

УДК 624.131

© А. В. Квашук, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: alina_kvashuk@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-2-62-73

© A. V. Kvashuk, post-graduate student
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: alina_kvashuk@mail.ru

К ВОПРОСУ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С НЕФТЕПРОДУКТАМИ

REGARDING THE ISSUE OF CHANGING THE FILTRATION PROPERTIES OF OIL-CONTAMINATED SANDY SOILS

Приведен обзор существующих лабораторных исследований по изучению влияния загрязнения нефтепродуктами песчаных грунтов на их фильтрационные свойства и гранулометрический состав. На основе сопоставления результатов теоретического анализа с результатами лабораторных испытаний определено возможное влияние гранулометрического состава на фильтрационные свойства песчаных грунтов, загрязненных нефтепродуктами, и влияние концентрации нефтепродукта на изменение коэффициента фильтрации крупного песка. Сделан вывод о снижении коэффициента фильтрации песчаных грунтов при их загрязнении нефтепродуктами, что необходимо учитывать при прогнозировании осадки во времени, а также изменении несущей способности основания.

Ключевые слова: песчаный грунт, нефть, дизельное топливо, концентрация, многофазная фильтрация, агрегирование, диспергирование, поровая жидкость.

The article presents the results of an analytical review of existing studies of domestic and foreign authors on the effect of oil contamination of sandy soils on their filtration properties and granulometric composition. The influence of the granulometric composition on the filtration properties of sandy soils contaminated with petroleum products and the influence of the concentration of petroleum products on the change in the filtration coefficient of sandy soils is determined. It is concluded that the filtration coefficient of sandy soils decreases when they are contaminated with oil products, which should be taken into account when predicting settlement in time, as well as changes in the bearing capacity of the foundation.

Keywords: sandy soil, oil, diesel fuel, concentration, multiphase filtration, aggregation, dispersion, pore fluid.

Введение

Анализ возможных путей развития топливно-энергетического комплекса РФ показывает, что Россия занимает седьмое место в мире по запасам нефти после стран Ближнего и Среднего Востока и Венесуэлы. По прогнозам они составляют 6,65 млрд т, т. е. 4,7 % от мировых запасов нефти. Правительством РФ были предприняты шаги для оптимизации топливно-энергетического

баланса страны¹ с помощью расконсервации месторождений, ранее признанных нерентабельными, интеграции новейших методов нефтеотдачи на уже существующих предприятиях и т. д. Это приведет к увеличению протяженности магистральных нефтепроводов, количества добывающих и разведы-

¹ Стратегия РФ до 2030 года / ФГАОУ «СК ТЭК» Минэнерго России. URL: <http://minenergo.gov.ru/activity/energostrategy/> (дата обращения: 14.12.2011).

вательных скважин и обслуживающих их зданий и сооружений [1–3].

Наряду с высокими показателями запасов и добычи нефти, Россия занимает лидирующие позиции по уровню загрязнения окружающей среды горюче-смазочными материалами. Экологическая нагрузка возрастает, так как меры по оптимизации процессов добычи, транспортировки и переработки нефти сопровождаются низким уровнем обеспечения технологических процессов ее переработки, транспортировки и хранения² [4]. Это же подтверждают исследователи в работе [5]: «...по данным Минпромэнерго РФ уровень износа технологического оборудования на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) в настоящее время составляет 80 %, а срок службы отдельных технологических установок в разы превысил допустимые пределы. Из 27 НПЗ, расположенных на территории России, шесть были введены в эксплуатацию еще до войны, столько же построено до 1950 года и восемь введены в строй до 1960 года, то есть 20 из 27 заводов работают более 60 лет».

В соответствии с Федеральным законом № 116 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» резервуары для хранения нефтепродуктов (далее — НП) относятся к группе опасных объектов, и поэтому к ним предъявляются гораздо более высокие требования к расчету по первой (прочность и устойчивость) и второй (расчет по деформациям) группам предельных состояний, в том числе к расчету оснований и фундаментов [6–10]. По данным Министерства энергетики, за 2019 год произошло более 17 000 аварий, сопровождавшихся аварийными разливами нефтепродуктов. Загрязнение грунтового основания зданий и сооружений нефтяного комплекса не только является экономической и экологической

проблемой, но и приводит к изменению физико-механических свойств грунтов, что должно учитываться как при эксплуатации уже существующих сооружений, так и при проектировании новой застройки на территориях, подверженных техногенному загрязнению.

В связи с этим необходимо иметь сведения о качественных и количественных изменениях свойств песчаных грунтов, подверженных загрязнению нефтепродуктами, чтобы давать достоверную оценку несущей способности основания и дополнительной осадке сооружений в случае аварийного разлива НП на грунтовое основание.

