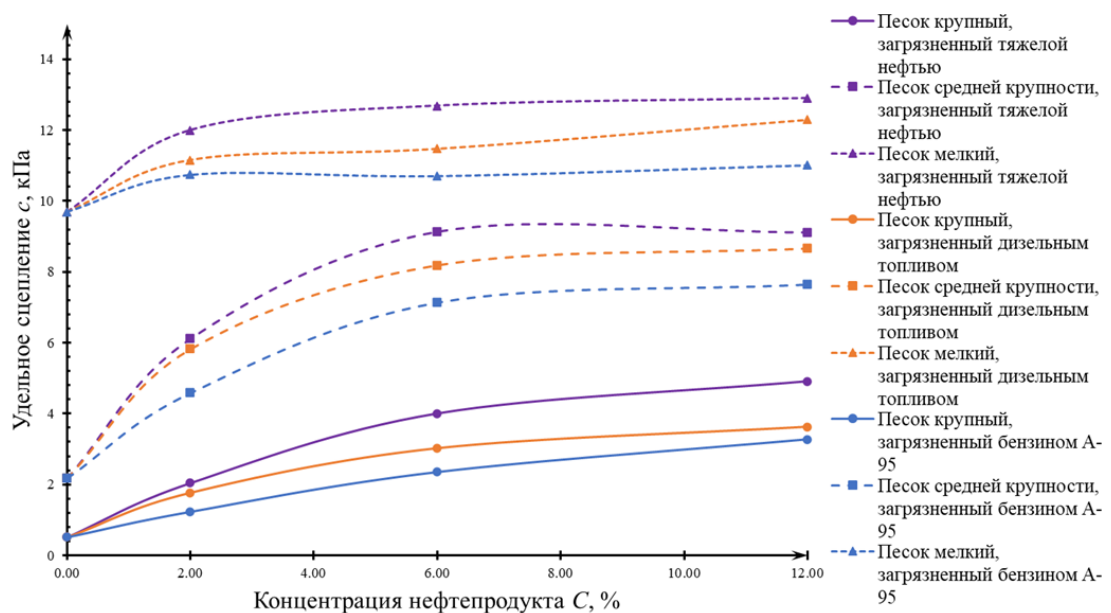


Рисунок 3.5. График зависимости удельного сцепления c , кПа от концентрации нефтепродукта C % для песков разной крупности

Таблица 3.3

Результаты лабораторных испытаний по определению удельного сцепления песчаного грунта при загрязнении нефтью и нефтепродуктами методом одноплоскостного среза

	Песок крупный				Песок средней крупности				Песок мелкий			
Поровое пространство заполнено тяжелой нефтью и водой												
<i>C, %</i>	0,00	2,00	6,00	12,00	0,00	2,00	6,00	12,00	0,00	2,00	6,00	12,00
<i>c, кПа</i>	0,51	2,04	4,01	4,92	2,18	6,12	9,14	9,12	9,69	12,00	12,69	12,90
Поровое пространство заполнено бензином А-95 и водой												
<i>C, %</i>	0,00	2,00	6,00	12,00	0,00	2,00	6,00	12,00	0,00	2,00	6,00	12,00
<i>c, кПа</i>	0,51	1,23	2,35	3,28	2,18	4,59	7,14	7,65	9,69	10,74	10,71	11,01
Поровое пространство заполнено дизельным топливом и водой												
<i>C, %</i>	0,00	2,00	6,00	12,00	0,00	2,00	6,00	12,00	0,00	2,00	6,00	12,00
<i>c, кПа</i>	0,51	1,76	3,02	3,62	2,18	5,83	8,19	8,67	9,69	11,16	11,47	12,29

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

Минимальное увеличение удельного сцепления наблюдается при загрязнении песчаного грунта бензином. С увеличением концентрации до 12% удельное сцепление увеличивается от 12% до почти 6 раз в зависимости от крупности испытуемого песка. При загрязнении дизельным топливом сцепление увеличивается более интенсивно, чем при загрязнении бензином и менее интенсивно, чем при загрязнении нефтью. Увеличивая концентрацию дизельного топлива от 0 до 12% сцепление увеличивается от 20 % (верный вариант) до 7 раз в зависимости от крупности песка.

Отметим, что у крупных песков сцепление увеличилось примерно в 6 - 10 раз; у средних – в 3- 5 раза, а у мелких – до 30%. Следовательно, интенсивность изменения удельного сцепления тем выше, чем больше крупность песка. Однако значение удельного сцепления возрастает по мере уменьшения крупности испытуемых образцов, т.е. чем меньше крупность, тем выше сцепление.

Одометрический модуль деформации

Результаты лабораторных испытаний показали, что загрязнение песчаных грунтов НП приводит к снижению одометрического модуля деформации в диапазоне от 40 до 85% в зависимости от крупности песка, вида нефтепродукта и его концентрации (рисунок 3.6, таблица 3.4.).

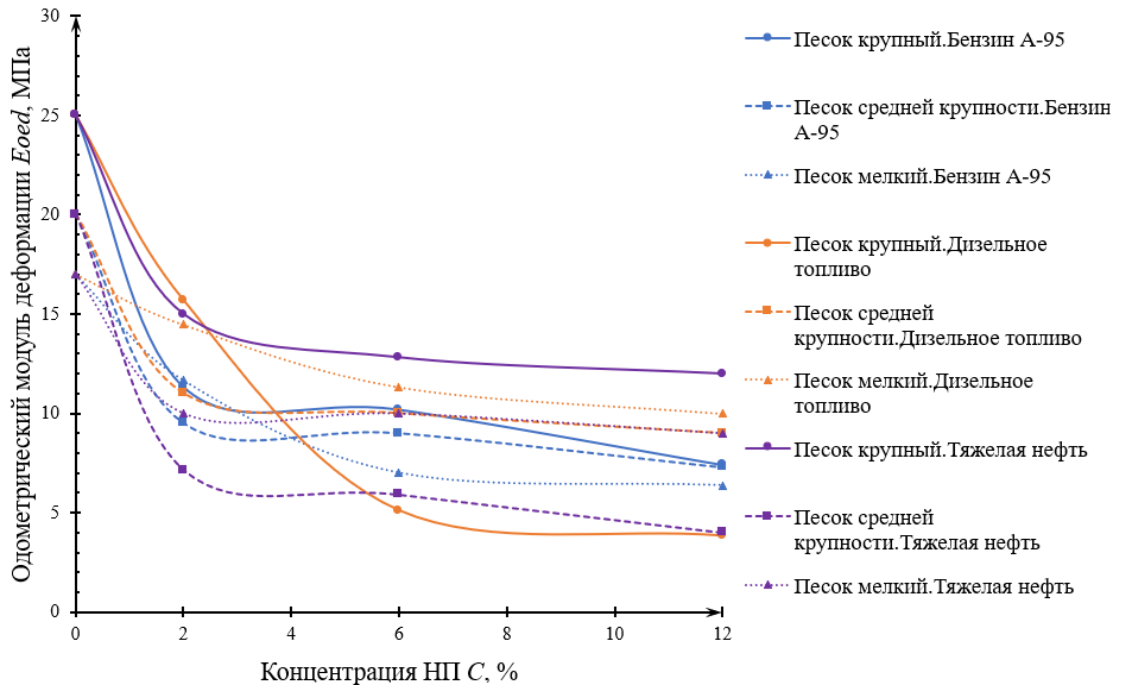


Рисунок 3.6. График зависимости изменения значений одометрического модуля деформации E_{oed} от концентрации нефтепродукта C % для песков разной крупности

Таблица 3.4

Результаты лабораторных испытаний по определению одометрического модуля деформации песчаного грунта при загрязнении нефтью и нефтепродуктами

	Песок крупный				Песок средней крупности				Песок мелкий			
Поровое пространство заполнено тяжелой нефтью и водой												
$C, \%$	0,00	2,00	6,00	12,00	0,00	2,00	6,00	12,00	0,00	2,00	6,00	12,00
$E_{oed}, \text{МПа}$	25	15	13	12	20	7	6	4	17	10	10	9
Поровое пространство заполнено бензином А-95 и водой												
$C, \%$	0,00	2,00	6,00	12,00	0,00	2,00	6,00	12,00	0,00	2,00	6,00	12,00
$E_{oed}, \text{МПа}$	25	11	10	7	20	10	9	7	17	12	7	6
Поровое пространство заполнено дизельным топливом и водой												
$C, \%$	0,00	2,00	6,00	12,00	0,00	2,00	6,00	12,00	0,00	2,00	6,00	12,00
$E_{oed}, \text{МПа}$	25	16	5	4	20	11	10	9	17	14	11	10

При загрязнении бензином для крупных песков в концентрации от 0 до 12% одометрический модуль деформации снижается вплоть до 70%; для песков средней крупности вплоть до 64%; для мелких песков вплоть до 62%.

При загрязнении дизельным топливом для крупных песков в концентрации от 0 до 12% одометрический модуль деформации снижается вплоть до 85%; для песков средней крупности – до 55%; для мелких песков – до 41%.

При загрязнении нефтью для крупных песков в концентрации от 0 до 12% одометрический модуль деформации снижается вплоть до 52%; для песков средней крупности – до 80%; для мелких песков – до 47%.

Совокупность выполненных лабораторных испытаний по определению характера и степени влияния загрязнения песчаного грунта НП на механические характеристики, позволила установить, 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 угла внутреннего трения, удельного сцепления и одометрического модуля деформации незначительно и составляет не более 10%.

3.2. Многофакторный регрессионный анализ влияния заданных факторов на интенсивность изменения прочностных характеристик песчаных грунтов

Угол внутреннего трения

Этап 1. Решение уравнения регрессии при количестве степеней свободы $t=5$

Модель множественной линейной регрессии в общем виде можно выразить как:

$$y = \sum_{i=1}^k x_i \cdot \beta_i + \varepsilon = x_1 \cdot \beta_1 + x_2 \cdot \beta_2 + \dots + x_k \cdot \beta_k + \varepsilon, \quad (1)$$

где $x_1; x_2; \dots; x_k$ – факторы, влияющие на значение функции y (предикторы);

$\beta_1; \beta_2; \dots; \beta_k$ – параметры модели (коэффициенты влияния);

ε – ошибка, распределение которой подчиняется нормальному закону с нулевым средним значением $\sum_{i=1}^k \varepsilon_i = \sum_{i=1}^k (\tilde{y}_i - y_i) = 0$ (случайная непрогнозируемая ошибка).

Запишем модель множественной линейной регрессии для рассматриваемого случая:

$$y = \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot \Delta_k + \beta_4 \cdot \Delta_c + \beta_5 \cdot \Delta_m + \varepsilon, \quad (2)$$

где:

Фактор 1 – $x_1 = C \in [0;12]$, % – независимая переменная *концентрации нефтепродукта* по массе сухого грунта, в диапазоне от 0 до 12 %;

Фактор 2 – $x_2 = \kappa \in [0.596; 49.702]$ – независимая переменная *условных вязкостей НП* в диапазоне значений от 0.596 до 49.702, вычисляемых как $\kappa = \frac{\eta_{\text{загрязнитель}}}{\eta_{\text{вода}}}$. Поскольку условная вязкость воды $\kappa = 1.000$ и кинематическая

вязкость воды $\eta \approx 1 \cdot 10^{-6}, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$, то в уравнениях с условной вязкостью κ возможно выполнять замену на кинематическую вязкость η с изменением соответствующих им коэффициентов в 10^6 раз.

Факторы 3-5 – $\Delta_k; \Delta_c; \Delta_m \in \{0;1\}$ – дискретные независимые переменные индикаторы *крупности песка* (также известные как фиктивные переменные) соответственно: крупная; средняя; мелкая, где 1 отвечает за наличие песка заданной крупности в испытании, а 0 за её отсутствие.

Учитывая, что испытания проводились для монофракционных песчаных образцов, то для крупной, средней и мелкой фракций индикаторы принимают вид:

$$\begin{cases} \Delta_k = 1 \rightarrow \Delta_c = \Delta_m = 0 \\ \Delta_c = 1 \rightarrow \Delta_k = \Delta_m = 0, \\ \Delta_m = 1 \rightarrow \Delta_k = \Delta_c = 0 \end{cases} \quad (3)$$

$\beta_1; \beta_2; \beta_3; \beta_4; \beta_5$ – параметры модели (коэффициенты влияния), учитывающие изменение угла внутреннего трения при изменении значений предикторов;

ε – случайная непрогнозируемая ошибка модели.

Тогда уравнение множественной линейной регрессии можно записать в следующем виде:

$$\tilde{\varphi} = \beta_1 \cdot C + \beta_2 \cdot \kappa + \beta_3 \cdot \Delta_{\kappa} + \beta_4 \cdot \Delta_c + \beta_5 \cdot \Delta_m, \quad (4)$$

или

$$\tilde{y} = \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot \Delta_{\kappa} + \beta_4 \cdot \Delta_c + \beta_5 \cdot \Delta_m \quad (5)$$

Далее методом наименьших квадратов определим значения коэффициентов влияния. При подстановке рассчитанных коэффициентов влияния в уравнение множественной линейной регрессии получаем:

$$\tilde{y} = -0.309 \cdot x_1 - 0.041 \cdot x_2 + 41.633 \cdot \Delta_{\kappa} + 40.664 \cdot \Delta_c + 37.971 \cdot \Delta_m, \quad (6)$$

Сравнение результатов лабораторного определения угла внутреннего трения с прогнозируемыми значениями в рамках регрессионного анализа представлено в таблице 3.5.

Таблица 3.5

Сравнение значений результатов лабораторного определения угла внутреннего трения с прогнозируемыми значениями в рамках регрессионного анализа

№ п/п	Угол внутреннего трения φ° по результатам лабораторных испытаний	Прогнозируемое значение угла внутреннего трения $\tilde{\varphi}^\circ$ при рассчитанных коэффициентах влияния	Абсолютная ошибка	Относительная ошибка
	y	\tilde{y}	$\varepsilon = \tilde{y} - y$	$\xi = \frac{\tilde{y}_i - y_i}{y_i} \cdot 100\%$
Песок крупный. Поровое пространство заполнено тяжёлой нефтью и водой				
1	43.23	41.59	-1.64	-3.79
2	39.52	38.97	-0.55	-1.40
3	36.91	37.73	0.82	2.22
4	36.28	35.88	-0.40	-1.10
Песок средней крупности. Поровое пространство заполнено тяжёлой нефтью и водой				
5	41.76	40.62	-1.14	-2.72
6	38.66	38.00	-0.66	-1.71
7	35.20	36.76	1.56	4.44
8	35.18	34.91	-0.28	-0.78
Песок мелкий. Поровое пространство заполнено тяжёлой нефтью и водой				
9	40.42	37.93	-2.49	-6.17
10	35.45	35.31	-0.15	-0.42
11	33.65	34.07	0.42	1.26
12	33.25	32.22	-1.03	-3.11
Песок крупный. Поровое пространство заполнено бензином А-95 и водой				

13	40.84	40.99	0.15	0.38
14	39.45	39.75	0.30	0.76
15	38.98	37.90	-1.08	-2.78
Песок средней крупности. Поровое пространство заполнено бензином А-95 и водой				
16	39.95	40.02	0.07	0.19
17	39.01	38.78	-0.22	-0.57
18	38.66	36.93	-1.73	-4.48
Песок мелкий. Поровое пространство заполнено бензином А-95 и водой				
19	37.71	37.33	-0.38	-1.02
20	35.06	36.09	1.03	2.94
21	34.58	34.24	-0.34	-0.99
Песок крупный. Поровое пространство заполнено дизельным топливом и водой				
22	40.19	40.99	0.80	2.00
23	38.22	39.75	1.53	4.01
24	37.84	37.90	0.06	0.16
Песок средней крупности. Поровое пространство заполнено дизельным топливом и водой				
25	39.58	39.90	0.32	0.81
26	36.75	38.67	1.91	5.21
27	36.66	36.81	0.15	0.42
Песок мелкий. Поровое пространство заполнено дизельным топливом и водой				
28	35.74	37.21	1.47	4.11
29	34.60	35.97	1.38	3.99
30	34.02	34.12	0.10	0.30

Так, выполненная модель имеет следующие характеристики:

1) Коэффициент детерминации:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \frac{161.20}{192.73} \approx 0.833, \quad (7)$$

Следовательно, 83,3 % вариации зависимой переменной объясняется вариацией независимых переменных в модели.

2) Критерий Фишера для данной модели равен:

$$F = \frac{MSR}{MSE} = \frac{\frac{SSR}{m}}{\frac{SSE}{n-m}} = \frac{\frac{SST \cdot R^2}{m}}{\frac{SSE}{n-m}} = \frac{\frac{SSE}{1-R^2} \cdot R^2}{\frac{SSE}{n-m}} = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-m}{m} = \frac{0.833}{1-0.833} \cdot \frac{30-5}{5} \approx 24.94, \quad (8)$$

где $MSR = \frac{SSR}{m}$ – средняя сумма квадратов регрессии;

$MSE = \frac{SSE}{n-m}$ – средняя сумма квадратов ошибок;

$SSR = SST \cdot R^2 = \sum_{i=1}^n (\tilde{y}_i - \bar{y})^2$ – сумма квадратов отклонений прогнозных значений \tilde{y}_i от среднего значения \bar{y} зависимой переменной;

$SST = \frac{SSE}{1-R^2} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$ – общая сумма квадратов отклонений от наблюдаемых значений y_i от их среднего значения \bar{y} ;

$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2$ – сумма квадратов отклонений наблюдаемых значений y_i от прогнозных \tilde{y}_i ;

$n = 30$ – общее число наблюдений в выборке;

$m = 5$ – число параметров в модели;

$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = 0.833$ – коэффициент детерминации.

Сравнивая полученное значение критерия Фишера с табличным значением, получим, что уравнение регрессии статистически значимо.

$$F = 24.94 > F_{табл}(\alpha; k_1 = m; k_2 = n - m) = F_{табл}(0.05; 5; 25) \approx 2.60, \quad (9)$$

3) *p-значение* составляет $2.1 \cdot 10^{-9}$, что подтверждает высокую статистическую значимость модели.

4) *Показатель средней ошибки аппроксимации:*

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \tilde{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\% \approx 2.14\%, \quad (10)$$

Следовательно, прогнозируемые значения отклоняются от фактических значений всего на 2,14 %, что свидетельствует о высокой точности уравнения.

Таблица 3.6

Регрессионный анализ параметров модели $m=5$

Предиктор	Значения коэффициентов влияния, β_i	Стандарт. ошибка	t-стат.	p-знач.	Доверительные интервалы	
					Ниж. 95%	Верх. 95%
x_1	$\beta_1 = -0.309$	0.0475	-6.51	$8.0 \cdot 10^{-7}$	-0.407	-0.211
x_2	$\beta_2 = -0.041$	0.0094	-4.38	$\frac{0.0001}{9}$	-0.061	-0.022

Δ_k	$\beta_3 = 41.633$	0.4710	88.39	$9.9 \cdot 10^{-33}$	40.663	42.603
Δ_c	$\beta_4 = 40.664$	21.2901	1.91	0.0671_9	39.650	41.589
Δ_m	$\beta_5 = 37.971$	5.2519	7.23	$1.4 \cdot 10^{-7}$	36.957	39.044

Вывод: предложенное уравнение регрессии с количеством степеней свободы $m = 5$ имеет высокий уровень доли объяснённой дисперсии и уровень статистической значимости. Однако, в соответствии с таблицей 3.6, коэффициент влияния $\beta_4 = 40.664$ имеет относительно низкое p -значение, которое не является статистически значимым при $\alpha = 0.05$ (p -значение $> \alpha = 0,05$). С целью обеспечения статистической значимости всех коэффициентов влияния выполним регрессионный анализ повторно, увеличив число степеней свободы до $m = 6$.

