

УДК 624.131

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

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-1-57-66

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

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПЕСЧАНОГО ГРУНТА НЕФТЕПРОДУКТАМИ НА ЕГО ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

THE EFFECT OF SANDY SOIL CONTAMINATION WITH PETROLEUM PRODUCTS ON THE SOIL'S PHYSICAL PROPERTIES

Выполнен аналитический обзор существующих исследований отечественных и зарубежных авторов об изменении физических свойств песчаных грунтов в результате их загрязнения нефтью или различными видами нефтепродуктов в процессе эксплуатации сооружений нефтяной промышленности. Приведен пример аварийного разрушения мазутной емкости в Санкт-Петербурге в результате изменения физико-механических свойств грунтов основания после его загрязнения нефтепродуктом. Рассмотрено изменение таких физических характеристик песчаного грунта, как гранулометрический состав, пористость, оптимальная и природная влажность, плотность скелета грунта в зависимости от вида загрязняющего вещества и его процентного содержания (концентрации) в составе грунта.

Ключевые слова: песчаный грунт, загрязнение нефтепродуктами, физические свойства, гранулометрический состав, пористость, плотность, влажность.

The article presents an analytical review of currently existing domestic and foreign investigations regarding the change of sandy soil properties in case of contamination with oil or various types of oil products during the operation of oil industry facilities. An example of emergency destruction of a fuel oil tank in St. Petersburg as a result of changes in the physical and mechanical properties of the base soil after contamination of it with petroleum products is given. Changes in such physical characteristics of sandy soil as granulometric composition, porosity, optimum and natural humidity, density of soil skeleton depending on the type of pollutant and its percentage content (concentration) in the soil are considered.

Keywords: sandy soil, oil contamination, physical properties, granulometric composition, void ratio, density, moisture content.

Введение

В современных условиях интенсивного развития нефтяной промышленности эффективность нефтеперерабатывающих предприятий определяется их надежной и безаварийной эксплуатацией [1]. Возникновение аварийных ситуаций приводит не только к серьезным экономическим, но и к экологическим последствиям, в частности к загрязнению грунтового массива [2].

По данным Министерства энергетики, на территории Российской Федерации за 2019 год произошло более 17 000 аварий, сопрово-

ждающихся разливами нефти. Таким образом, ежедневно происходило приблизительно 47 аварий. Разумеется, не каждая авария имеет существенное влияние на загрязнение грунтов, так как проливы нефти могут происходить как на землю, так и на воду [3]. Однако, в соответствии с данными Министерства природных ресурсов РФ¹, доля углеводородного загрязнения грунтовой толщи по состоянию на 2015 год составила более 5 млн т, в то время как общее количество за-

¹ О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2014 году: государственный доклад. М.: Минприроды России, 2015. 407 с.

грязняющего вещества составляет 3 млрд т различных видов нефтепродуктов [4].

Повсеместное загрязнение грунтового основания нефтепродуктами связано с деятельностью энергетических предприятий, работающих на жидком топливе (ТЭЦ и др.), с функционированием автозаправочных станций, резервуарных парков, складов горючих материалов, стоянок автомашин и т. д. При этом наибольшее загрязнение наблюдается в промышленных зонах и на территориях свалок [4].

В настоящее время многими отечественными [1, 5–8] и зарубежными [9–15] учеными экспериментально доказано, что проливы нефтепродуктов на грунтовую поверхность приводят к снижению прочностных и деформационных характеристик грунтов и, как следствие, к возможному изменению напряженно-деформированного состояния грунта. Изменение физико-механических характеристик грунтов в основании сооружений нефтяной промышленности обусловлено интенсификацией ряда природно-техногенных процессов, направленность которых зависит от степени водонасыщения пород [16]. В зоне аэрации песчаного грунта из-за наличия кислорода происходит химическое окисление нефтепродуктов, результатом которого является их необратимая сорбция на поверхности минеральных частиц.