За последние 20 лет отечественными и зарубежными авторами наработан значительный материал по изучению свойств, состава и состояния грунтов при их загрязнении нефтепродуктами. Более того, выполнен значительный объем лабораторных испытаний, направленных на изучение влияния других сопутствующих факторов, таких как давление от веса сооружения, температура (климатические условия северных регионов), действие микробиотической составляющей грунтов и т. д. Совокупность проведенных исследований прочностных [11–17] и деформационных [15, 17–22] характеристик грунтов позволила прогнозировать общую тенденцию и направленность процессов, происходящих в грунтах при их загрязнении нефтепродуктами. Однако в настоящее время вопрос о характере и степени изменения свойств загрязненных грунтов остается недостаточно изученным, так как результаты проведенных исследований не всегда согласуются между собой, что порождает противоречия и определяет актуальность и дальнейшее направление исследований.

Ранее, в работах [23, 24], нами был обобщен мировой опыт исследования физических, прочностных и деформационных характеристик песчаных грунтов, загрязненных нефтепродуктами. Целью настоящей

² Экологическая доктрина Российской Федерации / Совет безопасности РФ. URL: <http://www.scrf.gov.ru/documents/24.html> (дата обращения: 14.12.2011).

статьи является определение теоретических предпосылок изменения коэффициента фильтрации таких грунтов.

Методы исследования

В качестве методологической основы использован теоретический анализ результатов отечественных и зарубежных исследований об изменении фильтрационных свойств песчаных грунтов при взаимодействии с нефтепродуктами. Проведены лабораторные испытания песчаных грунтов по определению изменения коэффициента фильтрации в зависимости от концентрации нефтепродукта в составе грунта в соответствии с ГОСТ 25584–2016 «Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации».

Результаты

Влияние гранулометрического состава на фильтрационные свойства песчаных грунтов, загрязненных нефтепродуктами

Изучение фильтрационных свойств песчаных грунтов, загрязненных нефтепродуктами, является методически сложной задачей ввиду многофакторного состава нефти в зависимости от места ее добычи, большого количества существующих методик приготовления опытных образцов, а также многообразия возможных минералогических составов песков, так как породообразующий минерал определяет интенсивность химического взаимодействия между НП и грунтом. В настоящее время сформировались две различные точки зрения на миграцию НП в дисперсных грунтах.

Авторы [25–27] 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 [28, 29].

В настоящее время теория В. А. Королева наиболее популярна, так как получила многочисленные 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 [30–31] 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 (рис. 1).

Так, в песках, загрязненных легкой нефтью, вне зависимости от ее концентрации наблюдается агрегирование частиц (см. рис. 1) и уменьшение объема порового пространства как за счет изменения формы частиц, так и за счет защемленного 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. Так, в исследованиях [32] экспериментально установлено, что при добавлении в грунт 2,5 % нефти происходит агрегация частиц

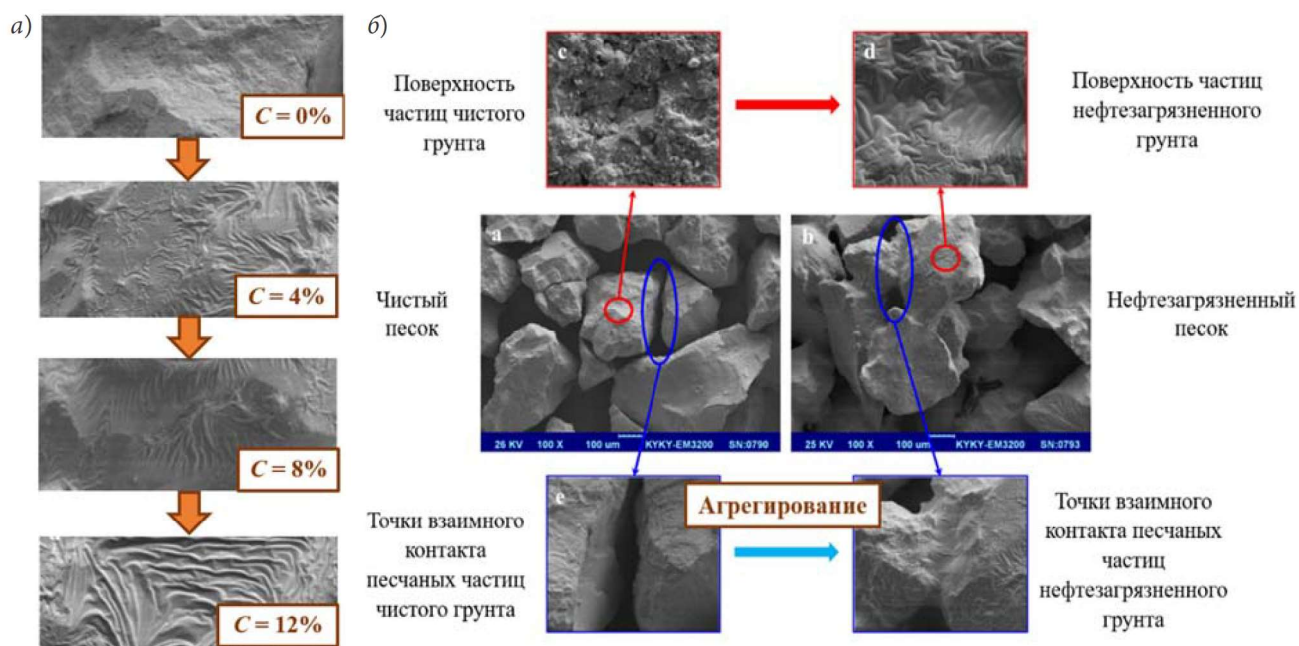


Рис. 1. Изменение гранулометрического состава песков, загрязненных легкой нефтью: а — изменение поверхности минеральной частицы песчаного грунта; б — изменение гранулометрического состава песчаного грунта (агрегирование частиц) [30–31]