Этап 2. Решение уравнения регрессии при количестве степеней свободы $m=6$

Расчеты выполнялись аналогично этапу 1 с учетом дополнительной степени свободы. Результаты регрессионного анализа параметров модели $m=6$ представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7

Регрессионный анализ параметров модели $m=6$

Предиктор	Значения коэффициентов влияния, β_i	Стандартная ошибка	t-статистика	p-значение	Доверительные интервалы	
					Ниж. 95%	Верх. 95%
x_1	$\beta_1 = -1.080$	0.1301	-8.30	$1.6 \cdot 10^{-8}$	-1.349	-0.812
x_1^2	$\beta_2 = 0.058$	0.0095	6.10	$2.7 \cdot 10^{-6}$	0.038	0.078
x_2	$\beta_3 = -0.036$	0.0061	-6.00	$3.4 \cdot 10^{-6}$	-0.049	-0.024
Δ_k	$\beta_4 = 42.984$	0.3738	114.99	$2.0 \cdot 10^{-34}$	42.212	43.755
Δ_c	$\beta_5 = 42.010$	0.3745	112.19	$3.6 \cdot 10^{-34}$	41.237	42.783
Δ_m	$\beta_6 = 39.317$	0.3745	105.00	$1.8 \cdot 10^{-33}$	38.544	40.090

При подстановке коэффициентов влияния в выражение для множественной линейной регрессии получаем:

$$\tilde{y} = -1.08 \cdot x_1 + 0.058 \cdot x_1^2 - 0.036 \cdot x_2 + 42.984 \cdot \Delta_k + 42.01 \cdot \Delta_c + 39.317 \cdot \Delta_m, \quad (11)$$

Добавление степени свободы привело к изменению как коэффициента детерминации $R^2=0,935$, критерия Фишера $F=2,51$, p -значения $4.6 \cdot 10^{-13}$.

Вывод: так как коэффициент детерминации и критерий Фишера увеличились, а p -значение уменьшилось, то можно заключить, что функция при $m=6$ имеет более высокую статистическую значимость, чем уравнение с $m=5$. Влияние рассматриваемых факторов на интенсивность снижения угла внутреннего трения выражается значениями производных: в любой точке внутри заданного интервала $(0;12]$ % для концентрации и константно для вязкости – $\frac{\partial \tilde{y}}{\partial x_2} = \beta_2 = -0.036$. Наибольшее значение производной соответствует концентрации нефтепродукта, наименьшее – вязкости, таким образом, концентрация нефтепродукта имеет наибольшее влияние на угол внутреннего трения песчаного грунта, а вязкость – наименьшее. Крупность грунта ($\beta_4, \beta_5, \beta_5$) не оказала влияние на снижение угла внутреннего трения при загрязнении нефтепродуктом, так как крупность песка задавалась как фиктивный параметр, указывающий лишь на начальные значения угла внутреннего трения. Следовательно, гранулометрический состав не может рассматриваться как фактор, оказывающий влияние на изменение угла внутреннего трения песчаных грунтов, загрязненных нефтепродуктами.

Удельное сцепление

Этап 1. Решение уравнения регрессии при количестве степеней свободы $m=5$

Расчеты выполнялись аналогично этапу 1 для угла внутреннего трения. Результаты регрессионного анализа параметров модели $m=5$ представлены в табл.21. Так, построенная регрессионная модель имеет следующие характеристики:

1) **Коэффициент детерминации:**

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \frac{435.02}{456.86} \approx 0.952, \quad (12)$$

Следовательно, 95.2 % вариации зависимой переменной объясняется вариацией независимых переменных в модели.

2) **Критерий Фишера:**

$$F = \frac{MSR}{MSE} = \frac{\frac{SSR}{m}}{\frac{SSE}{n-m}} = \frac{\frac{SST \cdot R^2}{1-R^2} \cdot R^2}{\frac{SSE}{n-m}} = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-m}{m} = \frac{0.952}{1-0.952} \cdot \frac{30-5}{5} \approx 99.59, \quad (13)$$

Сравнивая полученное значение критерия Фишера с табличным значением, получим, что уравнение регрессии статистически значимо.

$$F = 99.59 > F_{табл}(\alpha; k_1 = m; k_2 = n - m) = F_{табл}(0.05; 5; 25) \approx 2.60, \quad (14)$$

3) **P-значение** составляет $1.1 \cdot 10^{-15}$, что подтверждает высокую статистическую значимость модели.

4) **Показатель средней ошибки аппроксимации:**

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \tilde{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\% \approx 15.32\%, \quad (15)$$

указывает, что, в среднем, прогнозируемые значения отклоняются от фактических значений на 15,32 %, однако при исключении точек с нулевой концентрацией показатель принимает значение 9,77 %, что свидетельствует о допустимой точности уравнения.

Таблица 3.8

Регрессионный анализ параметров модели при $m=5$

Предиктор	Значения коэффициентов влияния, β_i	Стандартная ошибка	t-стат.	p-значение	Доверительные интервалы	
					Ниж. 95%	Верх. 95%
x_1	$\beta_1 = 0.236$	0.0392	6.03	$2.7 \cdot 10^{-6}$	0.156	0.317
x_2	$\beta_2 = 0.029$	0.0078	3.69	0.00109	0.013	0.045
Δ_κ	$\beta_3 = 0.817$	0.3886	2.10	0.0457	0.017	1.617
Δ_c	$\beta_4 = 4.164$	0.4180	9.96	$3.5 \cdot 10^{-10}$	3.303	5.024

Δ_m	$\beta_5 = 8.768$	0.4347	20.97	$2.2 \cdot 10^{-17}$	7.907	9.629
------------	-------------------	--------	-------	----------------------	-------	-------

Вывод: так как коэффициент детерминации и показатель средней ошибки аппроксимации удовлетворяют требуемой точности, критерий Фишера указывает на статистическую значимость модели и значения коэффициентов влияния являются статистически достоверными при уровне значимости $\alpha = 0.05$ (р-значения $< \alpha = 0,05$), то с доверительной вероятностью 95 % можно принять полученное уравнение регрессии (таблица 3.8).

Принимаем итоговое уравнение регрессии:

$$\tilde{y} = 0.236 \cdot x_1 + 0.029 \cdot x_2 + 0.817 \cdot \Delta_k + 4.164 \cdot \Delta_c + 8.768 \cdot \Delta_m, \quad (16)$$

или

$$\tilde{c} = 0.236 \cdot C + 0.029 \cdot \kappa + 0.817 \cdot \Delta_k + 4.164 \cdot \Delta_c + 8.768 \cdot \Delta_m, \quad (17)$$

Выполним анализ эластичности принятого уравнения регрессии с количеством степеней свободы $m=5$. В случае линейной взаимосвязи зависимой переменной y и независимых предикторов x_i формула эластичности приобретает вид:

$$E_{x_i} = \beta_{x_i} \cdot \frac{\bar{x}_i}{\bar{y}}, \quad (18)$$

Так, для концентрации нефтепродукта x_1 при его среднем значении $\bar{x}_1 = 6.0$ и среднем значении удельного сцепления грунта $\bar{y} \approx 7.0$ вычислим эластичность:

$$E_{x_1} = \beta_1 \cdot \frac{\bar{x}_1}{\bar{y}} = 0.236 \cdot \frac{6.0}{7.0} \approx 0.2023, \quad (19)$$

Полученное значение можно интерпретировать следующим образом: при увеличении x_1 на 1 %, y увеличивается примерно на 0.2023 %. Эластичность для переменной вязкости x_2 при её среднем значении $\bar{x}_2 \approx 15.94$ будет равна:

$$E_{x_2} = \beta_2 \cdot \frac{\bar{x}_2}{\bar{y}} = 0.029 \cdot \frac{15.94}{7.0} \approx 0.0651, \quad (20)$$

что означает - при увеличении переменной x_2 на 1 %, y увеличивается примерно на 0.0651 %.

Степень влияния или коэффициент регрессии β_i показывает на сколько изменится зависимая переменная y при изменении независимой переменной x_i на одну единицу. Для параметра концентрации нефтепродукта x_1 коэффициент $\beta_1 = 0.236$ означает, **что при увеличении концентрации x_1 на 1 % удельное сцепление грунта y увеличится на 0,236 кПа.**

Для переменной условной вязкости нефтепродукта x_2 коэффициент $\beta_2 = 0.029$, что означает: **при увеличении x_2 на 1 удельное сцепление грунта y увеличится на 0,029 кПа.**

Вывод: наибольшее значение коэффициента влияния $\beta_1 = 0.236$ соответствует концентрации нефтепродукта, наименьшее $\beta_2 = 0.029$ – вязкости нефтепродукта, таким образом, концентрация нефтепродукта имеет наибольшее влияние на удельное сцепление песчаного грунта, а вязкость – наименьшее, что согласуется с результатами регрессионного анализа изменения угла внутреннего трения песков при их загрязнении нефтепродуктами. Крупность частиц песчаного грунта ($\beta_3, \beta_4, \beta_5$) не оказала влияния на увеличение удельного сцепления песчаных грунтов при загрязнении нефтепродуктом, так как крупность песка задавалась как фиктивный параметр, указывающий лишь на начальные значения удельного сцепления условно чистого песка.

3.3. Выводы по главе 3

1. Угол внутреннего трения песчаного грунта снижается при взаимодействии с нефтью и нефтепродуктами в диапазоне от 5 до 22% в зависимости от крупности песка, вида нефтепродукта и его концентрации. Максимальное снижение угла внутреннего трения наблюдается при загрязнении песчаного грунта тяжёлой нефтью, минимальное - при загрязнении бензином А-95.

2. Удельное сцепление песчаного грунта увеличивается в диапазоне от 12 % до 10 раз в зависимости от крупности песка, вида нефтепродукта и его концентрации. Максимальное увеличение удельного сцепления наблюдается при загрязнении песчаного грунта тяжелой нефтью, минимальное - при загрязнении бензином А-95.

3. Одометрический модуль деформации песчаного грунта снижается в диапазоне от 41 до 85% при взаимодействии с нефтью и нефтепродуктами в зависимости от крупности песка, вида нефтепродукта и его концентрации.

4. Наиболее интенсивное изменение механических характеристик песчаного грунта наблюдается при концентрации нефти и нефтепродуктов $C \leq 6\%$, 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%.

5. В рамках многофакторного регрессионного анализа влияния заданных факторов на интенсивность изменения прочностных характеристик песчаных грунтов при их загрязнении нефтью и нефтепродуктами установлено, что максимальное значение коэффициента влияния соответствует концентрации нефтепродукта, минимальное – вязкости нефтепродукта. Таким образом, концентрация нефтепродукта имеет наибольшее влияние на изменение угла внутреннего трения и удельного сцепления песчаного грунта при его загрязнении нефтью и нефтепродуктами, а вязкость – наименьшее.

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ПРИ ИХ ЗАГРЯЗНЕНИИ НЕФТЬЮ И НЕФТЕПРОДУКТАМИ НА СОСТОЯНИЕ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ ПРИ ДЕЙСТВИИ МЕСТНОГО РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННОГО ДАВЛЕНИЯ

4.1. Оценка изменения величины расчетного сопротивления песчаных грунтов основания при их загрязнении нефтью и нефтепродуктами

В соответствии с СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» при проектировании фундаментов в открытых котлованах (мелкого заложения) требуется обеспечить условие [60]:

$$p_{II} < R, \quad (4.1)$$

где p_{II} – среднее давление по подошве фундамента, кПа; R – расчетное сопротивление основания, кПа.

Расчетное сопротивление определяется по известной формуле Н.П. Пузыревского с допущением развития зон пластических деформаций грунта на глубину d (ниже подошвы фундамента), не превышающую $1/4$ ширины подошвы фундамента, т.е. $d \leq 0,25b$.

При выполнении условия (4.1) допускается линейная зависимость между напряжениями в основании проектируемого фундамента и его деформацией, что обуславливает правомерность применения одного из существующих или рекомендуемых СП 22.13330.2016 методов расчета осадки.

При определении величины R в зависимости от условий, оговоренных СП, используются справочные таблицы или расчет по формуле (4.2), согласно которой R зависит от характеристик грунта, ширины фундамента и глубины заложения подошвы фундамента.

$$R = (\gamma_{c1} \gamma_{c2} / k) [M_{\gamma} k_z b \gamma_{II} + M_q d_1 \gamma_{II}' + (M_q - 1) d_b \gamma_{II}' + M_c c_{II}], \quad (4.2)$$

где γ_{c1} и γ_{c2} – коэффициенты условий работы, принимаемые по табл. 5.4. СП 22.13330. в зависимости от разновидности грунта, жесткости сооружения и

соотношения длины сооружения или его отсека к высоте; k - коэффициент, принимаемый равным единице, если прочностные характеристики грунта (φ_{II} и c_{II}) определены непосредственными испытаниями; M_γ , M_q , M_c – коэффициенты, принимаемые по табл. 5.5. СП 22.133030. в зависимости от угла внутреннего трения φ ; k_z – коэффициент, принимаемый равным единице при $b < 10$ м; b – ширина подошвы фундамента, м.; γ_{II} – осредненное расчетное значение удельного веса грунтов, залегающих ниже подошвы фундамента, кН/м³; γ'_{II} – то же, для грунтов, залегающих выше подошвы фундамента, кН/м³; c_{II} – расчетное значение удельного сцепления грунта, залегающего непосредственно под подошвой фундамента, кПа; d_1 – глубина заложения фундаментов, м, бесподвальных сооружений от уровня планировки; d_b – глубина подвала, м.

При выполнении условия (4.1) расчета основания по первой группе предельных состояний, т.е. по устойчивости, не требуется, поскольку автоматически обеспечивается достаточный (многократный) запас основания по устойчивости. В силу этого в отечественных нормах расчет основания по второй группе предельных состояний (по деформациям) считается основным, а определение величины R является его составной частью. Это значение учитывается при определении площади подошвы проектируемого фундамента. Снижение расчетного сопротивления основания при прочих равных условиях (вертикальная осевая нагрузка на обрез фундамента, глубина заложения подошвы и т.д.) приводит к увеличению площади подошвы фундамента и, следовательно, к увеличению его стоимости. Также в соответствии с условием (4.1) величина расчетного сопротивления ограничивает диапазон допускаемых давлений на грунт основания до начала развития пластических деформаций, следовательно, снижение расчетного сопротивления может привести к изменению характера деформирования грунта и ограничить возможность применения аналитических решений.

В рамках анализа влияния изменения физико-механических свойств песчаных грунтов при их загрязнении нефтью и нефтепродуктами на состояние

песчаных грунтов основания величина R рассматривалась как один из оцениваемых параметров.

В качестве расчетного примера рассматривалась величина R при ширине фундамента $b=1\text{ м}$, с глубиной заложения подошвы фундамента $d=3\text{ м}$ 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 при изменении физико-механических свойств грунта основания.

Расчеты показали, что значения величин расчетного сопротивления грунта основания снижаются в диапазоне от 10% до почти 40 % в зависимости от крупности песка, вида нефтепродукта и его концентрации. Результаты расчетов по определению характера и степени изменения расчетного сопротивления представлены на рисунке 4.1 и сведены в таблице 4.1. Минимальное снижение расчетного сопротивления зафиксировано при загрязнении бензином и дизельным топливом вне зависимости от крупности песчаного грунта, максимальное – при загрязнении мелких песков нефтью.

Следует отметить, что при максимальном снижении расчетного сопротивления грунта среднее давление под подошвой фундамента $p=200\text{ кПа}$ не превышает R , что свидетельствует о сохранении линейного характера деформирования основания и его работе в допредельной стадии, и, как следствие, возможности применения модели прочности Мора-Кулона при численном моделировании и метода послойного суммирования для определения конечной осадки фундамента.

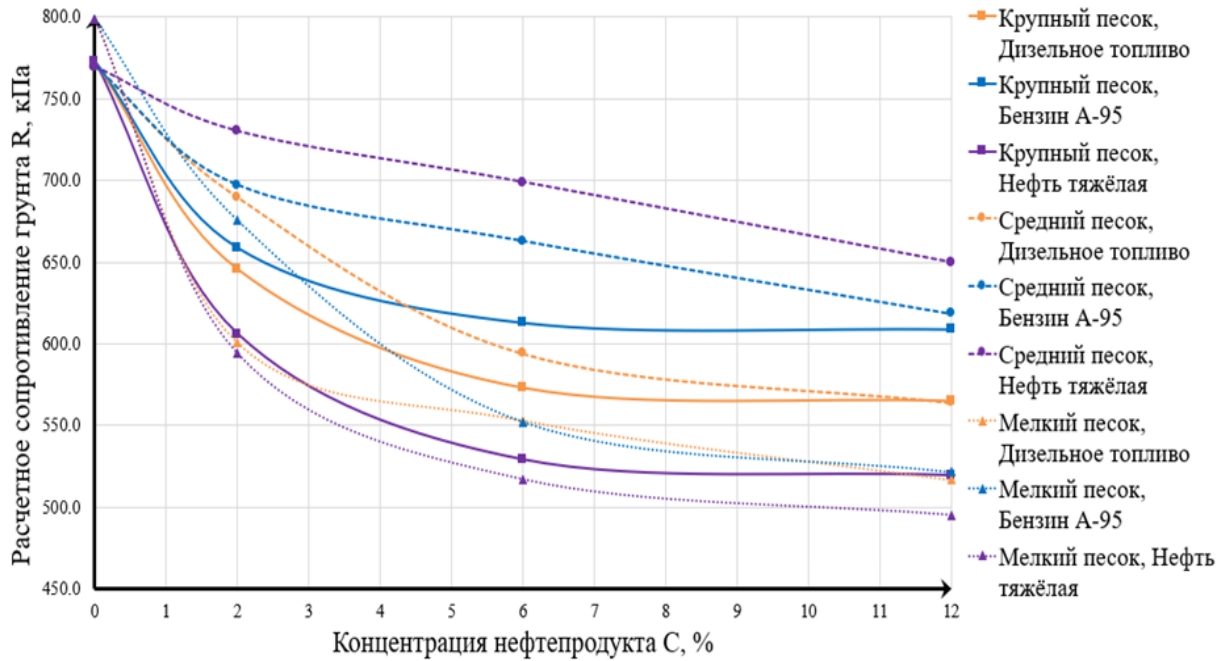


Рисунок 4.1. График зависимости значений расчетного сопротивления грунта R от концентрации нефти и нефтепродуктов C %

Таблица 4.1

Изменение расчетного сопротивления песчаных грунтов разной крупности при загрязнении нефтью и нефтепродуктами