В результате данного процесса песчаные отложения переходят в рыхлые разности ($\rho_d \geq 1,01 \dots 1,25 \text{ г/см}^3$) с высокой проницаемостью ($k_\phi \geq 60 \text{ м/сут}$), которые при взаимодействии с водой переходят в состояние пльвунов (рис. 1) [16].

По результатам исследований проф. А. А. Землянского, более 46 % всех аварий вертикальных резервуаров для хранения нефтепродуктов произошли из-за развития неравномерных осадок основания, причиной возникновения которых может стать загрязнение грунтового массива нефтепродуктами [17]. Авторы исследования [18] констатируют, что при детальном рассмотрении актов расследований 28 аварий в 21 случае из них имела место неравномерная осадка основания, которая наряду с другими факторами явилась причиной разрушения резервуара. Эти данные подтверждаются многими исследованиями других авторов [19–21].

1. Пример разрушения

В качестве примера разрушения резервуара, связанного с изменением свойств грунтов основания, можно привести аварию мазутной емкости, произошедшей по истечении 19,5 лет ее эксплуатации.

Основание было представлено песками разного генезиса и моренными суглинками. В результате проведения инженерно-геологических изысканий после аварийного

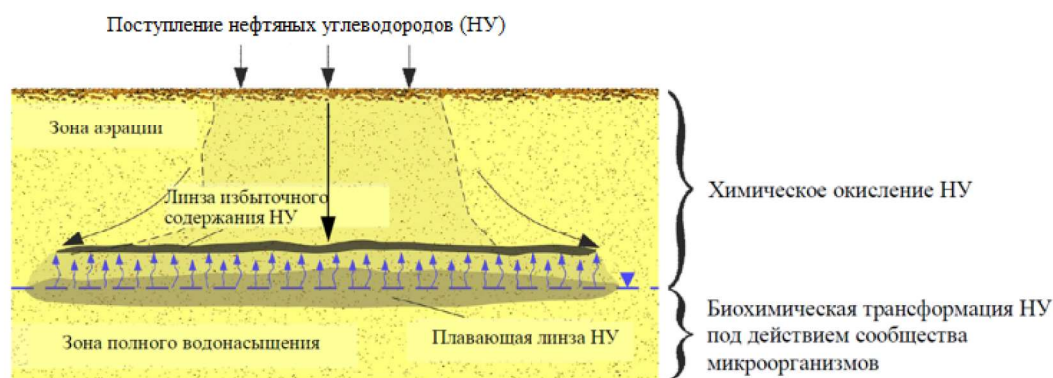


Рис. 1. Схема основных процессов преобразования нефтяных углеводородов, поступающих в подземное пространство [16]

разрушения резервуара в песках, залегающих в разрезе северной части основания, было зафиксировано изменение гранулометрического состава за счет повышения содержания фракций менее 0,1 мм до 54 %, что в несколько раз превышало их содержание на момент начала эксплуатации резервуара. Наряду с этим было отмечено значительное разрыхление песков, коэффициент относительной плотности которых снизился с 0,63–0,6 до 0,16–0,05. Активное биохимическое газообразование в несущем слое песчаных отложений, характеризующихся высоким содержанием тонкозернистой фракции и, соответственно, низкой водопроницаемостью, способствовало накоплению биохимических газов и ускорило переход песков в основании мазутного резервуара в состояние пльвуна. Быстрый рост давления при заполнении резервуара в условиях максимального разуплотнения песков вызвал недопустимые осадки в 33 см и крен, в пять раз превышающий допускаемое значение [4, 22].

Таким образом, процесс инфильтрации нефтепродуктов при действующей нагрузке от сооружения в песчаное основание потенциально может стать причиной развития неравномерных осадок и снижения несущей способности основания вплоть до перехода сооружений в аварийное состояние, поэтому крайне важно иметь сведения о степени влияния загрязнения грунта нефтепродуктами на его геотехнические свойства.