размером менее 0,005 мм, а при загрязнении 10 % нефти — диспергирование микроагрегатов. Диспергирование песчаного грунта наблюдалось в работах [33, 34] при загрязнении мазутом и бензином; агрегирование имело место в работе [13], где в качестве нефтепродукта использовалось соляровое масло.

Анализ фильтрационных свойств песчаного грунта при взаимодействии с нефтепродуктами невозможен без анализа изменения гранулометрического состава, так как с крупностью частиц песка возрастает его пористость и вместе с ней фильтрационная способность. Так, 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 — в случае наличия и крупно-, и мелкодисперсных фракций в составе песчаного грунта.

Для подтверждения наличия процессов агрегирования и диспергирования песчаных грунтов при взаимодействии с нефтепродуктами нами было выполнено лабораторное исследование изменения гранулометрического состава песков крупных, средней крупности, мелких (табл. 1). В качестве загрязняющего нефтепродукта использовалось дизельное топливо при его концентрации $C = 1\%$ (1 г дизельного топлива на 100 г навески песка) по массе песка в воздушно-сухом состоянии.

Результаты лабораторных исследований показали, что при загрязнении дизельным топливом крупных и мелких песков наблюдается переход пылевой фракции в более крупные разности за счет снижения массы пылевой фракции на 54 % у крупных песков и на 24 % у мелких песков и увеличения содержания средней фракции на 58 %

у крупных и 5 % у мелких песков. При этом масса крупной фракции уменьшилась на 1 % для крупных песков и на 15 % у мелких, что подтверждает возможность диспергирования грунтов при загрязнении нефтепродуктом. При загрязнении дизельным топливом песков средней крупности наблюдается увеличение массы мелкой фракции на 80 % и крупной на 16 % за счет перехода пылевой фракции в более крупные разности (агрегирование).

С учетом возможных изменений гранулометрического состава прогнозирование характера и степени изменения фильтрационных свойств (коэффициента фильтрации) является затруднительным.

Таким образом, существующие исследования изменения гранулометрического состава нефтезагрязненных песков дают противоречивые результаты, и данная проблема является актуальной для дальнейшего изучения.

Таблица 1

**Изменение гранулометрического состава
песчаного грунта при загрязнении дизельным
топливом**

Песок крупный, 100 г				
Время измерения	Масса фракции, г			
	пылевая	мелкая	средняя	крупная
До загрязнения	8,00	8,00	8,00	76,00
После загрязнения	3,70	8,35	12,60	75,35
Песок средней крупности, 100 г				
Время измерения	Масса фракции, г			
	пылевая	мелкая	средняя	крупная
До загрязнения	8,00	8,00	76,00	8,00
После загрязнения	3,05	14,35	73,30	9,30
Песок мелкий, 100 г				
Время измерения	Масса фракции, г			
	пылевая	мелкая	средняя	крупная
До загрязнения	8,00	76,00	8,00	8,00
После загрязнения	6,05	70,75	16,40	6,80

Влияние концентрации нефтепродуктов на коэффициент фильтрации песчаных грунтов

Анализ отечественной и зарубежной литературы об изменении коэффициента фильтрации песчаных грунтов, загрязненных НП, показал, что большинство авторов констатируют снижение водопроницаемости и, следовательно, коэффициента фильтрации с увеличением концентрации нефтепродукта в составе испытуемых образцов. Результаты лабораторных испытаний Akinwumi, Al-Sanad и др. [14, 35–40] сведены на рис. 2 [31].

К схожему результату пришли авторы исследования [13], в рамках которого зафиксировано снижение коэффициента фильтрации водонасыщенного песка при загрязнении соляровым маслом при увеличении концентрации НП, в то время как у песка в воздушно-сухом состоянии коэффициент фильтрации, наоборот, увеличивался с ростом концентрации НП. В связи с этим логично 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).