Расчётное сопротивление грунта основания R , кПа									
Вид НП	Дизель	Бензин	Нефть	Дизель	Бензин	Нефть	Дизель	Бензин	Нефть
C , %	Крупный песок			Песок средней крупности			Мелкий песок		
0	772.7			769.4			798.9 (0 %)		
1	704.9 (9 %)	712.4 (7.8 %)	682.4 (11.7 %)	727.3 (5.5 %)	731.7 (5 %)	749.2 (2.6 %)	690.3 (13.6 %)	733.4 (8 %)	685.9 (14.1 %)
2	645.3 (16 %)	658.7 (14.8 %)	605.9 (21.6 %)	689.4 (10.4 %)	697.2 (9 %)	730.1 (5.1 %)	600.5 (24.8 %)	675.5 (15 %)	593.9 (25.7 %)
3	618.8 (20 %)	646.8 (16.3 %)	583.5 (24.5 %)	663.2 (13.8 %)	687.3 (11 %)	725 (5.8 %)	589.1 (26.3 %)	636.5 (20 %)	573.9 (28.2 %)
4	593.4 (23%)	634.8 (17.8 %)	562.9 (27.2 %)	639.1 (16.9 %)	677.5 (12 %)	719.5 (6.5 %)	577.8 (27.7 %)	600.8 (25 %)	555.4 (30.5 %)
5	582.9 (25 %)	623.7 (19.3 %)	545.8 (29.4 %)	615.9 (20 %)	670.3 (13 %)	709 (7.9 %)	565.2 (29.3 %)	576.1 (28 %)	535.7 (32.9 %)
6	572.7 (26 %)	612.9 (20.7 %)	529 (31.5 %)	593.9 (22.8 %)	663 (14 %)	698.9 (9.2 %)	553.1 (30.8 %)	552.3 (31 %)	517.1 (35.3 %)
7	571.4 (26 %)	611.3 (20.9 %)	524.5 (32.1 %)	588.2 (23.6 %)	655.7 (15 %)	692.7 (10 %)	545.8 (31.7 %)	549.7 (31 %)	513.9 (35.7 %)
8	570.1 (26 %)	609.7 (21.1 %)	520 (32.7 %)	582.5 (24.3 %)	648.4 (16 %)	686.5 (10.8 %)	538.6 (32.6 %)	547.2 (31 %)	510.7 (36.1 %)

9	568.7 (27 %)	611 (20.9 %)	521.2 (32.5 %)	577.8 (24.9 %)	634.8 (17 %)	674.4 (12.3 %)	534.8 (33.1 %)	540.7 (32 %)	507.5 (36.5 %)
10	567.3 (27 %)	612.1 (20.8 %)	522.3 (32.4 %)	573.2 (25.5 %)	621.2 (19 %)	662.5 (13.9 %)	531 (33.5 %)	534.3 (33 %)	504.4 (36.9 %)
11	566 (27 %)	610.5 (21 %)	520.8 (32.6 %)	568.6 (26.1 %)	619.9 (19 %)	656.2 (14.7 %)	523.8 (34.4 %)	528 (34 %)	499.8 (37.4 %)
12	564.7 (27 %)	608.9 (21.2 %)	519.4 (32.8 %)	564 (26.7 %)	618.5 (20 %)	649.9 (15.5 %)	516.7 (35.3 %)	521.7 (35 %)	495.3 (38 %)

Примечание: промежуточные значения R при концентрациях в диапазоне от 1 до 5% и от 7 до 11% получены методом линейной интерполяции.

- снижение R не более, чем на 15% в сравнении с условно чистым основанием;
- снижение R на 15-25% в сравнении с условно чистым основанием;
- снижение R на 26-35% в сравнении с условно чистым основанием;
- снижение R на 35-38% в сравнении с условно чистым основанием;

4.2. Оценка изменения предельного давления на песчаный грунт основания при их загрязнении нефтью и нефтепродуктами

Предельное давление p_u соответствует напряжению под подошвой фундамента, при котором происходит потеря несущей способности основания.

Анализ изменения предельного давления на грунт основания при его загрязнении нефтью и нефтепродуктами выполнялся по формуле (4.3), для центрально нагруженного жесткого фундамента шириной $b=1$ м при глубине заложения подошвы $d=3$ м с учетом возникновения под ним уплотненного ядра при полосовой нагрузке:

$$p_u = N_\gamma \gamma b / 2 + N_q \gamma' d + N_c c, \quad (4.3)$$

где N с соответствующими индексами – коэффициенты несущей способности, принимаемые в зависимости от угла внутреннего трения, γ и γ' – средний удельный вес грунта соответственно ниже и выше подошвы

фундамента; b - ширина ленточного фундамента, d - глубина заложения подошвы фундамента относительно планировочной отметки; c – удельное сцепление.

Характеристики грунта и коэффициенты несущей способности назначались в соответствии с результатами выполненных лабораторных исследований. Результаты расчетов по определению характера и степени изменения предельного давления на песчаный грунт основания при его загрязнении нефтью и нефтепродуктами представлены на рисунке 4.2 и сведены в таблице 4.2.

Результаты расчетов показали, что величина предельного давления на грунт основания снижается в диапазоне от 17% до почти 60% в зависимости от крупности песчаного грунта основания, вида нефтепродукта и его концентрации. Минимальное снижение предельного давления зафиксировано при загрязнении бензином и дизельным топливом вне зависимости от крупности песчаного грунта, максимальное – при загрязнении мелких песков нефтью.

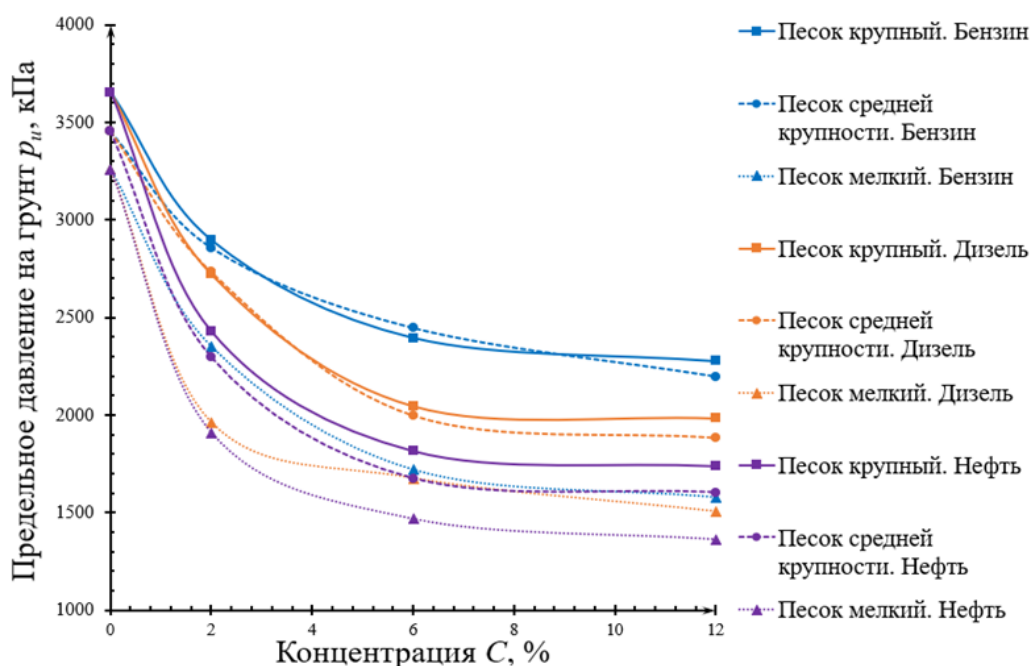





Рисунок 4.2. График зависимости значений предельного давления на грунт основания p_u от концентрации нефти и нефтепродуктов C , %

Изменение предельного давления p_u для песчаных грунтов разной крупности при загрязнении нефтью и нефтепродуктами

Предельное давление на грунт основания p_u , кПа									
Вид НП	Дизель	Бензин	Нефть	Дизель	Бензин	Нефть	Дизель	Бензин	Нефть
C, %	Крупный песок			Песок средней крупности			Мелкий песок		
0	3653,9			3453,3			3256,3		
2	2719,3 (26 %)	2895,2 (21 %)	2426,9 (34 %)	2731,4 (21 %)	2856 (17 %)	2294,1 (34 %)	1958,9 (40 %)	2347,9 (28 %)	1906,6 (41 %)
6	2045,1 (44 %)	2394,8 (34 %)	1814,4 (50 %)	1996,6 (42 %)	2445,8 (29 %)	1673,8 (52 %)	1675,1 (49 %)	1718,7 (47 %)	1466,3 (55 %)
12	1982,4 (46 %)	2275,4 (38 %)	1736,9 (52 %)	1882,3 (45 %)	2196,8 (36 %)	1602,5 (54 %)	1504,8 (54 %)	1577,4 (52 %)	1361,2 (58 %)

Примечание:

-  - снижение p_u на 15-25% в сравнении с условно чистым основанием;
-  - снижение p_u на 26-35% в сравнении с условно чистым основанием;
-  - снижение p_u на 35-58% в сравнении с условно чистым основанием;

4.3. Оценка изменения величины конечной осадки, определенной методом послойного суммирования

В соответствии с отечественными нормами, расчет осадки фундаментов предписывается выполнять, принимая расчетную схему основания в виде линейно-деформируемого полупространства (метод послойного суммирования) или линейно деформируемого слоя (метод К.Е. Егорова).

Метод линейно-деформируемого слоя применим в случаях, когда в пределах сжимаемой толщи основания залегает слой малодеформируемого грунта с модулем деформации $E > 10$ МПа, а также в случае, если фундамент имеет ширину более 10 м при модуле деформации грунтов основания $E \geq 10$ МПа.

В рамках лабораторных испытаний по определению изменения одометрического модуля деформации песчаных грунтов при их загрязнении нефтью и нефтепродуктами зафиксированы значения $E_{oed} < 10$ МПа,

следовательно для анализа изменения конечной осадки фундамента необходимо использовать *метод линейно-деформируемого полупространства (метод послойного суммирования)*, так как применение данного метода не имеет ограничений по величине модуля деформации грунта в пределах сжимаемой толщи.

Конечная осадка фундамента определялась в соответствии с выражением (4.4) для однородного основания, сложенного песками заданной крупности (крупный, средней крупности и мелкий) без учета уровня подземных вод.

$$S = \beta \sum_{i=1}^n \frac{(\sigma_{zp,i} - \sigma_{zy,i})h_i}{E_i}, \quad (4.4)$$

где β – безразмерный коэффициент, принимаемый 0,8; $\sigma_{zp,i}$ – среднее значение вертикального нормального напряжения от внешней нагрузки в i -м слое грунта по вертикали, проходящей через центр подошвы фундамента, кПа; $\sigma_{zy,i}$ – среднее значение вертикального напряжения в i -м слое грунта по вертикали, от собственного веса грунта выбранного при отрывке котлована, кПа; E_i – модуль деформации i -го слоя грунта по ветви первичного нагружения, кПа.

Среднее давление по подошве фундамента принималось $p=200$ кПа, габаритные размеры фундамента $b=1$ м, $l=10$ м, глубина заложения подошвы $d=3$ м. Модуль деформации и удельный вес назначались в соответствии с результатами выполненных лабораторных исследований. Общий модуль деформации вычислялся с учетом принятого коэффициента Пуассона $\nu=0,3$.

Результаты расчетов по определению характера и степени изменения конечной осадки фундамента при загрязнении грунтов основания нефтью и нефтепродуктами представлены на рисунке 4.3 и сведены в таблице 4.3.

Результаты расчетов показали, что при загрязнении крупного песчаного грунта нефтью и нефтепродуктами осадка фундамента увеличивается в

сравнении с осадкой фундамента на основании из незагрязненного песка вплоть до 8 раз; песчаного грунта средней крупности – в 6,5 раз; мелкого песчаного грунта – в 4 раза в зависимости от вида нефтепродукта и его концентрации.

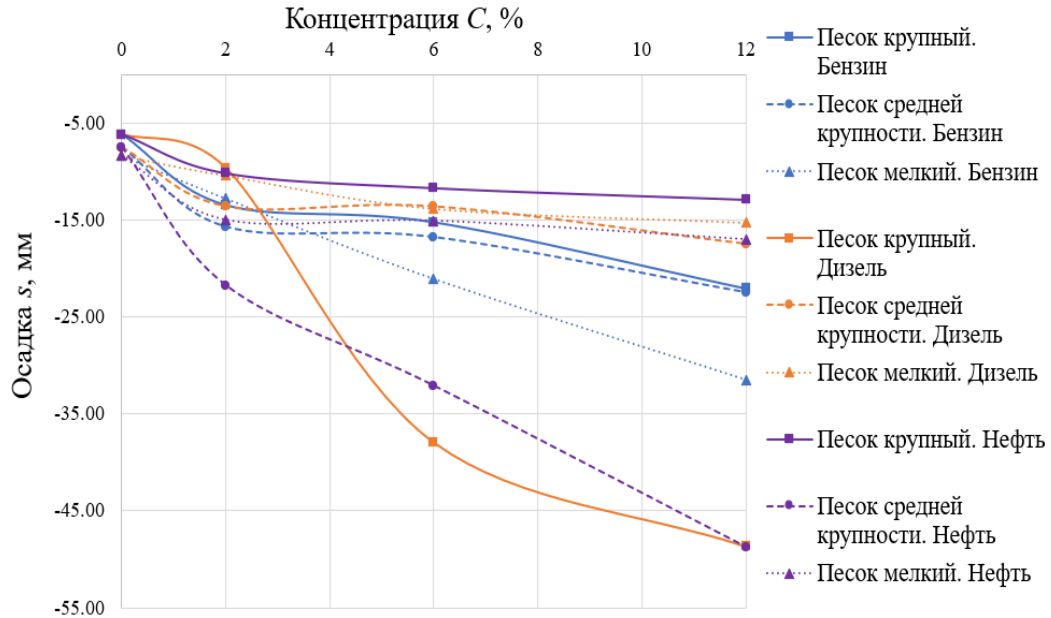


Рисунок 4.3. График зависимости конечной осадки S ленточного фундамента от концентрации нефти и нефтепродуктов C (%)



Таблице 4.3

Изменение конечной осадки фундаментов на песчаном основании при загрязнении нефтью и нефтепродуктами

Конечная осадка фундамента S , мм									
Вид НП	Дизель	Бензин	Нефть	Дизель	Бензин	Нефть	Дизель	Бензин	Нефть
C , %	Крупный песок			Песок средней крупности			Мелкий песок		
0	6,16			7,50			7,35		
2	9,65 (1,5 раза)	13,46 (2 раза)	10,20 (1,5 раза)	13,61 (2 раза)	15,72 (2 раза)	21,75 (3 раза)	10,42 (1,4 раза)	12,81 (1,7 раза)	14,99 (2 раза)
6	37,92 (6 раз)	15,23 (2,5 раза)	11,72 (2 раза)	13,62 (2 раза)	16,79 (2,2 раза)	32,09 (4 раза)	13,82 (1,9 раза)	21,10 (3 раза)	15,08 (2 раза)
12	48,64 (8 раз)	22,06 (4 раза)	12,92 (2 раза)	17,48 (2,3 раза)	22,48 (3 раза)	48,71 (6,5 раз)	15,25 (2 раза)	31,52 (4 раза)	17,00 (2,3 раза)

Примечание:

- увеличение осадки фундамента S не более, чем в 2 раза в сравнении с осадкой на условно чистом основании;

-  - увеличение осадки фундамента S в 2-5 раз в сравнении с осадкой на условно чистом основании;
-  - увеличение осадки фундамента S в 6-8 раз в сравнении с осадкой на условно чистом основании;

4.4. Прогноз фильтрационной консолидации песчаных оснований при загрязнении нефтью и нефтепродуктами

Опыт эксплуатации зданий и сооружений свидетельствует о длительном времени развития осадок после окончания строительства. Наибольшая длительность затухания осадок сооружений присуща глинистым грунтам, в то время как осадка фундаментов на песчаных основаниях завершается значительно быстрее, как правило, к моменту завершения строительства. Известно, что время стабилизации осадки обусловлено скоростью отжатия свободной воды из порового пространства грунта под действием внешней нагрузки. Рассматривая процесс фильтрационной консолидации опосредованно от интенсивности действующей нагрузки, время стабилизации осадки будет зависеть от водопроницаемости грунта (коэффициента фильтрации k_f) и его сжимаемости (коэффициента относительной сжимаемости m_v).

Результаты лабораторных исследований фильтрационных характеристик грунта показали, что пески средней крупности и мелкие при загрязнении дизельным топливом и нефтью в концентрации $C=10$ и 12% могут быть классифицированы как слабоводопроницаемые или водонепроницаемые в соответствии с ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация». В рамках исследования одометрического модуля деформации зафиксировано его снижение в диапазоне от 41 до 85% в зависимости от крупности песка, вида нефтепродукта и его концентрации.

Таким образом, фильтрационные свойства песчаного грунта при загрязнении нефтью и нефтепродуктами сопоставимы со связными грунтами, что свидетельствует о необходимости прогноза фильтрационной консолидации

грунтового основания ввиду возможности значительного увеличения времени стабилизации осадки.

Расчетный прогноз фильтрационной консолидации выполнялся для однородного песчаного основания заданной крупности в случае его загрязнения нефтью и нефтепродуктами с учетом снижения фильтрационных свойств грунта и увеличения коэффициента относительной сжимаемости. При этом, интенсивность действующего равномерно распределенного давления принималась равной $p=200$ кПа, толщина деформируемого слоя – $h=5$ м. Результаты проведенных расчетов по определению коэффициента консолидации c_v и времени стабилизации осадки представлены в таблице 4.4. и в Приложении №3.

Таблица 4.4.

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, принятой как удельный вес воды $\gamma_w=10$ кН/м³;

Коэффициент консолидации $c_{v,max}$ определен при удельном весе поровой жидкости, принятой как удельный вес нефти и нефтепродуктов.

Установлено, что при загрязнении бензином время стабилизации осадки не превышает 1 года вне зависимости от крупности грунта и концентрации нефтепродукта.

При загрязнении дизельным топливом крупных песков и песков средней крупности время стабилизации осадки не превышает 1 года, а при загрязнении мелких песков дизельным топливом в концентрации $C=12\%$ время стабилизации увеличивается вплоть до 13 лет.

При загрязнении нефтью крупных песков и песков средней крупности время стабилизации осадки не превышает 1 года, а при загрязнении мелких песков нефтью в концентрации $C=2-12\%$ время стабилизации составляет от 6 до 17,5 лет соответственно.

4.5. Сравнительный анализ результатов определения конечной осадки аналитическим и численным методом в ПК PLAXIS.

Численное моделирование напряженно-деформированного состояния однородного песчаного основания заданной крупности, загрязненного нефтью и нефтепродуктами, выполнялось с использованием упругопластической 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 для случая стальных вертикальных цилиндрических резервуаров типа РВС принимался их диаметр равным $D=50$ м. В качестве исходных данных использовались значения физико-механических характеристик грунта, полученные по результатам выполненных лабораторных испытаний.