2. Изменяющиеся физические характеристики грунтов

2.1. Гранулометрический состав

В процессе инфильтрации нефтепродукта в толщу грунта в первую очередь меняется его гранулометрический состав. Исследования отечественных и зарубежных специалистов, таких как И. Ю. Ланге, Р. Э. Дашко, В. В. Середин, М. Р. Ядзинская, Н. Н. Бракоренко, Т. Я. Емельянова, Aqeel Al-Adili и др., позволили однозначно заключить, что присутствие нефтепродукта в составе песчано-

го грунта уменьшает содержание песчаной фракции и увеличивает содержание тонкодисперсной (пылевой) фракции (рис. 2).

Исследования [24] показали, что в результате взаимодействия грунтов с нефтепродуктами, в зависимости от времени и содержания железа в составе грунта, может изменяться петрографический состав песчано-глинистых грунтов, и, как следствие, гранулометрический состав, что приводит к увеличению содержания тонкодисперсной фракции. Авторы полагают, что изменение гранулометрического состава связано с формированием восстановительной химической среды, вызванной попаданием органики (нефтепродукта) в грунт.

Уменьшение содержания песчаной фракции происходит за счет агрегирования ее минеральных частиц. В ряде исследований в области почвоведения и микробиологии 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 [25, 26]. Однако для песчаных грунтов, расположенных в зоне аэрации, вклад микробиологической деятельности несущественен, так как основным фактором, влияющим на преобразова-

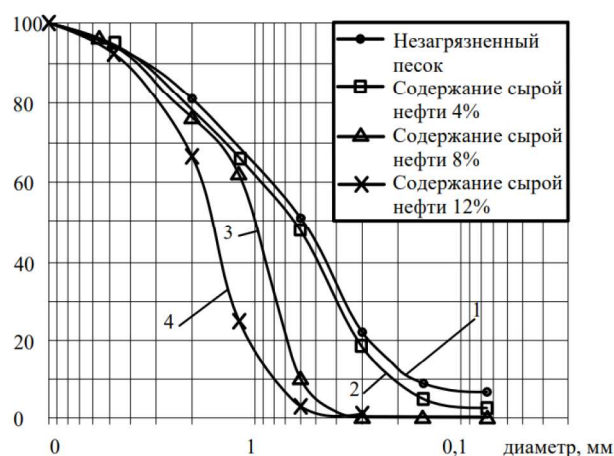


Рис. 2. Кривая гранулометрического состава песчаного грунта в зависимости от процентного содержания нефтепродукта [23]

ние нефтепродуктов в данной зоне, является окисление поступающим кислородом, сопровождающееся сорбцией нефтепродукта на поверхности частиц [27].

Исследования [28] позволили заключить, что в глинах агрегированию подвержена в основном глинистая фракция, в суглинках — глинистая и пылеватая, а в супесях — только пылеватая.

Увеличение содержания пылеватой фракции в составе нефтезагрязненного песка во многом вызвано сменой окислительно-восстановительных условий, которая меняет степень агрегированности грунтов и способствует разрушению структурных связей [29].

Следует отметить, что изменение гранулометрического состава в рамках упомянутых исследований определялось на образцах песчаного грунта одного гранулометрического состава с использованием только одного вида нефтепродукта. Очевидно, для комплексного изучения изменения гранулометрического состава нефтезагрязненных песков необходимо использовать образцы песка различных гранулометрических составов, последовательно увеличивая процентное содержание нефтепродукта в их составе. Также изменение гранулометрического состава песков может зависеть не только от концентрации, но и от вида загрязняющего вещества, так как физические свойства (плотность, кинематическая вязкость, испаряемость) таких нефтепродуктов, как, например, соляровое масло и керосин, сильно разнятся.

В исследованиях [34], наоборот, отмечается уменьшение пылеватой фракции песка с увеличением процентного содержания солярового масла.