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, до-

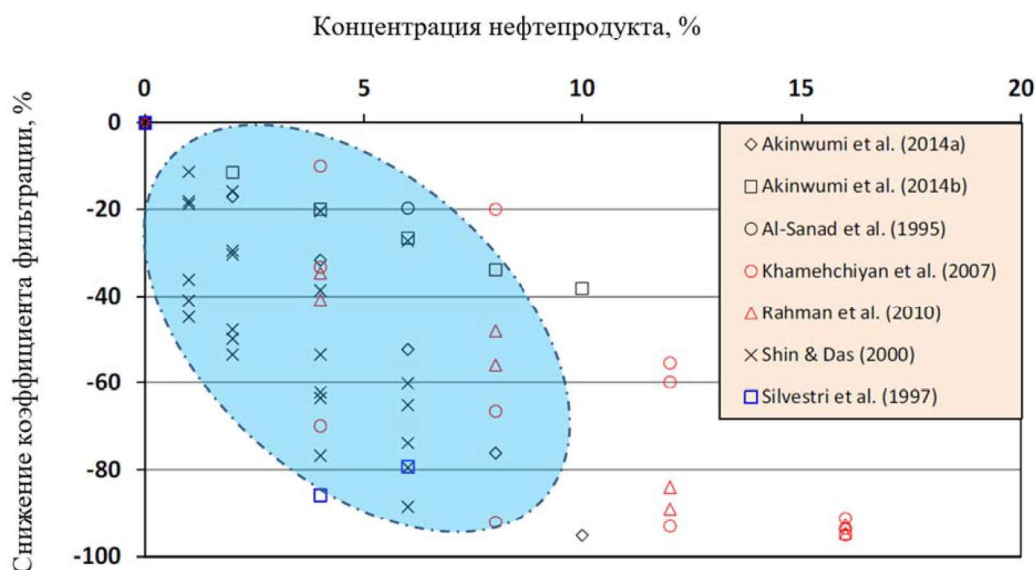


Рис. 2. Зависимость коэффициента фильтрации песчаного грунта от концентрации НП [31]

ломиты и т. д., а к гидрофобным — грунты, не имеющие структурных связей, такие как гравий, щебень, пески и т. д. Авторы [41] пишут: «...в гидрофильном грунте вода под действием капиллярного давления вытесняет нефть в более крупные поры...» (рис. 3), «...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 и, следовательно, коэффициент фильтрации».

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 и снижение угла внутреннего трения песчаных

грунтов, что подтверждается многочисленными лабораторными испытаниями [11–17].

Для определения характера и степени изменения коэффициента фильтрации песчаного грунта в зависимости от концентрации нефтепродукта нами было проведено 120 лабораторных исследований, в рамках которых в качестве испытуемого грунта принимался крупный песок, в качестве нефтепродукта — бензин АИ-95. Испытания проводились для песка в плотном и рыхлом сложении, в сухом и водонасыщенном состоянии. Концентрация нефтепродукта изменялась от 0 до 10 % с шагом 2 %. Испытания проводились в стационарном режиме, при гидравлическом градиенте $I = 1$ в соответствии с ГОСТ 25584–2016.

Лабораторные испытания показали, что с увеличением концентрации НП (бензина) в песке крупном коэффициент фильтрации снижается вне зависимости от плотности сложения и водонасыщения. Отметим, что в рыхлых и плотных песках при одинаковых значениях концентрации НП (бензина) фильтрация происходит быстрее при отсутствии воды в порах грунта, а при одинаковых значениях влажности и концентрации НП