Сравнительный анализ показал, что в случае, когда основание сложено крупным песком численный метод (МКЭ) дает большее значение осадки в сравнении с результатами расчетов аналитическим методом послойного суммирования, в то время как для оснований, сложенных песком средней крупности и мелким, величина осадки, рассчитанная аналитически, получается выше, чем при численном методе. Сходимость результатов по аналитическому и численному методам 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 грунтов основания. Так, например, метод послойного суммирования не учитывает возможность развития пластических деформаций более, чем на глубину $0,25b$, а также изменение, и наличие прочностных характеристик грунта при загрязнении НП, в частности снижение угла внутреннего трения на 5-22%, сопровождающееся увеличением удельного сцепления у песков средней крупности и мелких вплоть до 13 кПа, а у крупного песка – до 5 кПа. Диапазоны рассчитанных изменений прочностных характеристик песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5

Диапазоны изменений прочностных характеристик песчаных грунтов при загрязнении нефтью и нефтепродуктами

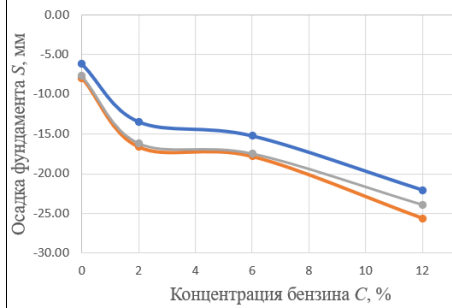
Наименование грунта	Прочностные характеристики грунта	
	Снижение угла внутреннего трения φ , % в сравнении с условно чистым песчаным грунтом	Увеличение удельного сцепления c , кПа
Крупный песок	Снижение на 6-16%	От 0,5 до 5 кПа
Песок средней крупности	Снижение на 5-16%	От 2 до 9 кПа
Мелкий песок	Снижение на 7-22%	От 9 до 13 кПа

Таким образом, принимая во внимание результаты расчетов следует отметить, что при наличии у песчаного грунта, загрязненного нефтью и нефтепродуктами свойств, характерных для связных грунтов (у песков средней крупности и мелких), таких как низкая водопроницаемость и наличие удельного сцепления (при схожем уровне снижения φ) аналитический метод расчета будет давать бóльшие значения осадок, чем МКЭ, при условии практически 100% сходимости численного и аналитического методов определения конечной осадки незагрязненного песчаного основания.

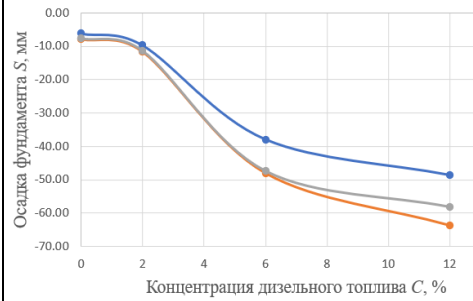
Графики зависимости конечной осадки S (мм) фундамента на песчаных основаниях разной крупности от концентрации нефти и нефтепродуктов представлен на рисунке 4.4.

а) Основание сложено крупным песком

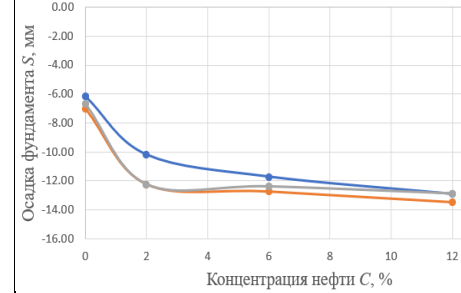
НП - бензин



НП - дизельное топливо

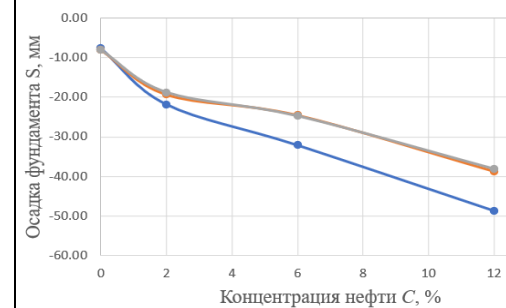
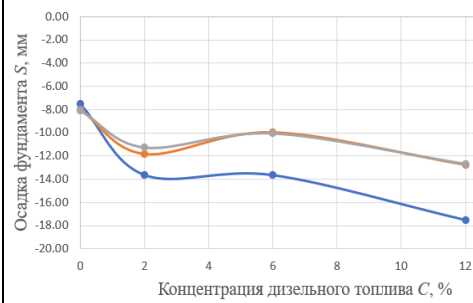
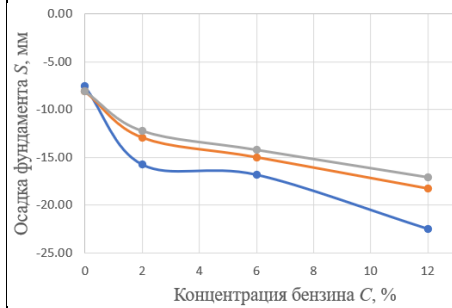


НП - нефть



- Метод послойного суммирования
- ЧМ (осесим.)
- ЧМ (плоск.)

б) Основание сложено песком средней крупности



в) Основание сложено мелким песком

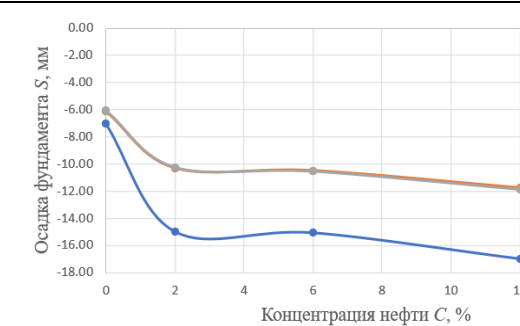
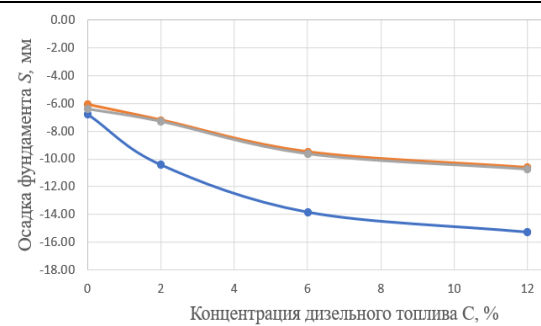
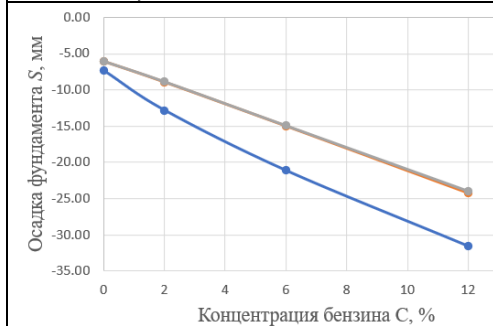


Рисунок 4.4. График зависимости конечной осадки S (мм) фундамента от концентрации НП (%) а) – для крупного песчаного грунта; б) – для песчаного грунта средней крупности; в) – для мелкого песчаного грунта

4.6. Анализ развития дополнительных неравномерных осадок фундаментов резервуаров при локальном загрязнении основания нефтью и нефтепродуктами с использованием численного метода

При проектировании оснований резервуаров основное внимание уделяется неравномерным осадкам по периметру. Эти осадки вызывают крены, изменения геометрических размеров в радиальном направлении и дополнительные напряжения в стенке резервуара. Радиальные деформации стенок приводят к образованию овальности в сечении резервуара, что нарушает работу герметизирующих устройств в резервуарах с плавающей крышей. В резервуарах со стационарной кровлей увеличение напряжений в стенке может привести к ее разрыву и значительным потерям содержащегося внутри емкости продукта. Практика показывает, что значительная овальность резервуара может возникать не только вследствие плавного изменения неравномерных осадок по периметру, но и в результате локальных оседаний отдельных участков периметра [40].

По результатам исследований проф. Землянского А.А. [34] более 46% всех аварий вертикальных резервуаров произошли по причине развития неравномерных осадок основания.

Таблица 4.6

Классификация доминирующих причин разрушения резервуаров [34]

Наименование доминирующих причин аварий резервуаров	Процент повторения
Недопустимо большие и неравномерные осадки грунтового основания	>46%
Концентрация напряжений в несущих конструкциях из-за несовершенства конструкции резервуаров и технологии их возведения	>21%
Наличие низкочастотной вибрации и неравномерного нагружения плавающих крыш снеговой нагрузкой	<18%

Наличие дефектов в материале и конструкции РВС	>9%
Нарушение технологии изготовления и возведения РВС	>5%
Ошибки в расчетах по II группе ПС	<1%

Отметим, что представленные статистические данные получены на основании результатов натурных, априорных и литературных исследований и наблюдений более, чем на 200 аварийных резервуарах. Также неравномерная осадка, как одна из основных причин аварий резервуаров, приводится в работах Сотникова С.Н., Мангушева Р.А., Городновой Е.В., Буренина В.А., Коновалова П.А. и др. [18,28,40,49-51].

Наиболее полно неравномерные осадки могут быть оценены с помощью следующих параметров (рисунок 4.5) [40]:

- $S_{p,i}$ - осадки точки i , находящейся на периметре резервуара, определяемая вертикальным ее перемещением начиная с момента окончания монтажа резервуара, м;

- $\Delta S_{i,j}$ – разность осадок между двумя точками i и j , м;
- $l_{i,j}$ – расстояние по периметру резервуара между точками i и j , м;
- δ – разность двух диаметрально противоположных точек резервуара, м;
- z_i – часть осадки точки i за счет равномерного крена, м;
- ΔS_i – часть осадки точки i по отношению к плоскости равномерного крена, м;

крена, м;

- $\Delta S = S_i - 0,5 (S_{i+1} + S_{i-1})$ – прогиб отдельного участка на периметре резервуара, м;

- $\Delta S_{\max} = S_i - 0,5 (S_{i-n/4} + S_{i-n/4})$ – максимальный прогиб участка резервуара равного $1/4$ части его периметра, м;

- $\Delta S_{i,j} / l_{i,j}$ – уклон наклона участка резервуара между точками i и j ;
- $i = \delta / D$ – равномерный относительный крен резервуара.

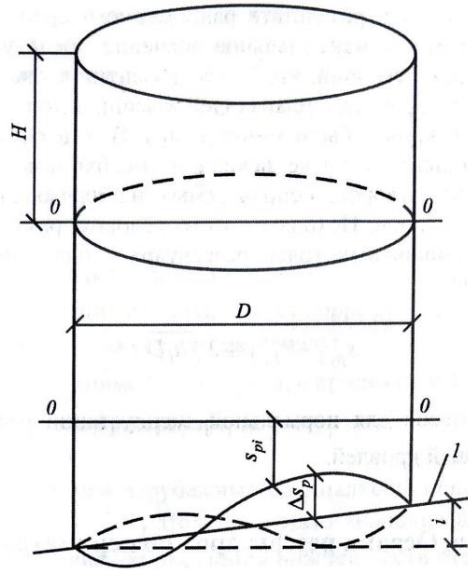


Рисунок 4.5. Неравномерные осадки резервуара по периметру (i -плоскость равномерного крена) [40]

Разнообразие критериев, описывающих неравномерные осадки резервуара по периметру, вызывает разногласия среди специалистов относительно их полноты и точности в оценке поведения резервуара при таких деформациях. Одни исследователи отдают предпочтение параметрам, характеризующим изменение геометрических размеров резервуара по сравнению с исходными, в то время как другие акцентируют внимание на влиянии неравномерных осадок на формирование дополнительных напряжений в конструкции резервуара.

Несмотря на разнообразие существующих научно-обоснованных критериев неравномерности осадки резервуаров в отечественном нормативно-техническом регламенте предусмотрены только два:

- разность осадок в двух смежных точках, расположенных на расстоянии 6 м друг от друга в соответствии с табл. П.4.3, РД-08-95-95 «Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов»;

- разность осадок под центральной частью и под стеной (не более $0,003R$, где R -радиус резервуара) в соответствии с п.6.1.22, СП 43 «Сооружения промышленных предприятий».

Также п.6.1.22, СП 43 «Сооружения промышленных предприятий» предписывает ограничивать разность отметок любых других точек, находящихся на наружном контуре днища, например двух диаметрально противоположных точек или точек, находящихся на расстоянии более 6 м друг от друга.

С учетом обозначенной актуальности исследования неравномерной осадки, как одного из параметров, определяющих длительную и безаварийную эксплуатацию резервуаров, необходимо иметь представление о возможном развитии дополнительной неравномерной осадки в случае локального загрязнения основания нефтью и нефтепродуктами ввиду изменения физико-механических характеристик грунтов.

Оценка возможности развития неравномерных дополнительных осадок, превышающих предельные значения, при локальном изменении свойств грунтов, выполнялась с помощью численного моделирования в ПК PLAXIS 3D (рисунок 4.6-4.7).

Исходные данные

Диаметр резервуара (наружный) – 50 м;

Вместимость резервуара – 20 000 м³;

Высота стенки резервуара – 13 м;

Толщина стенки – 12-27 мм;

Площадь резервуара ≈ 2000 м²;

Глубина заложения подошвы кольцевого ленточного фундамента – 3 м;

Ширина ленты – 1 м;

Среднее давление под подошвой фундамента – 200 кПа;

Габаритные размеры пятна загрязнения – 24x27 м;

Площадь пятна загрязнения – 648 м²;

Глубина просачивания нефти и нефтепродуктов – 3 м, 5 м, 7 м.

Основание – однородное песчаное, сложенное крупным, мелким и песком средней крупности без учета уровня подземных вод.

Физико-механические характеристики загрязненного грунтового основания принимались по результатам выполненных лабораторных исследований (см. главы 2 и 3) при концентрации нефтепродуктов $C=12\%$.

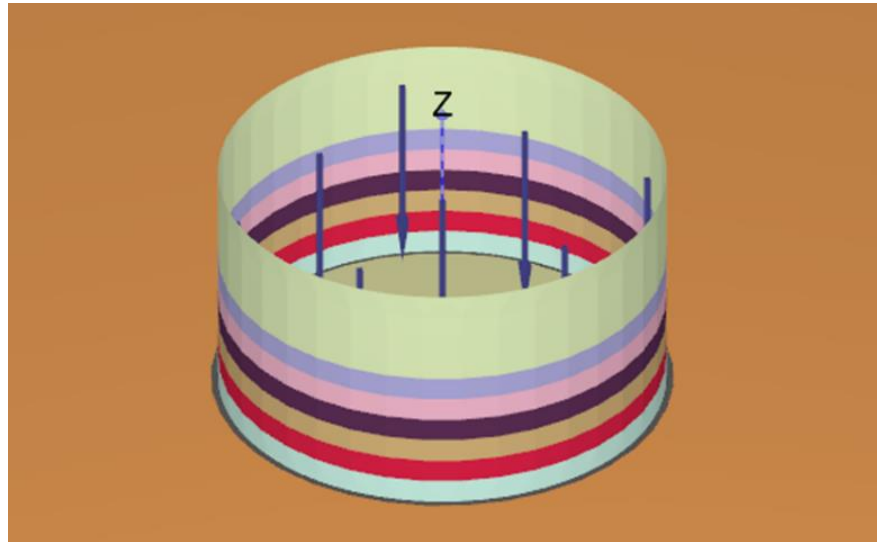


Рисунок 4.6. Конструкция резервуара с учетом изменения толщины стенки по высоте (цветами указаны толщины стенки резервуара по высоте – сверху вниз от 12 до 27 мм.)

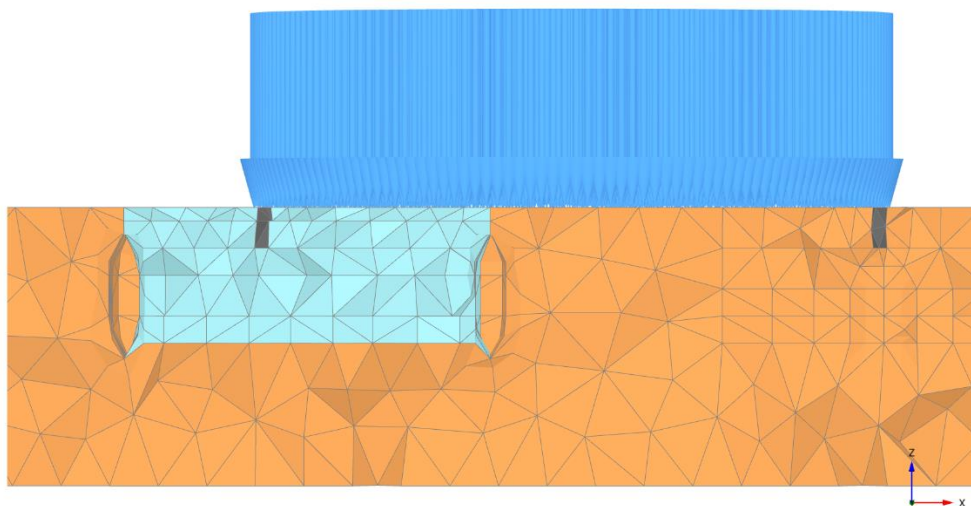


Рисунок 4.7. Конечно-элементная схема расположения зоны загрязненного грунта под резервуаром

Критерии оценки неравномерных осадок

В современных нормах и правилах строительного проектирования резервуаров предельная неравномерность осадки определяется двумя параметрами – объемом резервуара и длительностью периода его эксплуатации. При этом, чем дольше резервуар находится в эксплуатации и чем больше его вместимость, тем более низкие требования предъявляются к разности отметок наружного контура днища (см. таблицу 4.7).

С учетом требований РД-08-95-95 и СП 43 в рамках численного моделирования были приняты следующие критерии для оценки неравномерности осадки:

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

Предельные отклонения наружного контура днища от горизонтали представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7

Предельные отклонения наружного контура днища от горизонтали для резервуаров, эксплуатируемых от 5 до 20 лет (в скобках приведены предельные отклонения для резервуаров, эксплуатируемых свыше 20 лет)

Объем резервуара, м ³	Разность отметок наружного контура днища, мм			
	Незаполненного резервуара		Заполненного резервуара	
	Смежных точек на расстоянии 6 м по периметру	Любых других точек	Смежных точек на расстоянии 6 м по периметру	Любых других точек
Менее 700	13 (20)	33 (50)	26 (40)	52 (80)
700-1000	20 (30)	52 (80)	39 (60)	78 (120)
2000 - 5000	26 (40)	65 (100)	52(80)	104 (160)
10 000-20 000	20 (30)	59 (90)	46 (70)	98 (150)
30 000-50 000	39 (60)	78 (120)	65 (100)	130 (200)

Примечание: цветом выделены принятые предельные значения неравномерности осадки для резервуара, эксплуатируемого от 5 до 20 лет.

Результаты численного моделирования

Результаты численного моделирования с целью оценки возможности развития сверх предельных значений неравномерных осадок при локальном загрязнении грунтового основания нефтью и нефтепродуктами показали следующее и, в сводном виде, представлены в таблице 4.8:

- 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. Неравномерность осадки составила от 3 до 20 мм в зависимости от крупности песчаного основания и вида нефтепродукта, в то время как для двух смежных точек допустимо 46 мм, для двух диаметрально противоположных точек - 98 мм, а для точек «центр-периметр» - 75 мм.