2.2. Оптимальная и природная влажность грунта

При воздействии различных видов нефти и нефтепродуктов на песчаный грунт также имеет место изменение оптимальной влажности, при которой достигается максималь-

ная плотность грунта. Анализ исследований отечественных и зарубежных авторов [9, 23, 24, 30–32] показал, что содержание влаги, необходимое для достижения максимальной плотности скелета грунта, уменьшается при увеличении процентного содержания нефтепродукта в испытываемом образце. Вероятно, это происходит потому, что нефтепродукт частично либо полностью заполняет поровое пространство между твердыми частицами и приводит грунт в состояние рыхлой несвязной породы (пльвуна) в сравнении с незагрязненным грунтом. Следует отметить высокую сходимость результатов исследований, проведенных в данной области разными авторами (рис. 3).

Вопросу изменения природной влажности песчаного грунта при его загрязнении нефтепродуктами посвящено значительно меньшее количество исследований. Так, авторы исследования [16] пришли к выводу, что появление окисленных нефтяных углеводородов повышает гидрофильность песков и, соответственно, величину молекулярной влагоемкости (рис. 4). С учетом того, что нефтезагрязненные пески могут переходить в состояние пльвуна, то есть в состояние относительно связного грунта, влажность такого грунта будет расти с увеличением процентного содержания нефтепродукта в его составе.

Следует отметить, что приведенные исследования проводились на образцах песчаного грунта одной начальной влажности, в то время как однозначно заключить об увеличении или, наоборот, уменьшении влажности грунта при его загрязнении нефтепродуктами можно только после комплексных лабораторных исследований с использованием песчаных образцов различных влажностей, гранулометрических составов и типов загрязняющего вещества.

2.3. Плотность скелета грунта

Плотность скелета грунта связана с его влажностью следующей зависимостью:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1+w},$$

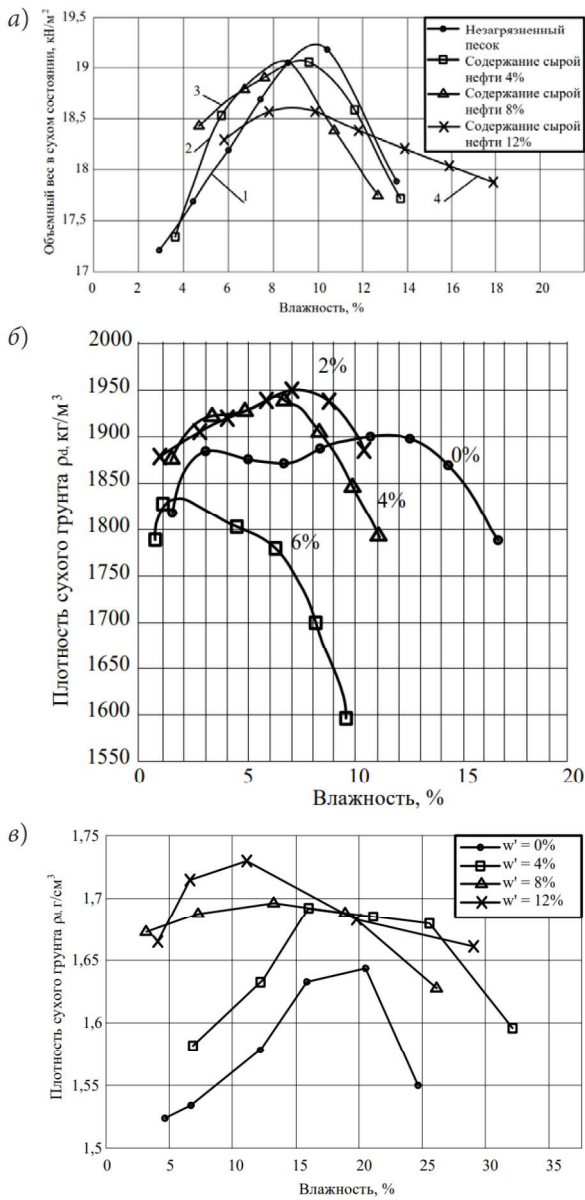


Рис. 3. Зависимость плотности от влажности грунта при различных процентных содержаниях сырой непереработанной нефти: а — по источнику [23]; б — [9] (экспликацию см. на рис. 3, в); в — [32]

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 [9, 16, 23]. В исследовании [16] 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 [33].