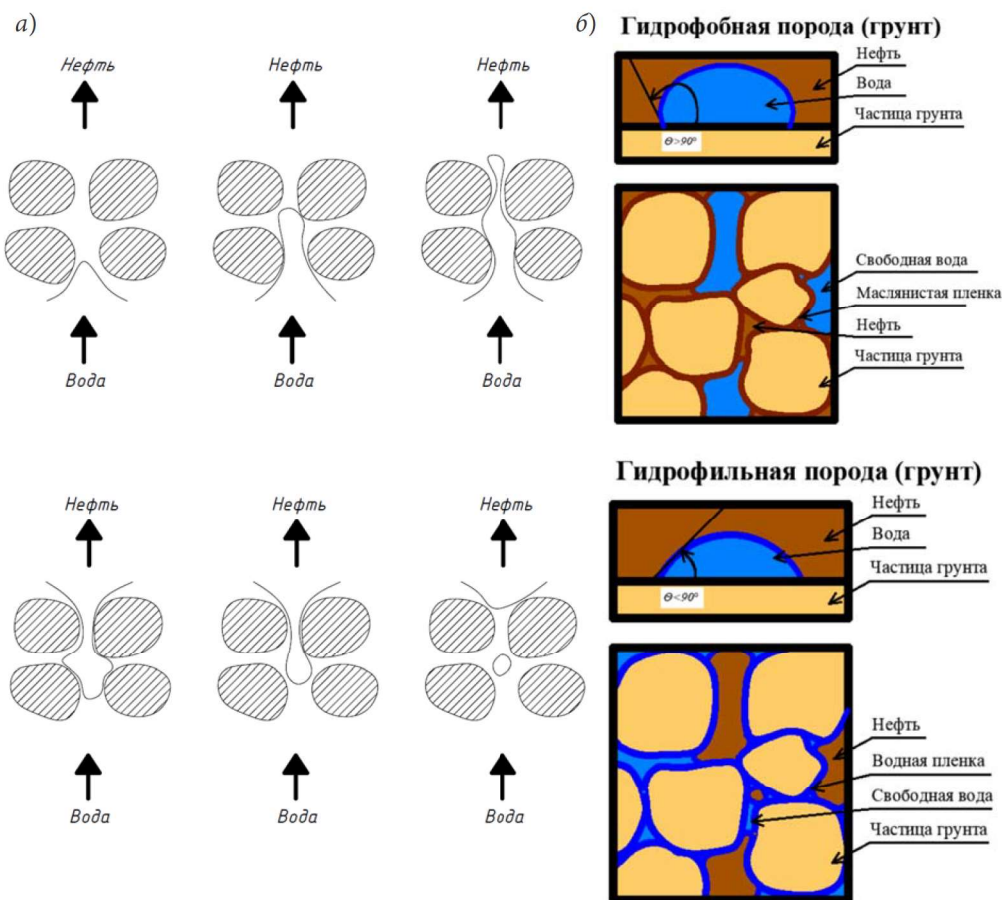


Рис. 3. Характер вытеснения нефти водой в гидрофобном (а) и гидрофильном (б) грунте [41]

(бензина) в песке крупном процесс инфильтрации в рыхлом сложении происходит быстрее, чем в плотном (рис. 4). В целом коэффициент фильтрации песчаного грунта при загрязнении бензином снижается на 50 % и более, за исключением песков в рыхлом сложении в сухом и водонасыщенном состояниях, при которых наблюдается снижение коэффициента фильтрации на 11–28 % при концентрации 2–4 % (табл. 2).

Выводы

По итогу выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Загрязнение грунтового основания зданий и сооружений нефтяного комплекса не только является экономической и экологической проблемой, но и приводит к изменению физико-механических свойств грунтового основания, что должно учитываться

как при эксплуатации уже существующих сооружений, так и при проектировании новой застройки на территориях, подверженных техногенному загрязнению.

2. Результаты лабораторных исследований показали, что, кроме процессов агрегирования частиц песчаного грунта при загрязнении нефтепродуктами, возможен и обратный процесс — диспергирование, т. е. расщепление микроагрегатов на более мелкие фракции.

3. При загрязнении дизельным топливом крупных и мелких песков наблюдается переход пылевой фракции в более крупные разности за счет снижения массы пылевой фракции на 54 % у крупных песков и на 24 % у мелких песков и увеличения содержания средней фракции на 58 % у крупных и 5 % у мелких песков. При этом масса

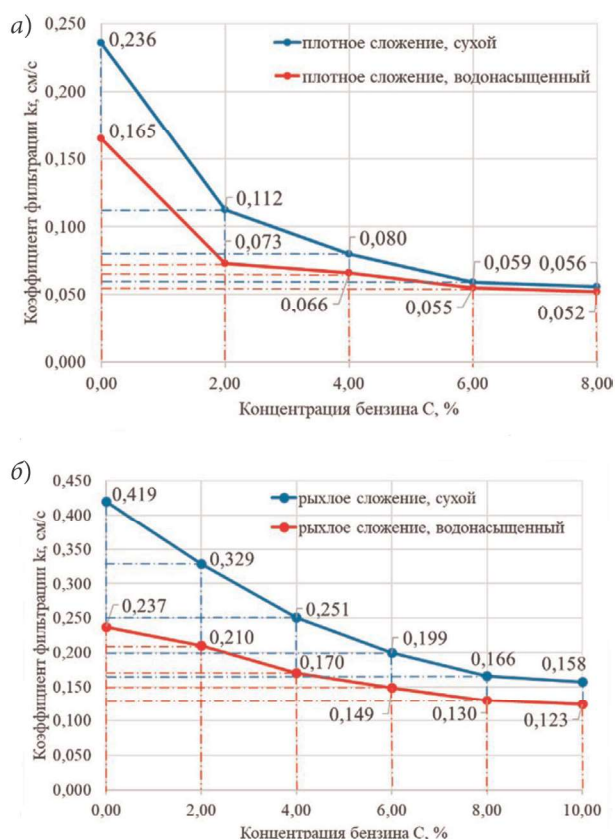


Рис. 4. Графики зависимости коэффициента фильтрации k_f (см/с) от концентрации бензина C , %: а — крупный песок в плотном сложении; б — крупный песок в рыхлом сложении

крупной фракции уменьшилась на 1 % для крупных песков и на 15 % у мелких, что подтверждает возможность диспергирования грунтов при загрязнении нефтепродуктом. При загрязнении дизельным топливом песков средней крупности наблюдается увеличение массы мелкой фракции

на 80 % и крупной на 16 % за счет перехода пылевой фракции в более крупные разности (агрегирование). Полученные лабораторные данные подтверждают возможность одновременного агрегирования и диспергирования песчаного грунта при взаимодействии с нефтепродуктом (бензином) при наличии и крупно-, и мелко-дисперсных фракций в составе песчаного грунта.

4. Лабораторные испытания показали, что с увеличением концентрации НП (бензина) в песке крупном коэффициент фильтрации снижается вне зависимости от плотности сложения и водонасыщения.

5. Коэффициент фильтрации песчаного грунта при загрязнении бензином снижается на 50 % и более, за исключением песков в рыхлом сложении в сухом и водонасыщенном состояниях, при которых наблюдается снижение коэффициента фильтрации на 11–28 % при концентрации 2–4 %.