- При глубине распространения нефти и нефтепродуктов равной 5 м;

Неравномерность осадки фундамента в пределах загрязненной зоны *превышает предельное значение* для основания, сложенного крупным песком дизельным топливом и нефтью по критерию $\Delta S_{\text{ц.-п.}}$ (центр-периметр). В данном случае расчетное значение неравномерности составило 84 и 85 мм при загрязнении дизельным топливом и нефтью соответственно, что превышает предельное значение на 9-10 мм. 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 $\Delta S_{\text{с}}$ (смежные) выявлено превышение предельного значения неравномерности осадки фундамента при загрязнении дизельным топливом для песчаных оснований всех крупностей. Для крупного песчаного основания и основания средней крупности превышение составило 6 мм, для мелкого песчаного основания 10 мм.

По критерию $\Delta S_{д.п.}$ (диам.п) выявлено превышение предельного значения *неравномерности осадки* фундамента при загрязнении всеми видами нефтепродуктов, в частности для крупного песчаного основания при загрязнении дизельным топливом и нефтью на 75 мм и 2 мм соответственно; песчаного основания средней крупности - дизельным топливом на 22 мм и для мелкого песчаного основания на 17 мм и 12 мм при загрязнении бензином и дизельным топливом соответственно.

По критерию $\Delta S_{ц.п.}$ (центр-периметр) выявлено превышение предельного значения на 21-98 мм для крупного песчаного основания при загрязнении всеми видами нефтепродуктов; для песчаного основания средней крупности на 45мм при загрязнении дизельным топливом и для мелкого песчаного основания на 35-40 мм при загрязнении бензином и дизельным топливом. Характерная *неравномерная осадка* фундаментов при активации зоны загрязнения в ПК PLAXIS 3D представлена на рисунке 4.8.

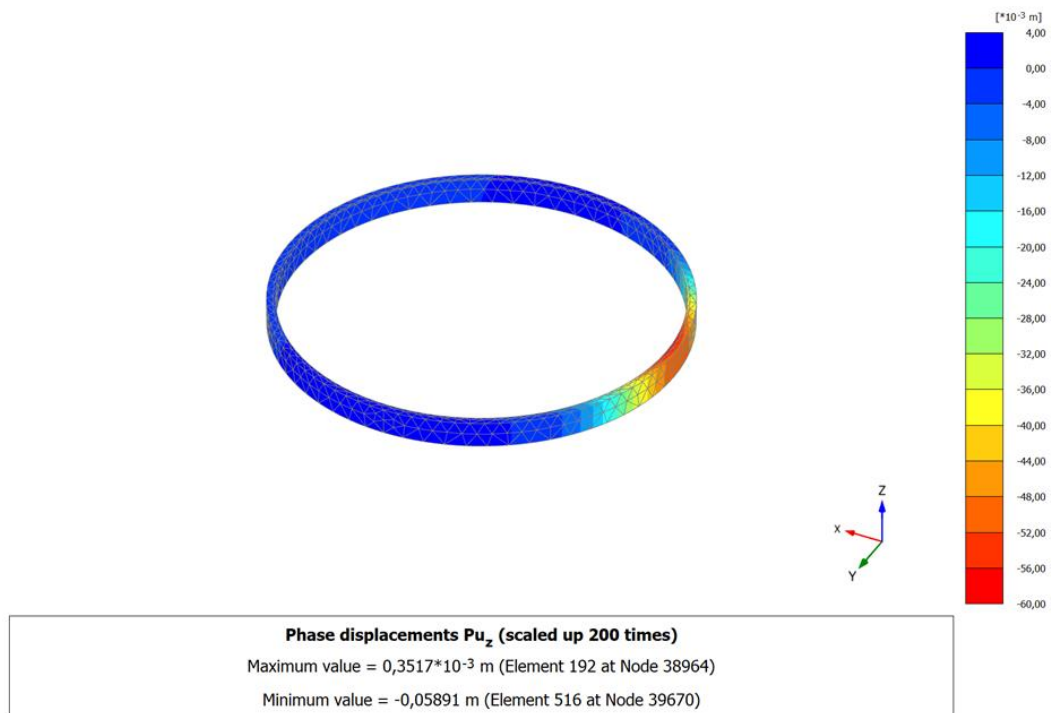
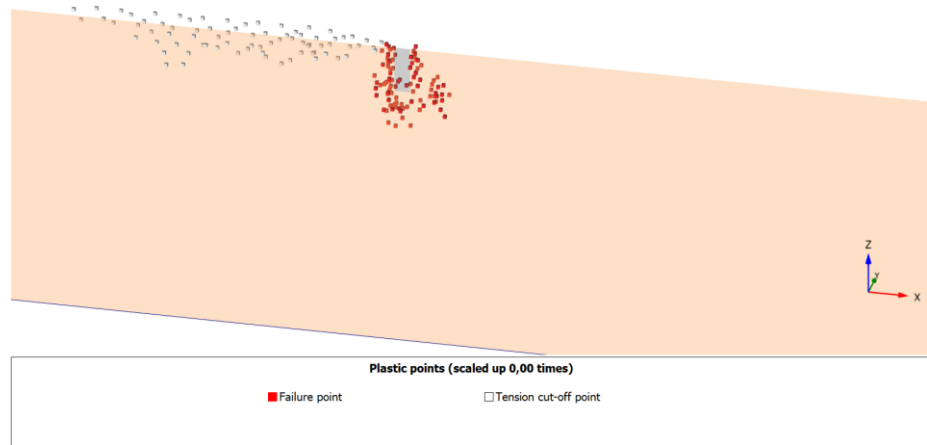


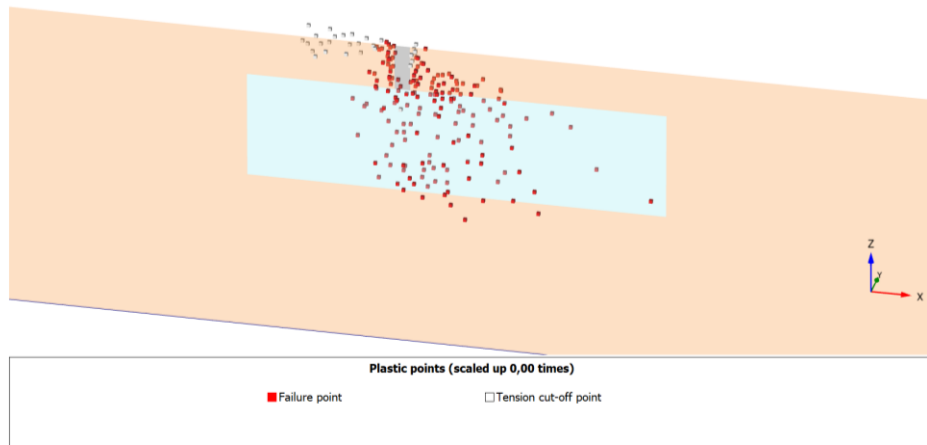
Рисунок 4.8. Характерная *неравномерная осадка* фундаментов при активации зоны загрязнения в ПК PLAXIS 3D

Также в ходе численного моделирования были зафиксированы зоны развития пластических деформаций грунта в области загрязнения нефтью и нефтепродуктами. Отметим, что область развития пластических деформаций практически не меняется в зависимости от вида пролитого нефтепродукта и ограничивается габаритными размерами пятна загрязнения, в том числе глубиной. Области развития пластических деформаций при локальном загрязнении основания нефтью и нефтепродуктами представлено на рисунке 4.9.

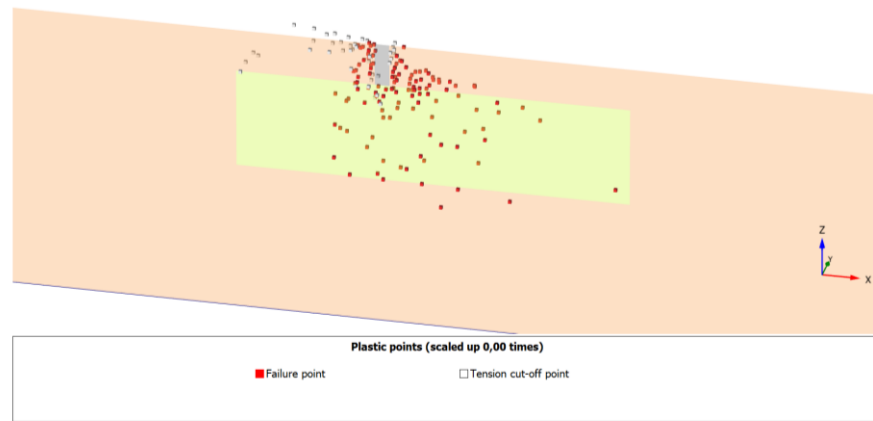
а)



б)



в)



г)

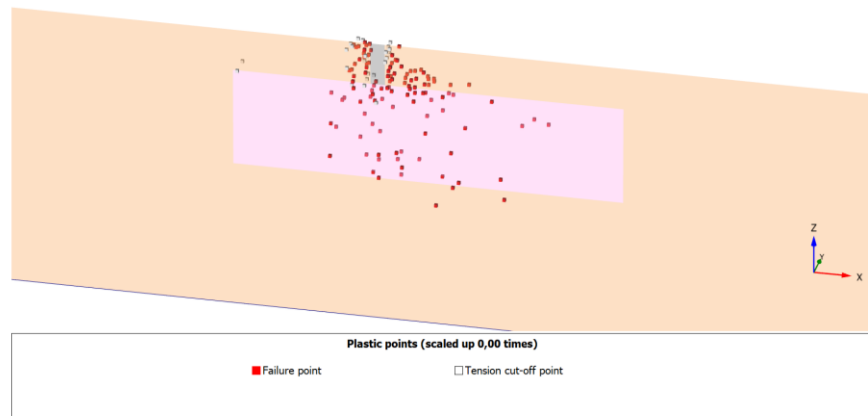


Рисунок 4.9. Зоны развития пластических деформаций а) – при нормальной эксплуатации (без загрязнения); б) – при локальном загрязнении грунта на 7 м дизельным топливом; в) – нефтью; г) – бензином.

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

При глубине просачивания 3 м									
Критерий оценки	Крупный песок			Средней крупности			Мелкий песок		
	Наименование нефтепродукта								
	Бензин	ДТ	Нефть	Бензин	ДТ	Нефть	Бензин	ДТ	Нефть
ΔS_c (смежные), ММ	11	6	9	0	3	6	9	16	13
$\Delta S_{д.п.}$ (диам.п), ММ	8	20	12	2	6	14	18	13	16
$\Delta S_{ц.-п.}$ (центр-периметр), ММ	8	20	12	2	6	14	18	13	16
При глубине просачивания 5 м									
Критерий оценки	Крупный песок			Средней крупности			Мелкий песок		
	Наименование нефтепродукта								
	Бензин	ДТ	Нефть	Бензин	ДТ	Нефть	Бензин	ДТ	Нефть
ΔS_c (смежные), ММ	13	22	24	3	10	27	32	35	38
$\Delta S_{д.п.}$ (диам.п), ММ	52	84	85	6	24	56	70	58	69
$\Delta S_{ц.-п.}$ (центр-периметр), ММ	52	84	85	6	24	56	70	58	69
При глубине просачивания 7 м									
Критерий оценки	Крупный песок			Средней крупности			Мелкий песок		
	Наименование нефтепродукта								
	Бензин	ДТ	Нефть	Бензин	ДТ	Нефть	Бензин	ДТ	Нефть
ΔS_c (смежные), ММ	25	52	25	6	52	15	44	56	42
$\Delta S_{д.п.}$ (диам.п), ММ	96	173	100	13	120	33	115	110	59
$\Delta S_{ц.-п.}$ (центр-периметр), ММ	96	173	100	13	120	33	115	110	59

 - значения неравномерности осадок, превышающих предельные, в случае если срок эксплуатации резервуара менее 20 лет

4.7. Рекомендации по методике расчета фундаментов зданий и сооружений на территориях, подверженных загрязнению нефтью и нефтепродуктами

Результаты исследований характера и степени изменения физико-механических свойств, а также изменения состояния песчаных грунтов основания при загрязнении нефтью и нефтепродуктами позволили сформулировать следующие рекомендации по методике расчета фундаментов зданий и сооружений на территориях, подверженных техногенному загрязнению:

1) Следует прогнозировать наиболее интенсивное изменение механических характеристик песчаного грунта при концентрации нефти и нефтепродуктов $C \leq 6\%$, 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%.

2) При расчете фундаментов по I группе предельных состояний необходимо учитывать снижение предельного давления на грунт основания на 17%-60% в зависимости от крупности песчаного грунта основания, вида нефтепродукта и его концентрации

3) При расчете фундаментов по II группе предельных состояний необходимо учитывать снижение расчетного сопротивления грунта основания на 10-40% в зависимости от крупности песчаного грунта основания, вида нефтепродукта и его концентрации;

4) При расчете фундаментов по II группе предельных состояний следует учитывать вероятность развития дополнительных осадок, в разы превышающих расчетное значение, а также увеличение сроков стабилизации осадок фундаментов (вплоть до 17,5 лет) в зависимости от крупности песчаного грунта основания, вида нефтепродукта и его концентрации;

5) При определении конечной расчетной осадки следует использовать методы, позволяющие учесть не только изменение деформационных, но и

прочностных характеристик песчаных грунтов в случае их загрязнения нефтью и нефтепродуктами;

б) Следует учитывать возможность развития пластических деформаций в области пятна загрязнения и появления неравномерных осадков, превышающих предельное значение, вызванных изменением физико-механических свойств грунта;

7) Степень загрязнения грунтового основания нефтью и нефтепродуктами необходимо определять путем инженерно-геологических и инженерно-экологических изысканий, выполняемых для каждого строительного объекта с учетом особенностей геологического строения исследуемого участка и условий техногенного воздействия.

4.8. Выводы по главе 4

1) В случае загрязнения песчаных оснований нефтепродуктами расчетное сопротивление основания может снижаться в диапазоне от 10% до почти 40 % в зависимости от его вида, концентрации и гранулометрического состава песка. Минимальное снижение расчетного сопротивления зафиксировано при загрязнении бензином и дизельным топливом вне зависимости от крупности песчаного грунта, максимальное – при загрязнении мелких песков сырой нефтью;

2) Предельное давление на грунт основания снижается в диапазоне от 17% до почти 60% в зависимости от крупности песчаного грунта основания, вида нефтепродукта и его концентрации. Минимальное снижение предельного давления зафиксировано при загрязнении бензином и дизельным топливом вне зависимости от крупности песчаного грунта, максимальное – при загрязнении мелких песков нефтью;

3) При загрязнении крупного песчаного грунта нефтью и нефтепродуктами осадка фундамента увеличивается в сравнении с осадкой фундамента на незагрязненном основании вплоть до 8 раз; песчаного грунта средней

крупности – в 6,5 раз; мелкого песчаного грунта – в 4 раза в зависимости от вида нефтепродукта и его концентрации;

4) Загрязнение песчаного грунта нефтью и нефтепродуктами приводит к увеличению сроков стабилизации осадки (вплоть до 17, 5 лет) в зависимости от крупности песка, вида НП и его концентрации;

5) При наличии у песчаного грунта, загрязненного нефтью и нефтепродуктами, характерных свойств связных грунтов, таких как низкая водопроницаемость и наличие удельного сцепления, аналитический метод расчета будет давать бóльшие значения конечных осадок, так как в нем не учитывается наличие в целом и изменение прочностных характеристик грунта.

6) Локальное загрязнение песчаного основания нефтепродуктами приводит к развитию неравномерных осадок фундамента, превышающих предельное значение, а также к развитию пластических деформаций в пределах пятна распространения нефтепродукта.

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 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 бóльшие 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 ЛИТЕРАТУРЫ

Нормативная литература:

1. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. – М.: Стандартиформ, 2019. – 23 с.
2. ГОСТ 25584 - 2023 Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации. – М.: Стандартиформ, 2016. – 22 с.
3. ГОСТ 12248.1-2020. Грунты. Определение характеристик прочности методом одноплоскостного среза. – М.: Стандартиформ., 2020. – 13 с.
4. ГОСТ 12248.4-2020. Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия. – М.: Стандартиформ, 2020.– 14 с
5. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. – М.: Стандартиформ. 2020. – 41 с.
6. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – М.: Стандартиформ., 2019. – 23 с.
7. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03–83. М.: ФГУП ЦПП, 2016. 156 с.
8. ПНД Ф 16.1.41 - 04. Методика выполнения измерений массовой концентрации нефтепродуктов в пробах почв гравиметрическим методом. – Москва, 2004. – 13 с.
9. ПНД Ф 16.1:2.21-98. Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовой доли нефтепродуктов в пробах почв и грунтов флуориметрическим методом на анализаторе жидкости «Флюорат-02» (М 03-03-2012), Москва, 1998. – 33 с.

Научно-техническая литература:

10. Абелев, М. Ю. Особенности строительства сооружений на насыщенных нефтепродуктами мелкозернистых песках / М. Ю. Абелев, Б. К. Абильдин, Д. Ю. Чунюк // Промышленное и гражданское строительство. – 2022. – № 8. – С. 41-47. – DOI 10.33622/0869-7019.2022.08.41-47. – EDN DXFRTE.

11. Абильтин Б.К., Исследование физико-механических свойств грунтов, насыщенных мазутом // Объединенный научный журнал. 2001. №20. С. 9-14.
12. Абильтин Б.К. Аварии промышленных и гражданских объектов, расположенных на нефтенасыщенных грунтах// Объединенный научный журнал.2002. № 1.С 18-26.
13. Аль-Адили А., Йали К., Шакир А. Исследование влияния загрязнения нефтью песчаного и гипсосодержащего грунтов на прочность // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2017. № 4. С. 30–35.
14. Березанцев В.Г. Расчет оснований сооружений. – И.: Стройиздат, 1970.- 207 с.
15. Бордовская М. В., Гаджи-Касумов А. С. Карцев А. А. Основы геохимии, геохимические методы поисков, разведки и контроля за разработкой месторождений нефти и газа. М.: Недра, 1989. 245 с.
16. Большаков Н.В., Гохман А.С. Осадка фундаментов при сооружении объектов нефтегазовой промышленности на слабых грунтах. М., ВНИИСТ, 1972.- с. 246-249.
17. Бракоренко Н. Н., Емельянова Т. Я. Влияние нефтепродуктов на петрографический состав и физико-механические свойства песчано-глинистых грунтов (на примере г. Томска) // Вестник Томского гос. ун-та. 2011. № 342. С. 197–200.
18. Буренин В. А. Прогнозирование индивидуального остаточного ресурса стальных вертикальных резервуаров: дис. ... д-ра техн. наук. Уфа, 1994. 304 с.
19. Буренин В.А. Исследование влияния неравномерных осадок на напряженно-деформированное состояние стального вертикального цилиндрического резервуара. Дисс. ...канд. техн. наук. – Уфа, 1980. – 157 с.
20. Безрук В.М., Линцер А.В., Юрченко В.А., Илясов Б.Ф. Применение нефтегрунта в строительстве автомобильных дорог. М., «Транспорт», 1975, 72 с.