2.4. Пористость

Как отмечалось ранее, инфильтрация нефтяных углеводородов в состав песчаного грунта приводит к агрегации его частиц и, как следствие, к изменению гранулометрического состава песка, а именно — к его переходу в более крупные разности без изменения коэффициента неоднородности. Ввиду образования агрегатов повышается пористость, что приводит к увеличению влаго-

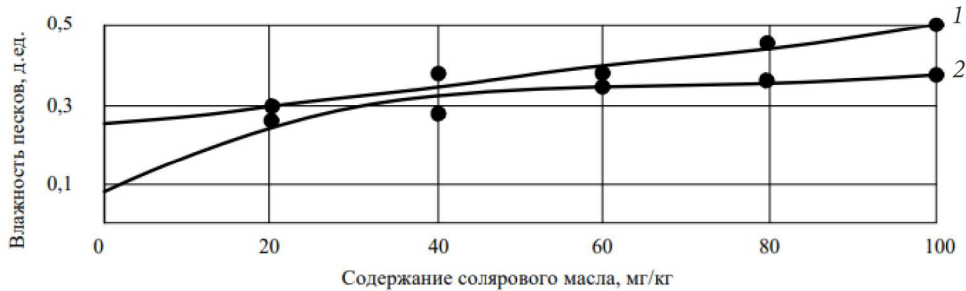


Рис. 4. Изменение водоёмкости (кривая 1) и максимальной молекулярной влагоёмкости (кривая 2) песков с различным содержанием солярового масла [16]

емкости (способности грунта вмещать воду, но не удерживать) и коэффициента фильтрации песков.

Автором [34] 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. Коэффициент пористости увеличивается от 0,33 до 0,35 при росте процентного содержания нефтепродукта от 0 до 2 %, далее по мере увеличения процентного содержания от 2 до 6 % — снижается до 0,23, при процентном содержании нефтепродукта 8 % — вновь увеличивается 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.

В исследованиях [9] 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 (рис. 5).

Следует отметить изменение (более 10 %) коэффициента пористости в рамках данных исследований в сравнении с результатами исследований [34]. Однако степень сниже-

ния коэффициента пористости при увеличении нагрузки зависит от начального коэффициента пористости испытываемых образцов и плотности их сложения. В исследованиях [34] и [9] начальные коэффициенты пористости отличались более чем на 20 %, влажности — более чем на 10 %.

При лабораторных исследованиях [16] также наблюдается незначительное снижение пористости песчаного грунта при его загрязнении соляровым маслом вне зависимости от плотности сложения испытываемых образцов.

Выводы

1. Аналитический обзор отечественных и зарубежных исследований об изменении физических свойств песков, загрязненных

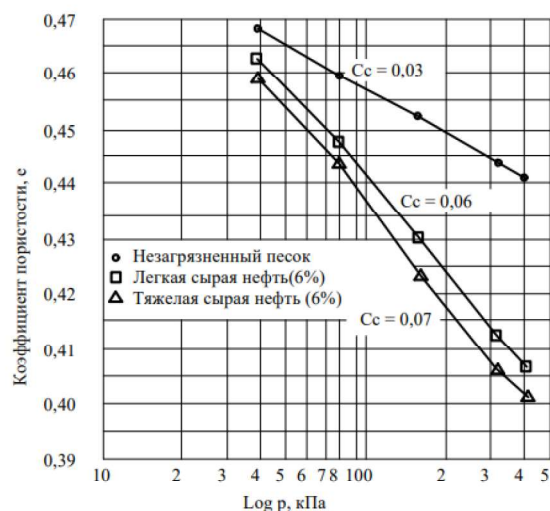


Рис. 5. Зависимость коэффициента пористости грунта от приложенной нагрузки при разном виде загрязнителя [9]

Коэффициент пористости песка при разном процентном содержании нефтепродукта и различной степени нагружения [34]

| 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 |

нефтью и различными видами нефтепродуктов, позволяет сделать вывод, что инфильтрация нефтепродуктов в грунтовое основание оказывает существенное влияние на его физические свойства.