Полученные результаты свидетельствуют о снижении коэффициента фильтрации песчаных грунтов при их загрязнении нефтепродуктами, что необходимо учитывать при прогнозировании осадки во времени, а также изменении несущей способности основания.

Финансирование. Статья публикуется по результатам исполнения гранта СПбГАСУ 2024 года.

Таблица 2

Зависимость коэффициента фильтрации k_f (см/с) песчаного грунта (песок крупный) от концентрации нефтепродукта

№ п/п	Плотность сложения испытуемых образцов	Концентрация НП (бензина) C , %					
		0 (чистый песок)	2	4	6	8	10
1	Предельно рыхлое сухое	0,419	0,329	0,251	0,199	0,166	0,158
2	Предельно рыхлое водонасыщенное	0,237	0,210	0,170	0,149	0,130	0,123
3	Предельно плотное сухое	0,236	0,112	0,080	0,059	0,056	–
4	Предельно плотное водонасыщенное	0,165	0,073	0,066	0,055	0,052	–

Библиографический список

1. 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.
2. Мамонов Р. ЕС и США признали «глобальное лидерство» России // Радио «Голос России». 2011. 2 дек. URL: <http://rus.ru/rvr.ru/2011/12/02/61351914.html> (дата обращения: 12.12.2011).
3. Коршаков А. А. Запасы, добыча и транспортировка нефти в странах СНГ. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2007. 188 с.
4. Попов А. А. Природоохранная деятельность в топливно-энергетическом комплексе // ВИНТИ. Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 2003. № 3. С. 91–95.
5. 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.
6. 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.
7. 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>.
8. 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.
9. 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.
10. Дашко Р. Э. Проблемы геоэкологии в геотехнике // Реконструкция городов и геотехническое строительство. 2003. № 7. С. 115–128.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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. Pp. 123–132.
18. 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. Pp. 384–387.
19. Evgin E., Amor F. B., Altaee A., Lord S., Konuk I. Effect of Oil Spill on Soil Properties // Proceedings of 8th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 1989. Vol. 1. Pp. 715–720.
20. 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. Pp. 61–74.
21. Puri V. K., Das B. M., Cook E. C., Shin E. C. Geotechnical Properties of Crude Oil-Contaminated Sand // Analysis of Soils Contaminated with Petroleum Constituents. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1994. Pp. 75–88.
22. Vesic A. S. Analysis of Ultimate Loads of Shallow Foundations // Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1973. Vol. 99 (1). Pp. 45–73.
23. Квашук А. В. Влияние загрязнения песчаного грунта нефтепродуктами на его физические свойства // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 1 (96). С. 57–66. DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-1-57-66. EDN EGNVSV.
24. Квашук А. В. Изменение механических свойств песчаных грунтов при их загрязнении нефтепродуктами // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 3 (98). С. 33–43. DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-3-33-43. EDN VRIDZK.
25. Шевченко Л. В., Ширинова И. В. Прочностные свойства мерзлых глинистых грунтов, загрязненных

нефтью // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2008. № 1. С. 78–84.

26. 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.

27. Клубова Т. Т. Глинистые минералы и их роль в генезисе, миграции и аккумуляции нефти. М.: Недра, 1973. 256 с.

28. 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.

29. Королев В. А. Очистка грунтов от загрязнений. М.: Наука / Интерпериодика, 2001. 364 с.

30. Rajabi H., Sharifipour M. Effects of light crude oil contamination on small-strain shear modulus of Firoozkooh sand // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2019. Vol. 23 (11). Pp. 1351–1367. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1347525>.

31. 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>.

32. 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 // Материалы Междунар. конф. «Город и геологические опасности». Т. 2. СПб., 2006. С. 18–20.

33. 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.

34. 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.

35. 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.

36. 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.

37. 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>.

38. 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>.

39. Shin E. C., Das B. M. Some physical properties of unsaturated oil-contaminated sand // Advances in unsaturated geotechnics. Proceedings of Geo-Denver. Denver, Colorado, August 5–8, 2000. Pp. 142–152. [https://doi.org/10.1061/40510\(287\)9](https://doi.org/10.1061/40510(287)9).

40. Silvestri V., Mikhail N., Souli M. Permeability response of oil-contaminated compacted clays // ASTM International STP 1275. 1997. Pp. 62–74.

41. Покрепин Б. В. Разработка нефтяных и газовых месторождений. 2-е изд., доп. и перераб. Волгоград: Ин-Фолио, 2010. 223 с.

References

1. Seluyanov A. A., Chernova K. V., Shutov N. V. *Analiz istochnikov popadaniya nefiti v gidrosferu Zemli* [Analysis of the sources of oil ingress into the Earth's hydrosphere]. *Neftegazovoe delo – Oil and gas business*, 2011, vol. 9, no. 3, pp. 96–104.