21. Бируля А.К. Теоретические основы укрепления грунтов битумами и дегтями. В кн: Труды совещания по технической мелиорации грунтов. Под редакцией Е.М. Сергеева. М., Изд. МГУ, 1961, с. 62-69.
22. Богомолов Ю.Н., Юрченко В.А., Лейтланд В.Г. Использование нефтегрунтов предварительной заготовки при строительстве нефтепромысловых автомобильных дорог. В журнале «Автомобильные дороги», №8, 1975, с. 12-13.
23. Богомолов Ю.Н., Юрченко В.А., Линцер А.В. Исследование адсорбционных процессов между грунтами и сырой маловязкой нефтью. В межвузовском сборнике №1 «Автомобильные дороги» (Строительство и эксплуатация автомобильных дорог), Новосибирск, 1976, с. 164-172.
24. Богомолов Ю.Н., Юрченко В.А. Влияние активных добавок на характер адсорбции сырой маловязкой нефти грунтами. В межвузовском сборнике трудов «Повышение надежности и качества строительства в Тюменской области», вып.2, Тюмень, изд. ТГУ, 1977, с. 134-139.
25. Габибов, Ф. Г. Разработка теории и методов оптимизации свойств неустойчивых глинистых грунтов при решении задач прикладной геоэкологии: специальность 25.00.08 "Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Габибов Фахраддин Гасан оглы. – Волгоград, 2006. – 416 с.
26. Галеев В.Б. Напряженно-деформированное состояние резервуаров, построенных на слабых переувлажненных грунтах. Дисс. ... докт. техн. наук. – Тюмень, 1987.- 668 с.
27. Гольдберг В. М., Зверев В. П., Арбузов А. И., Казеннов С. М. Техногенное загрязнение природных вод углеводородами и его экологические последствия. М.: Наука, 2001. 123 с.
28. Городнова Е.В. Исследование осадок кольцевых свайных фундаментов стальных вертикальных цилиндрических резервуаров на неоднородном

- основании// Сб. тр. 61-й научной конференции СПбГАСУ. – СПб 2004.- с. 28-34.
29. Городнова Е.В. Оценка осадок кольцевых свайных фундаментов на неоднородном основании: диссертация ... кандидата технических наук: 05.23.02. — Санкт-Петербург, 2005. — 148 с.
30. Гольдштейн М.Н. Механические свойства грунтов. М.: Стройиздат, 1952. – 259 с.
31. Дашко Р. Э., Ланге И. Ю. Геотехнический анализ длительной устойчивости нефтяных резервуаров на водонасыщенных песчано-глинистых грунтах // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 3. С. 48–54.
32. Дашко Р. Э., Ланге И. Ю. Инженерно-геологические аспекты негативных последствий контаминации дисперсных грунтов нефтепродуктами // Записки Горного института. 2017. Т. 228. С. 624–630. DOI: 10.25515/PML 2017.6.624.
33. Доброва Д. В., Королёв В. А., Соколов В. Н., Неклюдов Д. Б., Бабакина О. А. Модели формирования микроструктур глинистых грунтов при их химическом загрязнении // Генезис и модели формирования свойств грунтов. Тр. междунар. науч. конф. Москва, МГУ, 26–27 мая 1998 г. М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 106–107.
34. Землянский А. А. Инновационные принципы проектирования резервуаров нового поколения для хранения углеводородов // Симпозиум 2013 — перспективные технологии XXI века. Балаковский институт техники, технологии и управления (филиал) СГТУ, 2012. 35 с. URL: <http://www.sworld.com.ua/simpoz2/112.pdf>.
35. Кардава М.Г. «Загрязнение нефтепродуктами и промывка водой песчаного грунта» Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 1999.
36. Каченов В. И., Середин В. В., Карманов С. В. К вопросу о влиянии нефтяных загрязнений на свойства грунтов // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2011. № 14. С. 164–165.

37. 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.
38. 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.
39. Клубова Т. Т. Глинистые минералы и их роль в генезисе, миграции и аккумуляции нефти. М.: Недра, 1973. 256 с.
40. Коновалов П. А., Мангушев Р. А., Сотников С. Н. и др. Фундаменты стальных резервуаров и деформации их оснований / под ред. П. А. Коновалова. М.: АСВ, 2009. 336 с.
41. Королев В. А. Очистка грунтов от загрязнений. М.: Наука/Интерпериодика, 2001. 364 с.
42. Коновалов П.А., Иванов Ю.К., Мангушев Р.А., Сотников С.Н. Основания и фундаменты резервуаров. – М.: «Стройиздат», 1989.- 95 с.
43. Коновалова О.П. Учет консолидации в повышении эксплуатационной надежности стальных резервуаров большой емкости. Дисс. ... канд. техн. наук. – Тюмень, 2002.
44. Красильников П.А., Середин В.В., Леонович М.Ф. «Исследование распределения углеводородов по разрезу грунтового массива» FUNDAMENTAL RESEARCH № 2, 2015, с. 3100-3104.
45. Ксенофонтов А.И. Об учете начального градиента напора и активной зоны фильтрации при решении задач по консолидации грунтов. - «Труды МИИТ», 1973, вып. 432, с. 87-95.
46. Кумпаненко И. В., Иванова Н. А., Ковалева Н. Ю. Исследование просачивания в грунт нефти и нефтепродуктов при их разливах / Химическая физика. – 2021. – Т. 40, № 1. – С. 45-54. – DOI 10.31857/S0207401X21010088.

47. Ланге И.Ю. «Инженерно-геологический анализ и оценка изменения несущей способности дисперсных грунтов при их контаминации нефтепродуктами» диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук, 2016.
48. Ломтадзе В.Д. Методы лабораторных исследований физико-механических свойств горных пород (Руководство к лабораторным занятиям по инженерной геологии)/ «Недра», 1972 г. - 312 с.
49. Мангушев Р.А. Исследование деформаций оснований стальных вертикальных цилиндрических резервуаров в условиях слабых грунтов: диссертация ... кандидата технических наук: 05.23.02. — Ленинград, 1980. — 240 с.
50. Мангушев Р.А., Городнова Е.В. Проведение геотехнического мониторинга за устройством оснований большеобъемных резервуаров с плавающей крышей//Реконструкция Санкт-Петербурга. – 2003: Сб. статей международной науч.-прак. Конф. СПбГАСУ – СПб, 2002. – Ч.1. С. 210-213.
51. Мангушев Р.А., Городнова Е.В. Исследование влияния линз слабого грунта на неравномерность осадки стенки стального вертикального цилиндрического резервуара//Тр. междунар. науч.-прак. конф. по проблемам механики грунтов, фундаментостроению и транспортному строительству. - Пермь, 2004 г. – Том 1. – С. 108-113.
52. Мангушев Р. А., Городнова Е. В. Устройство оснований и фундаментов под стальные резервуары емкостью 50 тыс. м³ с плавающей крышей // Сб. тр. 59-й науч. конф. СПбГАСУ. СПб., 2002. Ч. I. С. 36–38.
53. Мотенко Р. Г., Кирюхина Т. А., Гераскина Е. В., Натитник И. М., Лазарева Е. В. Оценка влияния нефтяного загрязнения на теплопроводность грунтов на основе результатов комплексных экспериментальных исследований // Мат-лы Междунар. конф. «Город и геологические опасности». Т. 2. СПб., 2006. С. 18–20.

54. Мустафин Ф. М., Жданов Р. А., Каравайченко М. Г., Ахметов Ф. Ш., Бондарчук Д. А., Лукьянова И. Э. Резервуары для нефти и нефтепродуктов. СПб.: Недра, 2010. Т. 1. Конструкции и оборудование. 477 с.
55. Никифоров, А. С. Особенности миграции нефти и нефтепродуктов в грунтах // Нефть и газ Западной Сибири : Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Тюменского индустриального института, Тюмень, 17–18 октября 2013 года / Ответственный редактор О.А.Новоселов. Том III. – Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2013. – С. 117-121. – EDN SBMKSZ.
56. Осовецкий Б. М., Каченов В. И., Растегаев А. В., Афанасьев Р. А., Пикулев Д. А. Закономерности изменения прочностных свойств песков, загрязненных дизельным топливом // Фундаментальные исследования. 2014. № 9-8. С. 1769–1774.
57. Охотин В.В. Физические и механические свойства грунтов в зависимости от их минералогического состава и степени дисперсности. М.: Гушосдор, 1937.- 120 с.
58. Попов А. А. Природоохранная деятельность в топливно-энергетическом комплексе // ВИНТИ. Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2003. № 3. С. 91–95.
59. Попандопуло Г.А., Рацен З.Э. Использование тяжелых нефтей для укрепления грунтов. Материалы к Всесоюзному совещанию по закреплению и уплотнению грунтов, изд-во МГУ, 1968, с. 162-165.
60. Попандопуло Г.А. Применение тяжелых нефтей для устройства дорожных одежд. Труды СоюзДорНИИ, вып. 38, 1970, с. 139-149.
61. Покрепин Б. В. Разработка нефтяных и газовых месторождений. 2-е изд., доп. и перераб. Волгоград: Ин-Фолио, 2010. 223 с.
62. Ребиндер П.А. О физико-химической механике битумных материалов. Труды СоюзДорНИИ. 1971, вып.49, с 5-11.

63. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика как основа закрепления грунта в дорожном строительстве и производстве строительных материалов на основе грунтов. В кн: Труды совещания по теоретическим основам технической мелиорации грунтов под ред. Е.М. Сергеева. М., Изд. МГУ, 1961, с.11-20.
64. Сасько Н.Ф., Попандопуло Г.А., Рацен Э.З. Исследования по использованию высокосмолистых нефтей для укрепления грунтов, грунтогравийных и грунтощебеночных материалов. Труды СоюзДорНИИ, вып. 34, 1969, с. 115-138.
65. Сасько Н.Ф. Исследование по проектированию состава битумогрунта с учетом технологических факторов и службы покрытия. Дисс. на соискание степени кандидата технических наук. Харьков, 1961, 200 с.
66. Селуянов А. А., Чернова К. В., Шутов Н. В. Анализ источников попадания нефти в гидросферу Земли // Нефтегазовое дело. 2011. Т. 9. № 3. С. 96–104.
67. Сотников С.Н., Мангушев Р.А. Измерение вертикальных перемещений поверхности основания цилиндрического резервуара// Тр. ЛИСИ. - 1978. – с.31-36.
68. Усин В.В., Кумпаненко И.В., Иванова Н.А., Карташёва Н.С., Воловодов А.И. Метод защиты песчаных грунтов от просачивания нефти и нефтепродуктов/ Рос. хим. ж. (Ж. рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2013, т.LVII, №1.
69. Флорин В.А. Основы механики грунтов, т.1. Л. – М., Госстройиздат, 1959.- 357 с.
70. Флорин В.А. Основы механики грунтов, т.2. Л. – М., Госстройиздат, 1961 - 543 с.
71. Фридман А.А., Ястребова Л.Н. Исследование процессов структурообразования грунтов, укрепленных битумной эмульсией и цементом. Труды СоюзДорНИИ, вып. 38, М., 1970, с. 63-82.

72. Фридман А.А., Ястребова Л.Н. Исследование структуры грунтов, укрепленных битумной эмульсией совместно с цементом. Труды СоюзДорНИИ, вып. 66, М., 1973, с. 40-55.
73. Цытович Н.А. Механика грунтов. – И.: Гостройиздат, 1963.- 636 с.
74. Чемус А. А., Красильников П. А., Пенский О. Г., Гершанок В. А., Карасева Т. В. Инженерно-геологические и геоэкологические условия прибрежной зоны Камского водохранилища, осваиваемой для строительства объектов нефтедобычи // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. URL: www.science-education.ru/106-7777.
75. Шевченко Л. В., Ширшова И. В. Прочностные свойства мерзлых глинистых грунтов, загрязненных нефтью // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2008. № 1. С. 78–84.
76. Шибалова Г. В., Шкаредо В. А. Оценка возможности использования глинистых грунтов, загрязненных углеводородами, в строительных целях // Строительство и архитектура. 2017. № 5. С. 50–57.
77. Ядзинская М.Р. «Прогноз изменения прочностных свойств дисперсных грунтов, загрязненных углеводородами». Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук, 2016.
78. Ядзинская М.Р., Середин В.В. «Прогноз прочностных свойств грунтов, как оснований сооружений»
79. Akinwumi I. I., Diwa D., Obianigwe N. Effects of crude oil contamination on the index properties, strength and permeability of lateritic clay // Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research. 2014. Vol. 3 (4). Pp. 816–824.
80. Akinwumi I. I., Maiyaki U. R., Adubi S. A., Daramola S. O., Ekanem B. B. Effects of waste engine oil contamination on the plasticity, strength and permeability of lateritic clay // International Journal of Scientific & Technology Research. 2014. Vol. 3 (9). Pp. 331–335.

81. Al-Sanad H. A., Eid W. K., Ismael N. F. Geotechnical properties of oil-contaminated Kuwaiti sand // *Journal of Geotechnical Engineering*. 1995. Vol. 121 (5). Pp. 407–412.
82. Cook E.E., Puri V.K., Shin E.C. Geotechnical characteristics of crude oil-contaminated sands. *Proceedings of the Second International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, USA, 1992*, p. 384–387.
83. Evgin, E., Das, B.M. (1992). Mechanical behavior of oil contaminated sand. In: Usmen, Acar (Eds.), *Environmental Geotechnology proceeding of the Mediterranean Conference*. Balkema Publishers, Rotterdam: p. 101–108.
84. Fan C. Y., Krishnamurthy S., Chen C. T. *A Critical Review of Analytical Approaches for Petroleum Contaminated Soil // Analysis of Soils Contaminated with Petroleum Constituents*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1994. p. 61–74.
85. Hamid Rajabi, Mohammad Sharifipour, «Geotechnical properties of hydrocarbon-contaminated soils: a comprehensive review» Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature, 2018.
86. Ijimdiya T. S., Igboro T. The compressibility behavior of oil contaminated soils // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2012. Vol. 17. Pp. 3653–3662.
87. Khamenchiyan M., Charkhabi A. H., Tajik M. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils // *Engineering Geology*. 2007. Vol. 89 (3–4). Pp. 220–229. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.10.009>.
88. Kermani M., Ebadi T. The Effect of Oil Contamination on the Geotechnical Properties of Fine-Grained Soils, *Soil and Sediment Contamination // Soil and Sediment Contamination: An International Journal*. 2012. Vol. 21 (5). Pp. 655–671. DOI: 10.1080/15320383.2012.672486.
89. Noori Z., Ahmed F. R., Jassim H. M. Effect of crude oil products on the geotechnical properties of soil // *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2014. Vol. 186. Pp. 353–362.

90. Prasanna G., Shimna Manoharan «A Review on Effect of Crude Oil on the Geotechnical Properties of Soil» *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* e-ISSN: 2395 -0056, p. 1234-1236 Volume: 03 Issue: 07 | July-2016.
91. Rajabi H., Sharifipour M. Effects of light crude oil contamination on small-strain shear modulus of Firoozkooch sand // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2019. Vol. 23 (11). Pp. 1351–1367. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1347525>.
92. Rajab M. Abousnina, Allan Manalo, Weena Lokuge, Jim Shiau. Oil contaminated sand: An emerging and sustainable construction material // *International Conference on Sustainable Design, Engineering and Construction, Procedia Engineering*, Vol. 118, 2015. p.1119 - 1126.
93. Rajabi H., Sharifipour M. Geotechnical properties of hydrocarbon-contaminated soils: a comprehensive review // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2019. Vol. 78. Pp. 3685–3717. <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1343-1>.
94. Rahman Z. A., Hamzah U., Taha M. R., Ithnain N. S., Ahmad N. Influence of oil contamination on geotechnical properties of basaltic residual soil // *American Journal of Applied Sciences*. 2010. Vol. 7 (7). Pp. 954–961. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2010.954.961>.
95. Rahman Z. A., Hamzah U., Ahmad N. Geotechnical characteristics of oil-contaminated granitic and metasedimentary soils // *Asian Journal of Applied Sciences*. 2010. Vol. 3. Issue 4. Pp. 237–249.
96. Silvestri V., Mikhail N., Souli M. Permeability response of oil-contaminated compacted clays // *ASTM International STP 1275*. 1997. Pp. 62–74.
97. Shin E. C., Lee J. B., Das B. M. Bearing capacity of a model scale footing on crude oil-contaminated sand // *Geotechnical and geological engineering*. 1999. Vol. 17. p. 123–132.

98. Shin E., Das B. (2000). Some physical properties of unsaturated oil-contaminated sand. *Geotechnical Special Publication*, p. 142–152.
99. Shin E., Das B. (2001) Bearing capacity of unsaturated oil contaminated sand. *Int J Offshore Polar Eng.* 11(3): p.220–227.
100. Talukdar D. K. Behavior of crude oil contaminated clay sands // *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2014. Vol. 4 (7). Pp. 271–276.
101. Ur-Rehman H., Abduljawwad S.N, Akram T. Geotechnical behavior of oil-contaminated fine-grained soils. *Electron J. Geotech. Eng.* 12(A), 2007: p.15–23.
102. Zahraa Noori, Faris Rashled Ahmed, Hamed M. Jassim. Effect of crude oil products on the geotechnical properties of soil // *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Vol.186, 2014.p.353-362.
103. Zobell C. E., Anderson D. Q. Observations on the multiplication of bacteria in different volumes of stored sea water and the influence of oxygen tension and solid surfaces // *Biological Bulletin*. 1936. Vol. 71. Pp. 324–342.
104. Zobell C. E., Anderson D. Q. Vertical distribution of bacteria in marine sediments // *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*. 1936. Vol. 20. p. 258–269.

Приложение №1. Паспорта нефтепродуктов и песка



ООО "Газпромнефть-Терминал"
Юридический адрес: Российская Федерация, 630099, г. Новосибирск, ул. Максима Горького, д.80 пом. 13 тел. +7(383)227-52-00

Фактический адрес: Нефтебаза "Гладкое"
187026, Российская Федерация, Ленинградская обл., Тосненский муниципальный р-н, Никольское г.п., территория "Склад светлых нефтепродуктов Гладкое", стр. 1

Производитель: ООО "Газпромнефть-Терминал" нефтебаза "Гладкое"
Российская Федерация, 187026, Россия, Ленинградская область, Тосненский муниципальный район, Никольское городское поселение, территория "Склад светлых нефтепродуктов Гладкое", строение 1



ПАСПОРТ № 2778

Условное обозначение: Топливо дизельное «Дизель Опти» марки ДТ-Л-К5 сорт С (Дизельное топливо экологического класса К5 марки ДТ-Л-К5)

по СТО 42045241-004-2015 с изм. 1-4 ОКПД 2: 19.20.21.315

Декларация о соответствии: ЕАЭС N RU Д-РУ.РА01.В.74502/21 срок действия с 26.03.2021 по 26.03.2024

Номер партии:	2778/Гладкое	Дата изготовления:	22.07.2023	г.
Номер резервуара:	Партия	Дата отбора пробы:	22.07.2023	г.
Уровень наполнения (мм):	9803	Дата проведения испытаний:	23.07.2023	г.
Размер партии (кг):	2255850	Дата выдачи паспорта:	23.07.2023	г.
		Отбор проб произведен по:	ГОСТ 2517-2012 с изм. 1	

№	Наименование показателя	Норма по ТР ТС	Норма по документу	Фактическое значение
1**	Цетановое число, ед., не менее	51	61,0	53,2
2**	Температура в спышки в закрытом типе, °С, не ниже	55	55	68
3*	Кинематическая вязкость при 40 °С, мм²/с	-	2,000 - 4,500	3,452
4*	Фракционный состав Перегоняется: до температуры 250 °С, % (по объему), менее до температуры 350 °С, % (по объему), не менее 95 % (по объему) при температуре, °С, не выше	- - 360	65,0 85,0 360,0	25,6 93,3 357,3
5**	Плотность при 15 °С, кг/м³	-	820,0 - 860,0	837,8
6*	Пределная температура фильтруемости, °С, не выше	Не определяется		минус 5
7**	Массовая доля полициклических ароматических углеводородов, %, не более	8	8	3,4
8**	Массовая доля серы, мг/кг, не более	10	10,0	7,6
9*	Коксуемость 10 %-ого остатка разгонки, % (по массе), не более	-	0,30	менее 0,1
10*	Зольность, % (по массе), не более	-	0,01	отс.
11*	Массовая доля в оды, мг/кг, не более	-	200	менее 30
12*	Коррозия медной пластинки (3ч при 50 °С), единицы по шкале	-	Класс 1	Класс 1
13*	Смазывающая способность: скорректированный диаметр пятна износа при 60 °С, мкм, не более	460	460	387
14*	Общее загрязнение, мг/кг, не более	-	24	менее 12
15*	Окислительная стабильность: общее количество осадка, г/м³, не более	-	25	17

Примечание: сведения о присадках

1. Присадка Green Booster к дизельному топливу в количестве: 50 мл/м³

2*. Противоманная присадка в количестве: до 0,03 % масс.