2. В результате инфильтрации нефтепродуктов в песчаное основание изменяется гранулометрический состав грунта в сторону перехода в более крупные разности за счет агрегирования частиц. При этом в ряде исследований наблюдается увеличение процентного содержания пылеватой фракции песка при его загрязнении нефтепродуктами.

3. Содержание влаги, необходимое для достижения максимальной плотности скелета песчаного грунта, уменьшается при увеличении процентного содержания нефтепродукта в составе грунта. Причиной этого является то, что нефтепродукт частично либо полностью заполняет поровое пространство и приводит грунт в рыхлое состояние (пывуна) в сравнении с незагрязненным грунтом.

4. Влажность песчаного грунта увеличивается с ростом процентного содержания нефтепродукта в составе грунта, а его плотность уменьшается при увеличении процентного содержания нефтепродукта после достижения максимальной плотности при оптимальной влажности.

5. Пористость песчаного грунта, загрязненного нефтепродуктами, возрастает с увеличением концентрации загрязнителя за счет агрегирования частиц.

Заключение

Из проведенного анализа по изменению физико-механических характеристик грунтов в результате их загрязнения нефтепродуктами следует, что выполненные ранее исследования в основном касаются инженерно-геологического и микробиологического направлений, в то время как вопросы, связанные с особенностями проектирования фундаментов на таких грунтах и методами прогнозирования их осадок, остаются малоизученными.

Для возможной объективной оценки работы грунтовых оснований сооружения при их возможном загрязнении необходимо учитывать изменение не только физических характеристик слагающих грунтов, но и их прочностных и деформационных свойств с учетом ряда переменных факторов, таких как разные гранулометрические составы, типы и концентрации проникающих в грунт нефтепродуктов, скорости их фильтрации, плотности сложения испытываемых образцов и др.

Библиографический список

1. Дашко Р. Э., Ланге И. Ю. Негативные последствия контаминации подземной среды нефтяными углеводородами: преобразование грунтов и конструкционных материалов // Жилищное строительство. 2014. № 10. С. 56–59.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Григорьева И. Ю. Нефтяное загрязнение грунтов: инженерно-геологический и эколого-геологический аспекты. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co.KG (Германия), 2010. 198 с.
7. 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.
8. Копылов Ю. Н. Изменение свойств песчаного и глинистого грунта в результате воздействия моторного масла // Сб. науч. ст. молодых ученых и студентов. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2003. С. 31–33.