2. Mamonov R. ES i SSHa priznali «global'no eliderstvo» Rossii [The EU and the U.S. recognized Russia's "global leadership"]. *Radio«GolossRossii» – Radio "Voice of Russia"*, 2011, 2 Dec. Available at: <http://rus.ru/rv.ru/2011/12/02/61351914.html> (accessed: 12.12.2011).

3. Korshak A. A. *Zapasy, добыча i transportirovka nefiti v stranakh SNG* [Reserves, production and transportation of oil to the CIS countries]. Ufa, Dizayn Poligraf Servis Publ., 2007, 188 p.

4. Popov A. A. *Prirodookhrannaya deyatel'nost' v toplivno-energeticheskom komplekse* [Nature protection activity in the fuel and energy complex]. VINITI. *Problemy okruzhayushchey sredy i prirodnikh resursov – VINITI. Problems of Environment and Natural Resources*, 2003, no. 3, pp. 91–95.

5. Goldberg V. M., Zverev V. P., Arbuzov A. I., Kazennov S. M. *Tekhnogennoe zagryaznenie prirodnikh vod uglevodorodami i ego ekologicheskie posledstviya* [Technogenic pollution of natural waters with hydrocarbons and its ecological consequences]. Moscow, Nauka Publ., 2001, 123 p.

6. Mustafin F. M., et al. *Rezervuary dlya nefiti i nefteproduktov* [Reservoirs for oil and oil products]. St. Petersburg, Nedra Publ., 2010, vol. 1. *Konstruktsii i oborudovanie* [Constructions and equipment]. 477 p.

7. Zemlyanskij A. A. *Innovatsionnye printsipy proektirovaniya rezervuarov novogo pokoleniya dlya khraneniya uglevodorodov* [Innovative principles of designing new generation tanks for hydrocarbon storage]. *Trudy Simpoziuma 2013 «Perspektivnye Tekhnologii XXI veka»* [Proceedings of the Symposium 2013 – «Promising Technologies of the XXI century»]. Balakovskij institut tekhniki, tekhnologii i upravleniya (filial) SGTU, 2012, 35 p. Available at: <http://www.sworld.com.ua/simpoz2/112.pdf>.
8. Mangushev R. A., Gorodnova E. V. *Ustroystvo osnovanij i fundamentov pod stal'nye rezervuary emkost'yu 50 tys.m3 s plavayushchey kryshey* [Design of bases and foundations under steel tanks with a capacity of 50 000 m3 with floating roof]. *Trudy 59-y nauch. konf. SPbGASU* [Proceedings of the 59-th scientific conference of SPbGASU]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2002, pt. I, pp. 36–38.
9. Konovalov P. A., et al. *Fundamenty stal'nykh rezervuarov i deformatsii ikh osnovanij* [Foundations of steel tanks and deformations of their bases]. Ed. by Konovalov P. A. Moscow, ASV Publ., 2009, 336 p.
10. Dashko R. E. *Problemy geoeologii v geotekhnike* [Problems of geoeology in geoenineering]. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoe stroitel'stvo – Reconstruction of cities and geotechnical construction*, 2003, no. 7, pp. 115–128.
11. Osovetskij B. M., et al. *Zakonomernosti izmeneniya prochnostnykh svoystv peskov, zagryaznennykh dizel'nykh toplivom* [Regularities of change in strength properties of sands contaminated with diesel fuel]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental Research*, 2014, no. 9-8, pp. 1769–1774.
12. Kachenov V. I., Seredin V. V., Karmanov S. V. *K voprosu o vliyaniy neft'nykh zagryaznenij na svoystva gruntov* [To the issue of the impact of oil contamination on soil properties]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala – Geology and Mineral Resources of the Western Urals*, 2011, no. 14, pp. 164–165.
13. Dashko R. E., Lange I. Yu. *Inzhenerno-geologicheskie aspekty negativnykh posledstvij kontaminatsii dispersnykh gruntov nefteproduktami* [Engineering and geological aspects of the negative consequences of the contamination of dispersed soils with oil products]. *Zapiski Gornogo instituta – Bulletin of the Mining Institute*, 2017, vol. 228, pp. 624–630. DOI 10.25515/PML 2017.6.624.
14. 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.
15. Al'-Adili A., Yali K., Shakir A. *Issledovanie vliyaniya zagryazneniya neft'yu peschanogo i gipsosoderzhashchego gruntov na prochnost'* [Investigation of the effect of oil contamination of sandy and gypsum containing soils on strength]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, Foundations and Soil Mechanics*, 2017, no. 4, pp. 30–35.
16. 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.
17. 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, pp. 123–132.
18. 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, pp. 384–387.
19. Evgin E., Amor F. B., Altaee A., Lord S., Konuk I. Effect of oil spill on soil properties. *Proceedings of the 8-th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 1989, vol. 1, pp. 715–720.
20. 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, pp. 61–74.
21. Puri V. K., Das B. M., Cook E. C., Shin E. C. Geotechnical Properties of Crude Oil-Contaminated Sand. *Analysis of Soils Contaminated with Petroleum Constituents*, West Conshohocken, PA: ASTM International, 1994, pp. 75–88.
22. Vesic A. S. Analysis of ultimate loads of shallow foundations. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1973, vol. 99 (1), pp. 45–73.
23. Kvashuk A. V. *Vliyanie zagryazneniya peschanogo grunta nefteproduktami na ego fizicheskie svoystva* [The effect of contamination of sandy soil with oil products on its physical properties]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2023, no. 1 (96), pp. 57–66. DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-1-57-66. EDNEGNVSV.
24. Kvashuk A. V. *Izmenenie mekhanicheskikh svoystv peschanykh gruntov pri ikh zagryaznenii nefteproduktami* [Change of mechanical properties of sandy soils as result of contamination with oil products]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2023, no. 3 (98), pp. 33–43. DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-3-33-43. EDN VRIDZK.
25. Shevchenko L. V., Shirshova I. V. *Prochnostnye svoystva merzlykh glinistyykh gruntov, zagryaznennykh neft'yu* [Strength properties of frozen clay soils contaminated with oil]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya – Geoecology*.

Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology, 2008, no. 1, pp. 78–84.

26. Bordovskaya M. V., Gadzhi-Kasumov A. S. Kartsev A. A. *Osnovy geokhimii, geokhimicheskie metody poiskov, razvedki i kontrolya za razrabotkoy mestorozhdenij nefi i gaza* [Fundamentals of geochemistry, geochemical methods of prospecting, exploration and control over development of oil and gas fields]. Moscow, Nedra Publ., 1989, 245 p.

27. Klubova T. T. *Glinistye mineraly i ikh rol' v genezise, migratsii i akkumulyatsii nefi* [Clay minerals and their role in genesis, migration and accumulation of oil]. Moscow, Nedra Publ., 1973, 256 p.

28. Dobrova D. V., et al. *Modeli formirovaniya mikrostruktur glinistyx gruntov pri ikh khimicheskom zagryaznenii* [Models of formation of microstructures of clayey soils at their chemical pollution]. *Trudy mezhdunar. nauch. konf. Moskva, MGU, 26–27 maya 1998 g. «Genezis i modeli formirovaniya svoystv gruntov»* [Proceedings of the Intern. sci. conf., Moscow State University, May 26–27, 1998 «Genesis and models of formation of soil properties»]. Moscow, MGU Publ., 1998, pp. 106–107.

29. Korolev V. A. *Ochistka gruntov ot zagryaznenij* [Treatment of soils from pollution]. Moscow, Nauka/Interperiodika Publ., 2001, 364 p.

30. Rajabi H., Sharifipour M. Effects of light crude oil contamination on small-strain shear modulus of Firoozkooh sand. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2019, vol. 23 (11), pp. 1351–1367. <https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1347525>.

31. 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>.

32. Motenko R. G., et al. *Otsenka vliyaniya nefyanogo zagryazneniya na teploprovodnost' gruntov na osnove rezul'tatov kompleksnykh eksperimental'nykh issledovaniy* [Assessment of the influence of oil pollution on the thermal conductivity of soils based on the results of complex experimental studies]. *Trudy Mezhdunar. konf. «Gorod i geologicheskie opasnosti»* [Proceedings of the Intern. conf. «City and Geological Hazards»]. Vol. 2. St. Petersburg, 2006, pp. 18–20.

33. Dashko R. E., Lange I. Yu. *Geotekhnicheskij analiz dlitel'noy ustoychivosti neftyanykh rezervuarov na vodonasyschennykh peschano-glinistyx gruntakh* [Geotechnical analysis of long-term stability of oil reservoirs on water-saturated sandy-clay soils]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Engineering*, 2016, no. 3, pp. 48–54.

34. Brakorenko N. N., Eme'yanova T. Ya. *Vliyanie nefteproduktov na petrograficheskij sostav i fiziko-mekhanicheskie svoystva peschano-glinistyx gruntov (na primere g. Tomska)* [Influence of oil products on petrographic composition and physical and mechanical properties of sandy-clay soils (on the example of Tomsk)]. *Vestnik Tomskogo gos.un-ta – Bulletin of Tomsk State University*, 2011, no. 342, pp. 197–200.

35. 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.

36. Akinwumi I. I., et al. Effects of waste engine oil contamination on the plasticity, strength and permeability of lateritic clay. *International Journal of Scientific & Technological Research*, 2014, vol. 3 (9), pp. 331–335.

37. 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>.

38. Rahman Z. A., et al. 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>.

39. Shin E. C., Das B. M. Some physical properties of unsaturated oil-contaminated sand. *Advances in unsaturated geotechnics. Proceedings of Geo-Denver. Denver, Colorado, August 5–8, 2000*, pp. 142–152. [https://doi.org/10.1061/40510\(287\)9](https://doi.org/10.1061/40510(287)9).

40. Silvestri V., Mikhail N., Souli M. Permeability response of oil-contaminated compacted clays. *ASTM International STP1275*, 1997, pp. 62–74.

41. Pokrepin B. V. *Razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenij* [Development of oil and gas fields]. 2-nd ed., revised. Volgograd, In-Folio Publ., 2010, 223 p.