3*. Присадка антистатическая в количестве: до 0,0005 % масс.

4*. Присадка депрессорно-диспергирующая в количестве: до 0,10 % масс.

5*. Топливо не содержит метиловых эфиров жирных кислот.

* По данным паспорта: ООО "Газпромнефть-Терминал" нефтебаза "Гладкое" № 2777 от 23.07.2023 г.

** По данным протокола испытаний: № 6643/11 от 23.07.2023 г. ООО "Газпромнефть-Терминал"

Испытательная лаборатория Гладкое

Заключение: Топливо дизельное «Дизель Опти» марки ДТ-Л-К5 сорт С (Дизельное топливо экологического класса К5 марки ДТ-Л-К5) соответствует требованиям:

- Технического регламента Таможенного союза ТР ТС 013/2011 «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту». (Решения комиссии Таможенного союза от 18.01.2011 №826),

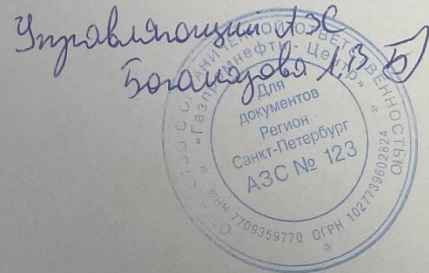
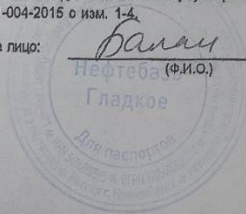
- СТО 42045241-004-2015 с изм. 1-4

Уполномоченное лицо: Балац В.В. (Ф.И.О.) В.В. подпись

Дата выдачи копии паспорта: 25.07.2023г.

М.П.

Накладная: 17325





ООО "Газпромнефть-Терминал"
Юридический адрес: Российская Федерация, 430099, г. Новосибирск, ул. Максима Горького, д.89 пом. 43 эт. «734», 227-52-00

Фактический адрес: Нефтебаза "Гладкое"
187026, Российская Федерация, Ленинградская обл., Тосненский муниципальный р-н, Никольское г.п., территория "Склад светлых нефтепродуктов Гладкое", стр. 1

Производитель: ООО "КИНЕФ"
Российская Федерация, 187110, г. Кириши, Ленинградская область, шоссе Энтузиастов, 1



ПАСПОРТ № 2810

Условное обозначение: Бензин неэтилированный Премиум Евро-95 вид III (Автомобильный бензин экологического класса К5 марки АИ-95-К5)

по ГОСТ Р 51866-2002 с изм. 1-4 ОКПД 2: 19.20.21.135
Декларация о соответствии: ЕАЭС № RU D-RU.PA01.B.53729/23 срок действия с 01.02.2023 по 31.01.2026

Номер партии: 2810/Гладкое
Номер резервуара: РВС 4
Уровень наполнения (мм): 9821
Размер партии (кг): 1980100

Дата изготовления: 25.07.2023 г.
Дата отбора пробы: 25.07.2023 г.
Дата проведения испытаний: 25.07.2023 г.
Дата выдачи паспорта: 25.07.2023 г.
Отбор проб произведен по: ГОСТ 2517-2012 с изм. 1

№	Наименование показателя	Норма по ТР ТС	Норма по документу	Фактическое значение
1	Октановое число, не менее по исследовательскому методу	80	95,0	95,1
**	по моторному методу	76	85,0	86,4
2*	Концентрация марганца, мг/дм ³ , не более	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие
3*	Концентрация железа, мг/дм ³ , не более	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие
4**	Плотность при температуре 15 °С, кг/м ³	-	720 - 775	737,8
5**	Концентрация серы, мг/кг, не более	-	10	8,2
6*	Концентрация смол, промытых растворителем, мг на 100 см ³ бензина, не более	-	5	3
7*	Коррозия медной пластинки (3ч при 50 °С), единицы по шкале	-	Класс 1	Выдерживает
8**	Внешний вид	-	Прозрачный и чистый	Прозрачный и чистый
9**	Объемная доля углеводородов, % не более олефиновых ароматических	18 35	18,0 35,0	0,8 33,8
10**	Объемная доля бензола, %, не более	1	1,0	0,5
11**	Массовая доля кислорода, %, не более	2,7	2,7	0,33
12**	Объемная доля оксигенатов, %, не более: Метанола этанола изопропилового спирта изобутилового спирта третбутилового спирта эфиров (С5 и выше)	Отсутствие 5 10 10 7 15	Отсутствие 6 10 10 7 15	Отсутствие 0,0 0,0 0,0 0,0 1,8
13**	Объемная доля монометиланилина (N-метиланилина), %, не более	Отсутствие	Отсутствие	Отсутствие
14**	Давление насыщенных паров бензина (ДНП), кПа: - в летний период - в зимний период	35 - 80 35 - 100	45,0 - 100,0	62,3
15**	Фракционный состав: объемная доля испарившегося бензина, % при температуре: 70 °С (И70) 100 °С (И100) 150 °С (И150), не менее конц кипения, °С, не выше остаток в колбе, % (по объему), не более	- - - -	22,0 - 50,0 46,0 - 71,0 76,0 210	38,5 55,3 83,0 188,8
16	Максимальный индекс паровой пробы (ИПП) ИПП=10ДНП+7(И70)	-	2	1,2
			1260	935

Настоящий автомобильный бензин соответствует классам испаряемости*: А, В, С, D, D1, E, E1, F1.
Настоящий автомобильный бензин предназначен для использования в двигателях внутреннего сгорания с искровым воспламенением.

* По данным паспорта: ООО "КИНЕФ" № 92 от 21.07.2023 г.
** По данным протокола испытаний: № 8710/11 от 25.07.2023 г. ООО "Газпромнефть-Терминал"

Испытательная лаборатория Гладкое

Заключение: Бензин неэтилированный Премиум Евро-95 вид III (Автомобильный бензин экологического класса К5 марки АИ-95-К5) соответствует требованиям:
- Технического регламента Таможенного союза ТР ТС 013/2011 «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту». (Решение комиссии Таможенного союза от 18.01.2011 №826),
- ГОСТ Р 51866-2002 с изм. 1-4;

Уполномоченное лицо:

Валентин В.В.
(Ф.И.О.)
Нефтебаза Гладкое
Для паспортов

Дата выдачи копии паспорта:

26.07.2023г.

М.П.

Накладная:

17024
ГАЗС
Валентин В.В.

СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ



СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ

№ РОСС.RU.HX37.H00946

Срок действия с 22.05.2020

по 21.05.2023

№ 0606337

ОРГАН ПО СЕРТИФИКАЦИИ рег. № RA.RU.10HX37

ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "СЕРТПРОМЭКСПЕРТ".

Место нахождения: 121359, РОССИЯ, ГОРОД МОСКВА, УЛИЦА МАРШАЛА ТИМОШЕНКО, ДОМ 4, ПОМЕЩЕНИЕ 1 КОМНАТА 2

Телефон: +7 4953906318, email: sertpromexpert@mail.ru. Аттестат аккредитации № RA.RU.10HX37 от 06.10.2017

ПРОДУКЦИЯ

Песок сухой кварцевый фракционированный для строительных работ (не предназначен для строительства автомобильных дорог общего пользования) т.м. «РЕАЛ» фракции: 0-0,4 мм; 0-0,63 мм; 0-1,25 мм; 0-2,5 мм; 0,1-0,63 мм; 0,4-0,8 мм; 0,4-1,0 мм; 0,5-1,0 мм; 0,5-1,25 мм; 0,63-1,25 мм; 0,63-1,6 мм; 0,63-2,5 мм; 0,8-2,0 мм; 0,8-2,5 мм; 1,0-2,0 мм; 1,25-2,5 мм; 1,6-4,0 мм; 2,0-5,0 мм; 2,5-5,0 мм; 3,0-5,0 мм; 2,5-3,2 мм. Серийный выпуск.

КОД ОК
08.12.11.120

СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ

ГОСТ 8736-2014, ТУ 08.12.11-008-03755638-2017

КОД ТН ВЭД
2505100000

ИЗГОТОВИТЕЛЬ

Общество с ограниченной ответственностью «Производственная компания «Ремикс»

Адрес: 196650, РФ, г. Санкт-Петербург, г. Колпино, улица Финляндская, дом 31, литер А, помещение 3-Н

ОГРН: 1167847320850, ИНН: 7817062448, КПП: 781701001; телефон: 8(812) 244-40-07, адрес электронной почты: info@re-mix.ru

СЕРТИФИКАТ ВЫДАН

Общество с ограниченной ответственностью «Торговый Дом «Ремикс»

Адрес: 196650, РФ, г. Санкт-Петербург, г. Колпино, улица Финляндская, дом 31, литер А, помещение 4-Н

ОГРН: 1167847308276, ИНН: 7817062261, КПП: 781701001, телефон: 8(812) 244-40-07, адрес электронной почты: info@re-mix.ru

НА ОСНОВАНИИ

Протокола испытаний БГ2518 от 21.05.2020 года, выданного Испытательной лабораторией Общества с ограниченной ответственностью ИННОВАЦИОННЫЙ ЦЕНТР «КОЛИБРИ»; аттестат аккредитации РОСС RU.31857.04ILCO.00063 действителен до 17.06.2022г.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Схема сертификации: 3с



Руководитель органа

Эксперт

подпись

подпись

Д.И. Данилова

инициалы, фамилия

А.В. Жиров

инициалы, фамилия

Сертификат не применяется при обязательной сертификации

МЕНЕДЖЕР ПО ПРОДАЖАМ
РЕМИКСЪ Е.С.
ДОВ. 707 от 21.04.2021



Приложение №2. Протоколы испытаний по определению концентрации нефти и нефтепродуктов песчаных образцов



Общество с ограниченной ответственностью «Лик»
(ООО «Лик»)
Юридический адрес: 190068, г. Санкт-Петербург,
Малая Подьяческая улица, дом 3, литер А, помещение 12Н
Фактический адрес: 190020, РФ, г. Санкт-Петербург,
наб. Обводного канала, д.199-201, лит. К, пом.6-Н

Лаборатория промышленной санитарии и экологии (ЛПСиЭ)
Фактический адрес места осуществления деятельности: 190020, РОССИЯ, город Санкт-Петербург,
наб. Обводного канала, д. 199-201, лит. К, пом. 6-Н
тел.: 8(812)363-18-98; e-mail: office@liklab.ru

УТВЕРЖДАЮ:
Начальник ЛПСиЭ

С.И. Гордая
С.И. Гордая
«18» июля 2023 г.



ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 03/10-07-ХП от «18» июля 2023 г.

1.	Наименование объекта испытаний:	Почва	
2.	Наименование заказчика:	Квашук Алина Витальевна	
3.	Контактные данные заказчика:	197227, г. Санкт-Петербург, Приморский район, Комендантский пр., д.7, к.1, кв. 329	
4.	Отметка от дневной поверхности, см:	От -3,5 до -83,5	
5.	Объем содержания дизеля или нефти от объема песка, %:	10	
6.	Цель испытаний:	Химический анализ	
7.	Характеристика образцов:	Крупный песок	
8.	Документы, подтверждающие отбор образцов (дата отбора):	Акт отбора № б/н (10.07.2023) вх. № 03/10-07-п	
9.	Дата получения образцов:	10.07.2023	
10.	Период проведения испытаний:	10.07.2023-17.07.2023	
11.	Документы, устанавливающие правила и методы испытаний (МИ):		
	Нефтепродукты	ПНД Ф 16.1:2.21-98	
12.	Сведения о средствах измерений (СИ), используемых при испытаниях:		
	Наименование СИ, тип (марка), зав. №	Сведения о поверке	Дата окончания действия поверки
	Анализатор жидкости "Флюорат-02" модификации "Флюорат-02-5М", зав. № 9527	С-СП/03-03-2023/229056707	02.03.2024

13. Результаты испытаний:

№ п/п	№ пробы	Рег. № образца	Отметка от дневной поверхности, см:	Определяемый показатель, ед. изм.
				Нефтепродукты, мг/кг
1	2	3	4	5
1	1 днз	03/10-07-01	-3,5	2913
2	2 днз	03/10-07-02	-13,5	3388
3	3 днз	03/10-07-03	-23,5	3144
4	4 днз	03/10-07-04	-33,5	3900
5	5 днз	03/10-07-05	-43,5	2506
6	6 днз	03/10-07-06	-53,5	4750
7	7 днз	03/10-07-07	-63,5	2631
8	8 днз	03/10-07-08	-73,5	3619
9	9 днз	03/10-07-09	-83,5	3831
10	1 неф	03/10-07-10	-3,5	12816
11	2 неф	03/10-07-11	-13,5	19188
12	3 неф	03/10-07-12	-23,5	18250
13	4 неф	03/10-07-13	-33,5	25781
14	5 неф	03/10-07-14	-43,5	36875
15	6 неф	03/10-07-15	-53,5	24344
16	7 неф	03/10-07-16	-63,5	45125
17	8 неф	03/10-07-17	-73,5	28219
18	9 неф	03/10-07-18	-83,5	29781

14. Мнения и интерпретации: отсутствуют.

15. Дополнительная информация: ООО «ЛиК» не несет ответственность за соблюдение правил отбора и хранения образцов при транспортировке. Заказчик уведомлен о сроках и условиях хранения образцов для сохранения их состава и свойств.

Разделы 1-8 – сведения, полученные от заказчика.

Условия испытаний (в т.ч. метеоусловия) соответствовали МИ. Неопределенность или погрешность испытаний соответствуют МИ.

Результаты испытаний распространяются на предоставленные образцы.

Протокол составлен в двух экземплярах.

Воспроизведение протокола, включая частичное, возможно только с разрешения ООО «ЛиК».

Ответственный за оформление протокола:



К.Е. Славикова

Конец протокола.



Общество с ограниченной ответственностью «Лик»
(ООО «Лик»)

Юридический адрес: 190068, г. Санкт-Петербург,
Малая Подъяческая улица, дом 3, литер А, помещение 12Н
Фактический адрес: 190020, РФ, г. Санкт-Петербург,
наб. Обводного канала, д.199-201, лит. К, пом.6-Н

Лаборатория промышленной санитарии и экологии (ЛПСиЭ)

Фактический адрес места осуществления деятельности: 190020, РОССИЯ, город Санкт-Петербург,
наб. Обводного канала, д. 199-201, лит. К, пом. 6-Н
тел.: 8(812)363-18-98; e-mail: office@liklab.ru

УТВЕРЖДАЮ:
Начальник ЛПСиЭ

 С.И. Гордая
«01» августа 2023 г.



ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ
№ 04/24-07-ХП от «01» августа 2023 г.

1.	Наименование объекта испытаний:	Почва	
2.	Наименование заказчика:	Квашук Алина Витальевна	
3.	Контактные данные заказчика:	197227, г. Санкт-Петербург, Приморский район, Комендантский пр., д.7, к.1, кв. 329	
4.	Отметка от дневной поверхности, см:	От -3,5 до -93,5	
5.	Цель испытаний:	Химический анализ	
6.	Характеристика образцов:	Крупный песок	
7.	Документы, подтверждающие отбор образцов (дата отбора):	Акт отбора № б/н (24.07.2023) вх. № 04/24-07-п	
8.	Дата получения образцов:	24.07.2023	
9.	Период проведения испытаний:	24.07.2023-31.07.2023	
10.	Документы, устанавливающие правила и методы испытаний (МИ):	Нефтепродукты ПНД Ф 16.1:2.21-98	
11.	Сведения о средствах измерений (СИ), используемых при испытаниях:		
	Наименование СИ, тип (марка), зав. №	Сведения о поверке	Дата окончания действия поверки
	Анализатор жидкости "Флюорат-02" модификации "Флюорат-02-5М", зав. № 9527	С-СП/03-03-2023/229056707	02.03.2024

12. Результаты испытаний:

№ п/п	№ пробы	Рег. № образца	Отметка от дневной поверхности, см:	Определяемый показатель, ед. изм.
				Нефтепродукты, мг/кг
1	2	3	4	5
1	1 _{диз}	04/24-07-01	-3,5	4696
2	2 _{диз}	04/24-07-02	-13,5	4175
3	3 _{диз}	04/24-07-03	-23,5	577
4	4 _{диз}	04/24-07-04	-33,5	42
5	5 _{диз}	04/24-07-05	-43,5	163
6	6 _{диз}	04/24-07-06	-53,5	139
7	7 _{диз}	04/24-07-07	-63,5	81
8	8 _{диз}	04/24-07-08	-73,5	35
9	9 _{диз}	04/24-07-09	-83,5	16
10	10 _{диз}	04/24-07-10	-93,5	14652

13. Мнения и интерпретации: отсутствуют.

14. Дополнительная информация: ООО «Лик» не несет ответственность за соблюдение правил отбора и хранения образцов при транспортировке. Заказчик уведомлен о сроках и условиях хранения образцов для сохранения их состава и свойств.

Разделы 1-7 – сведения, полученные от заказчика.

Условия испытаний (в т.ч. метеоусловия) соответствовали МИ. Неопределенность или погрешность испытаний соответствуют МИ.

Результаты испытаний распространяются на предоставленные образцы.

Протокол составлен в двух экземплярах.

Воспроизведение протокола, включая частичное, возможно только с разрешения ООО «Лик».

Ответственный за оформление протокола: _____ К.Е. Славикова

Конец протокола.