9. 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.
10. Evgin E., Das B. M. Mechanical behavior of an oil contaminated sand // Usman, Acar (eds.). *Environmental Geotechnology: proceeding of the Mediterranean Conference*. Rotterdam: Balkema Publishers, 1992. Pp. 101–108.
11. 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.
12. Shin E., Das B. Some physical properties of unsaturated oil-contaminated sand // *Geotechnical Special Publication*, 2000. Pp. 142–152.
13. Shin E. C., Das B. M. Bearing capacity of unsaturated oil-contaminated sand // *International Journal of Offshore and Polar Engineering*. 2001. Vol. 11 (3). Pp. 220–227.
14. Ur-Rehman H., Abduljauwad S. N., Akram T. Geotechnical behavior of oil-contaminated fine-grained soils // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2007. Vol. 12A. Pp. 15–23.
15. Talukdar D. K. Behavior of crude oil contaminated clayey sands // *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2014. Vol. 4 (7). Pp. 271–276.
16. 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/PMI.2017.6.624.
17. 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>.
18. 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.
19. 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.
20. Буренин В. А. Прогнозирование индивидуального остаточного ресурса стальных вертикальных резервуаров: дис. ... д-ра техн. наук. Уфа, 1994. 304 с.
21. Гамарник А. В. Из опыта проектирования и строительства оснований под резервуары // *Нефтепромышленное строительство*. 1975. № 9. С. 11.
22. Дашко Р. Э., Ланге И. Ю. Прогнозирование изменения несущей способности песчано-глинистых грунтов в процессе их контаминации нефтепродуктами // *Записки Горного университета*. 2015. Т. 211. С. 16–21.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. Zobell C. E., Anderson D. Q. Vertical distribution of bacteria in marine sediments // *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*. 1936. Vol. 20. Pp. 258–269.
27. Ланге И. Ю. Инженерно-геологический анализ и оценка изменения несущей способности дисперсных грунтов при их контаминации нефтепродуктами: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб., 2016. 234 с.
28. Середин В. В., Ядзинская М. Р. Исследование механизма агрегации частиц в глинистых грунтах при загрязнении их углеводородами // *Фундаментальные исследования*. 2014. № 8, ч. 6. С. 1408–1412.
29. Дашко Р. Э., Ланге И. Ю. Влияние загрязнения нефтепродуктами и их деградации в подземной среде на геотехнические параметры песчано-глинистых грунтов // *Геотехника*. 2013. № 5–6. С. 50–63.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. Шибалова Г. В., Шкаредо В. А. Оценка возможности использования глинистых грунтов, загрязненных углеводородами, в строительных целях // *Строительство и архитектура*. 2017. № 5. С. 50–57.

34. Ijimdiya T. S., Ighoro T. The compressibility behavior of oil contaminated soils // *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*. 2012. Vol. 17. Pp. 3653–3662.