Приложение №3. Вспомогательные расчеты к прогнозу фильтрационной консолидации

Определение коэффициента консолидации крупного песчаного грунта при загрязнении бензином в зависимости от концентрации C , %

Песок крупный. Бензин+вода												при уд. весе воды		при уд. весе НП	
№ п.п.	Поровая жидкость	Фракция	C , д.е.	W , д.е.	γ_w	$\gamma_{нп}$	k_f , см/с	k_f , см/год	e_0	m_v , см ² /кгс	c_v , см ² /год				
1	Б+В	К	0.00	0.30	1.00	0.00	0.165	5 195 005.60	0.80	0.004	1 324 357 859.79	1 324 357 859.79			
2			0.02	0.18	1.00	0.74	0.083	2 625 387.86	1.05	0.009	303 350 855.56	411 155 944.10			
3			0.06	0.12	1.00	0.74	0.059	1 864 874.40	0.82	0.010	193 929 486.21	262 848 314.19			
4			0.12	0.04	1.00	0.74	0.053	1 683 049.14	0.75	0.013	127 288 262.77	172 524 075.32			
Песок средней крупности. Бензин+вода															
№ п.п.	Поровая жидкость	Фракция	C , д.е.	W , д.е.	γ_w	$\gamma_{нп}$	k_f , см/с	k_f , см/год	e_0	m_v , см ² /кгс	c_v , см ² /год				
1	Б+В	С	0.00	0.23	1.00	0.00	0.048	1 502 264.73	0.60	0.005	306 376 740.88	306 376 740.88			
2			0.02	0.18	1.00	0.74	0.017	536 468.18	0.85	0.010	54 704 530.50	74 145 473.70			
3			0.06	0.12	1.00	0.74	0.011	334 680.24	1.00	0.010	32 375 453.54	43 881 070.13			
4			0.12	0.04	1.00	0.74	0.008	263 787.40	0.99	0.013	19 593 871.90	26 557 158.98			
Песок мелкий крупности. Бензин+вода															
№ п.п.	Поровая жидкость	Фракция	C , д.е.	W , д.е.	γ_w	$\gamma_{нп}$	k_f , см/с	k_f , см/год	e_0	m_v , см ² /кгс	c_v , см ² /год				
1	Б+В	М	0.00	0.23	1.00	0.00	0.009	284 012.57	0.62	0.006	49 234 077.45	49 234 077.45			
2			0.02	0.19	1.00	0.74	0.005	157 784.76	0.75	0.008	18 752 158.30	25 416 316.49			
3			0.06	0.14	1.00	0.74	0.003	100 889.55	0.82	0.014	7 201 509.98	9 760 788.81			
4			0.12	0.05	1.00	0.74	0.002	76 923.86	0.77	0.015	4 999 601.07	6 776 363.60			

Определение коэффициента консолидации крупного песчаного грунта при загрязнении дизельным топливом в зависимости от концентрации C , %

Песок крупный. Дизель+вода															
№ п.п.	Поровая жидкость	Фракция	C , д.е.	W , д.е.	γ_w	$\gamma_{нп}$	k_f , см/с	k_f , см/год	e_0	m_v , см ² /кгс	c_v , см ² /год				
1	Д+В	К	0.00	0.30	1.00	0.00	0.165	5 195 005.60	0.80	0.004	1 324 357 859.79	1 324 357 859.79			
2			0.02	0.18	1.00	0.84	0.083	2 617 846.70	0.81	0.006	418 817 783.22	499 901 865.87			
3			0.06	0.14	1.00	0.84	0.011	359 612.57	0.79	0.019	18 698 170.81	22 318 179.53			
4			0.12	0.06	1.00	0.84	0.002	54 265.45	0.79	0.026	2 116 162.00	2 525 855.81			
Песок средней крупности. Дизель+вода															
№ п.п.	Поровая жидкость	Фракция	C , д.е.	W , д.е.	γ_w	$\gamma_{нп}$	k_f , см/с	k_f , см/год	e_0	m_v , см ² /кгс	c_v , см ² /год				
1	Д+В	С	0.00	0.23	1.00	0.00	0.048	1 502 264.73	0.60	0.005	306 376 740.88	306 376 740.88			
2			0.02	0.18	1.00	0.84	0.010	322 573.51	0.80	0.009	36 182 678.25	43 187 727.68			
3			0.06	0.13	1.00	0.84	0.002	48 282.89	0.72	0.010	4 923 484.25	5 876 682.08			
4			0.12	0.06	1.00	0.84	0.001	38 134.57	0.90	0.011	3 499 779.64	4 177 345.00			
Песок мелкий. Дизель+вода															
№ п.п.	Поровая жидкость	Фракция	C , д.е.	W , д.е.	γ_w	$\gamma_{нп}$	k_f , см/с	k_f , см/год	e_0	m_v , см ² /кгс	c_v , см ² /год				
1	Д+В	М	0.00	0.23	1.00	0.00	0.009	284 012.57	0.62	0.006	49 234 077.45	49 234 077.45			
2			0.02	0.20	1.00	0.84	0.002	63 113.90	0.73	0.007	9 315 588.32	11 119 107.57			
3			0.06	0.15	1.00	0.84	0.000	15 288.39	0.70	0.009	1 766 499.62	2 108 498.00			
4			0.12	0.08	1.00	0.84	0.000	76.39	0.83	0.010	7 789.67	9 297.77			

Определение коэффициента консолидации крупного песчаного грунта при загрязнении нефтью в зависимости от концентрации С, %

Песок крупный. Нефть+вода

№ п.п.	Поровая жидкость	Фракция	С, д.е.	W, д.е.	γ_w	$\gamma_{нп}$	kf, см/с	kf, см/год	e0	mv, см ² /кгс	cv, см ² /год	
1	Н+В	К	0.00	0.30	1.00	0.00	0.165	5 195 005.60	0.80	0.004	1 324 357 859.79	1 324 357 859.79
2			0.02	0.19	1.00	0.90	0.0030	94 670.86	0.84	0.007	14 480 611.01	16 118 222.41
3			0.06	0.14	1.00	0.90	0.0018	56 802.51	0.87	0.008	7 425 854.69	8 265 644.13
4			0.12	0.08	1.00	0.90	0.0007	22 721.01	0.81	0.008	2 780 277.31	3 094 698.70

Песок средней крупности. Нефть+вода

№ п.п.	Поровая жидкость	Фракция	С, д.е.	W, д.е.	γ_w	$\gamma_{нп}$	kf, см/с	kf, см/год	e0	mv, см ² /кгс	cv, см ² /год	
1	Н+В	С	0.00	0.23	1.00	0.00	0.048	1 502 264.73	0.60	0.005	306 376 740.88	306 376 740.88
2			0.02	0.19	1.00	0.90	0.0005	15 778.48	0.80	0.014	1 151 448.32	1 281 665.54
3			0.06	0.14	1.00	0.90	0.0004	12 622.78	0.85	0.017	760 447.03	846 445.93
4			0.12	0.07	1.00	0.90	0.0003	9 467.09	0.82	0.025	386 149.63	429 819.26

Песок мелкий. Нефть+вода

№ п.п.	Поровая жидкость	Фракция	С, д.е.	W, д.е.	γ_w	$\gamma_{нп}$	kf, см/с	kf, см/год	e0	mv, см ² /кгс	cv, см ² /год	
1	Н+В	М	0.00	0.23	1.00	0.00	0.009	284 012.57	0.62	0.006	49 234 077.45	49 234 077.45
2			0.02	0.20	1.00	0.90	0.000005	142.01	0.70	0.010	14 480.61	16 118.22
3			0.06	0.15	1.00	0.90	0.000003	94.67	0.80	0.010	9 416.84	10 481.80
4			0.12	0.08	1.00	0.90	0.000002	63.11	0.83	0.011	5 792.24	6 447.29

Сводная таблица с результатами расчета времени стабилизации осадки фундамента на песчаном основании разной крупности при загрязнении нефтью и нефтепродуктами

Время стабилизации t, годы							
Вид НП	Концентрация 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, принятой как удельный вес воды $\gamma_w = 10 \text{ кН/м}^3$;
- Коэффициент консолидации $c_{v, \max}$ определен при удельном весе поровой жидкости, принятой как удельный вес нефти и нефтепродуктов.

Расчет времени стабилизации осадки фундамента на песчаных основаниях разной крупности при загрязнении нефтью и нефтепродуктами

При $c_v = c_{v,min}$ (при удельном весе поровой жидкости $\gamma_w = 10 \text{ кН/м}^3$)													
Фракция	НП	C, %	$c_v, \text{ см}^2/\text{год}$	$h, \text{ см}$	$t, \text{ годы}$	N	$p, \text{ кгс/см}^2$	$m_v, \text{ см}^2/\text{кгс}$	$S_i, \text{ см}$	$S, \text{ см}$	U	$t \text{ стаб.}$	
												годы	сутки
Песок крупный	Бензин	0	1 324 357 859.79	500	1	13070.9	2	0.004	3.92	3.92	1.00	0.00008	0.0
		2	303 350 855.56			2994.0		0.009	8.65	8.65	1.00	0.0003	0.1
		6	193 929 486.21			1914.0		0.010	9.62	9.62	1.00	0.0005	0.2
		12	127 288 262.77			1256.3		0.013	13.22	13.22	1.00	0.0008	0.3
	Дизельное топливо	0	1 324 357 859.79	500	1	13070.9	2	0.004	3.92	3.92	1.00	0.00008	0.0
		2	418 817 783.22			4133.6		0.006	6.25	6.25	1.00	0.0002	0.1
		6	18 698 170.81			184.5		0.019	19.23	19.23	1.00	0.005	2.0
		12	2 116 162.00			20.9		0.026	25.64	25.64	1.00	0.05	17.5
	Нефть	0	1 324 357 859.79	500	1	13070.9	2	0.004	3.92	3.92	1.00	0.00008	0.0
		2	14 480 611.01			142.9		0.007	6.54	6.54	1.00	0.007	2.6
		6	7 425 854.69			73.3		0.008	7.65	7.65	1.00	0.01	5.0
		12	2 780 277.31			27.4		0.008	8.17	8.17	1.00	0.04	13.3
Песок средней крупности	Бензин	0	306 376 740.88	500	1	3023.8	2	0.005	4.90	4.90	1.00	0.0003	0.1
		2	54 704 530.50			539.9		0.010	9.81	9.81	1.00	0.002	0.7
		6	32 375 453.54			319.5		0.010	10.34	10.34	1.00	0.003	1.1
		12	19 593 871.90			193.4		0.013	13.46	13.46	1.00	0.005	1.9
	Дизельное топливо	0	306 376 740.88	500	1	3023.8	2	0.005	4.90	4.90	1.00	0.0003	0.1
		2	36 182 678.25			357.1		0.009	8.92	8.92	1.00	0.003	1.0
		6	4 923 484.25			48.6		0.010	9.81	9.81	1.00	0.02	7.5
		12	3 499 779.64			34.5		0.011	10.90	10.90	1.00	0.03	10.6
	Нефть	0	306 376 740.88	500	1	3023.8	2	0.005	4.90	4.90	1.00	0.0003	0.1
		2	1 151 448.32			11.4		0.014	13.70	13.70	1.00	0.09	32.1
		6	760 447.03			7.5		0.017	16.59	16.60	1.00	0.1	48.6
		12	386 149.63			3.8		0.025	24.08	24.52	1.00	0.3	95.8

Фракция	НП	C, %	c_v , см ² /год	h, см	t, годы	N	p, кгс/см ²	m_v , см ² /кгс	S _t , см	S, см	U	t стаб.	
												годы	сутки
Мелкий песок	Бензин	0	49 234 077.45	500	1	485.9	2	0.006	5.77	5.77	1.00	0.002	0.8
		2	18 752 158.30			185.1		0.008	8.41	8.41	1.00	0.005	2.0
		6	7 201 509.98			71.1		0.014	14.01	14.01	1.00	0.01	5.1
		12	4 999 601.07			49.3		0.015	15.39	15.39	1.00	0.02	7.4
	Дизельное топливо	0	49 234 077.45	500	1	485.9	2	0.006	5.77	5.77	1.00	0.002	0.8
		2	9 315 588.32			91.9		0.007	6.78	6.78	1.00	0.01	4.0
		6	1 766 499.62			17.4		0.009	8.65	8.65	1.00	0.06	20.9
		12	7 789.67			0.1		0.010	2.00	9.81	0.20	13	4747.6
	Нефть	0	49 234 077.45	500	1	485.9	2	0.006	5.77	5.77	1.00	0.002	0.8
		2	14 480.61			0.1		0.010	2.67	9.81	0.27	7	2553.9
		6	9 416.84			0.1		0.010	2.24	10.05	0.22	11	3927.2
		12	5 792.24			0.1		0.011	1.97	10.90	0.18	17	6384.8

При $c_v = c_{v,max}$ (при удельном весе поровой жидкости, принятой как вес нефтепродукта)

Фракция	НП	C, %	c_v , см ² /год	h, см	t, годы	N	p, кгс/см ²	m_v , см ² /кгс	S _t , см	S, см	U	t стаб.	
												годы	сутки
Песок крупный	Бензин	0	1 324 357 859.79	500	1	13070.9	2	0.004	3.92	3.92	1.00	0.00008	0.0
		2	411 155 944.10			4057.9		0.009	8.65	8.65	1.00	0.0002	0.1
		6	262 848 314.19			2594.2		0.010	9.62	9.62	1.00	0.0004	0.1
		12	172 524 075.32			1702.7		0.013	13.22	13.22	1.00	0.0006	0.2
	Дизельное топливо	0	1 324 357 859.79	500	1	13070.9	2	0.004	3.92	3.92	1.00	0.00008	0.0
		2	499 901 865.87			4933.8		0.006	6.25	6.25	1.00	0.0002	0.1
		6	22 318 179.53			220.3		0.019	19.23	19.23	1.00	0.005	1.7
		12	2 525 855.81			24.9		0.026	25.64	25.64	1.00	0.04	14.6
	Нефть	0	1 324 357 859.79	500	1	13070.9	2	0.004	3.92	3.92	1.00	0.00008	0.0
		2	16 118 222.41			159.1		0.007	6.54	6.54	1.00	0.006	2.3
		6	8 265 644.13			81.6		0.008	7.65	7.65	1.00	0.01	4.5

		12	3 094 698.70			30.5		0.008	8.17	8.17	1.00	0.03	12.0
Фракция	НП	C, %	c _v , см ² /год	h, см	t, годы	N	ρ, кгс/см ²	m _v , см ² /кгс	S _t , см	S, см	U	t стаб.	
												годы	сутки
Песок средней крупности	Бензин	0	306 376 740.88	500	1	3023.8	2	0.005	4.90	4.90	1.00	0.0003	0.1
		2	74 145 473.70			731.8		0.010	9.81	9.81	1.00	0.001	0.5
		6	43 881 070.13			433.1		0.010	10.34	10.34	1.00	0.002	0.8
		12	26 557 158.98			262.1		0.013	13.46	13.46	1.00	0.004	1.4
	Дизельное топливо	0	306 376 740.88	500	1	3023.8	2	0.005	4.90	4.90	1.00	0.0003	0.1
		2	43 187 727.68			426.2		0.009	8.92	8.92	1.00	0.002	0.9
		6	5 876 682.08			58.0		0.010	9.81	9.81	1.00	0.02	6.3
		12	4 177 345.00			41.2		0.011	10.90	10.90	1.00	0.02	8.9
	Нефть	0	306 376 740.88	500	1	3023.8	2	0.005	4.90	4.90	1.00	0.0003	0.1
		2	1 281 665.54			12.6		0.014	13.70	13.70	1.00	0.08	28.9
		6	846 445.93			8.4		0.017	16.60	16.60	1.00	0.1	43.7
		12	429 819.26			4.2		0.025	24.23	24.52	0.99	0.2	86.0
Фракция	НП	C, %	c _v , см ² /год	h, см	t, годы	N	ρ, кгс/см ²	m _v , см ² /кгс	S _t , см	S, см	U	t стаб.	
												годы	сутки
Мелкий песок	Бензин	0	49 234 077.45	500	1	485.9	2	0.006	5.77	5.77	1.00	0.002	0.8
		2	25 416 316.49			250.8		0.008	8.41	8.41	1.00	0.004	1.5
		6	9 760 788.81			96.3		0.014	14.01	14.01	1.00	0.01	3.8
		12	6 776 363.60			66.9		0.015	15.39	15.39	1.00	0.01	5.5
	Дизельное топливо	0	49 234 077.45	500	1	485.9	2	0.006	5.77	5.77	1.00	0.002	0.8
		2	11 119 107.57			109.7		0.007	6.78	6.78	1.00	0.01	3.3
		6	2 108 498.00			20.8		0.009	8.65	8.65	1.00	0.05	17.5
		12	9 297.77			0.1		0.010	2.17	9.81	0.22	11	3977.5
	Нефть	0	49 234 077.45	500	1	485.9	2	0.006	5.77	5.77	1.00	0.002	0.8
		2	16 118.22			0.2		0.010	2.82	9.81	0.29	6	2294.4
		6	10 481.80			0.1		0.010	2.35	10.05	0.23	10	3528.2
		12	6 447.29			0.1		0.011	2.06	10.90	0.19	16	5736.1

Приложение №4. Справка о внедрении результатов исследования



Акционерное общество
"Трест № 68"

тел: (812) 464-2655
 факс: (812)464-2670
 e-mail: mail@trest68.ru
 www: www.trest68.ru

196641, Россия, Санкт-Петербург, п. Металлострой, ул. Школьная, д.4

№ *дд4* от *дб. 06. ддд57.*
 на от

В Диссертационный Совет
 24.2.380.04 при ФГБОУ ВО
 «Санкт-Петербургский государственный
 архитектурно-строительный университет»

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационного исследования «Влияние
 загрязнения песчаных грунтов нефтепродуктами на состояние
 оснований сооружений», выполненных

Квашук Алиной Витальевной в рамках подготовки научно-
 квалификационной работы на соискание ученой степени кандидата
 технических наук по специальности 2.1.2. – Основания и фундаменты,
 подземные сооружения

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационной работы
 «Влияние загрязнения песчаных грунтов нефтепродуктами на состояние
 оснований сооружений» старшего преподавателя кафедры геотехники
 СПбГАСУ Квашук А.В. по исследованию загрязнения песчаных грунтов
 нефтью и нефтепродуктами могут быть использованы в реальном
 проектировании сооружений нефтедобывающих и нефтеперерабатывающих
 комплексов, промышленных предприятиях для оценки их возможных
 деформаций.

При выполнении работ по устройству основания под сооружения
 различного назначения на площадках строительства на территории
 Петербургского нефтяного терминала, а также на площадке контейнерного
 терминала КТСП, при реконструкции причалов № 102 и 102а Большого
 морского порта Санкт-Петербурга были использованы результаты
 выполненных диссертационных исследований Квашук А.В.

На основании представленных Квашук А.В. материалов по результатам исследования изменений гранулометрического состава песчаных грунтов при взаимодействии с нефтью и нефтепродуктами; установленным закономерностям изменения коэффициента фильтрации песчаных грунтов при взаимодействии с нефтью и нефтепродуктами; изменению механических характеристик песчаных грунтов разной крупности при взаимодействии с нефтью и нефтепродуктами проведены расчетные обоснования оптимизации проектных решений. Разработанные Квашук А.В, рекомендации по использованию в методике расчета оснований и фундаментов зданий и сооружений по предельным состояниям на песчаных основаниях, подверженных нефтяному загрязнению могут быть использованы при проектировании на нефтедобывающих, нефтеперерабатывающих и промышленных предприятиях. Научные разработки Квашук А.В. при использовании основных расчетных подходов в проектировании позволили обеспечить экономический эффект в сумме 14 388 520 рублей.

Генеральный директор



П.И. Волков