References

1. Dashko R. E., Lange I. Yu. *Negativnye posledstviya kontaminatsii podzemnoy sredy neftyanymi uglevodorodami: preobrazovanie gruntov i konstruktsionnykh materialov* [Negative consequences of the contamination of the underground environment with petroleum hydrocarbons: transformation of soils and structural materials]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing Construction*, 2014, no. 10, pp. 56–59.
2. Chemus A. A., Krasil'nikov P. A., Penskiy O. G., Gershanok V. A., Karaseva T. V. *Inzhenerno-geologicheskie i geokologicheskie usloviya pribrezhnoy zony Kamskogo vodokhranilishcha, osvaivayemoy dlya stroitel'stva ob'ektov nefte dobychi* [Engineering-geological and geo-ecological conditions of the Kamsk reservoir coastal zone being developed for oil production facilities construction]. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya – Modern Problems of Science and Education*, 2012, no. 6. Available at: www.science-education.ru/106-7777.
3. Seluyanov A. A., Chernova K. V., Shutov N. V. *Analiz istochnikov popadaniya nefi v gidrosferu Zemli* [Analysis of the sources of oil ingress into the Earth's hydrosphere]. *Neftegazovoe delo – Oil and Gas Industry*, 2011, no. 9, no. 3, pp. 96–104.
4. Dashko R. E., Lange I. Yu. *Geotekhnicheskyy analiz dlitel'noy ustoychivosti neftyanykh rezervuarov na vodonasyshchennykh peschano-glinistykh gruntakh* [Geotechnical analysis of long-term stability of oil reservoirs on water-saturated sandy-clayey soils]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo – Industrial and Civil Engineering*, 2016, no. 3, pp. 48–54.
5. Osovetskiy B. M., Kachenov V. I., Rastegaev A. V., Afanas'ev R. A., Pikulev D. A. *Zakonomernosti izmeneniya prochnostnykh svoystv peskov, zagryaznennykh dizel'nyim toplivom* [Regularities of changes in strength properties of sands contaminated by diesel fuel]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental Research*, 2014, no. 9-8, pp. 1769–1774.
6. Grigor'eva I. Yu. *Neftyanoe zagryaznenie gruntov: inzhenerno-geologicheskyy i ekologo-geologicheskyy aspekty* [Oil pollution of soils: engineering-geological and ecological-geological aspects]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publ. Gmb H&Co.KG (Germany), 2010, 198 p.
7. Kachenov V. I., Seredin V. V., Karmanov S. V. *K voprosu o vliyaniy neftyanykh zagryazneniy na svoystva gruntov* [To the issue of oil pollution effect on the soil properties]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala – Geology and Mineral Resources of the Western Ural*, 2011, no. 14, pp. 164–165.
8. Kopylov Yu. N. *Izmenenie svoystv peschanogo i glinistogo grunta v rezul'tate vozdeystviya motornogo masla* [Change in the properties of sandy and clayey soil as a result of exposure to engine oil pollution]. *Sb. nauch.st. molodykh uchenykh i studentov* [In: Collection of scientific papers of young scientists and students]. Tambov, TGTU Publ., 2003, pp. 31–33.
9. 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.
10. Evgin E., Das B. M. Mechanical behavior of an oil contaminated sand. Usmen, Acar (eds.). *Environmental Geotechnology. Proceeding of the Mediterranean Conference*, Rotterdam, Balkema Publ., 1992, pp. 101–108.
11. 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.
12. Shin E., Das B. Some physical properties of unsaturated oil-contaminated sand. *Geotechnical Special Publication*, 2000, pp. 142–152.
13. Shin E. C., Das B. M. Bearing capacity of unsaturated oil-contaminated sand. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 2001, vol. 11 (3), pp. 220–227.
14. Ur-Rehman H., Abduljauwad S. N., Akram T. Geotechnical behavior of oil-contaminated fine-grained soils. *Electronic Journal of Geotechnic Engineering*, 2007, vol. 12A, pp. 15–23.
15. Talukdar D. K. Behavior of crude oil contaminated clayey sands. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2014, vol. 4 (7), pp. 271–276.
16. Dashko R. E., Lange I. Yu. *Inzhenerno-geologicheskie aspekty negativnykh posledstviy kontaminatsii dispersnykh gruntov nefteproduktami* [Engineering-geological aspects of negative consequences of contamination of disperse soils with oil products]. *Zapiski Gornogo instituta – Notes of the Mining Institute*, 2017, vol. 228, pp. 624–630. DOI: 10.25515/PML 2017.6.624.
17. Zemlyanskiy A. A. *Innovatsionnye printsipy proektirovaniyarezervuarov novogo pokoleniya dlya khraneniya uglevodorodov* [Innovative principles of designing the new generation tanks for hydrocarbon storage]. *Trudy of Simpozium 2013 – Perspektivnye tekhnologii XXI veka* [Proceedings of the Symposium 2013 – Promising Technologies of the XXI century]. Balakovskiy institut tekhniki, tekhnologii i upravleniya (filial) – SGTU Publ., 2012, 35 p. Available at: www.sworld.com.ua/simpoz2/112.pdf
18. Mangushev R. A., Gorodnova E. V. *Ustroystvo osnovaniy i fundamentov pod stal'nye rezervuary emkost'yu*

50 tys.m³ s plavayushchey kryshyey [Design of bases and foundations under steel tanks of 50000 m³ capacity with floating roofs]. *Trudy 59-y nauch. konf. SPbGASU* [Proceedings of the 59-th scientific conf. of SPbGASU]. St. Petersburg, 2002, pt. I, pp. 36–38.

19. Kononov P. A., et al. *Fundamenty stal'nykh rezervuarov i deformatsii ikh osnovaniy* [Foundations of steel tanks and deformations of their bases]. Ed. by Kononov P. A. Moscow, ASV Publ., 2009, 336 p.

20. Burenin V. A. *Prognozirovaniye individual'nogo ostatochnogo resursa stal'nykh vertikal'nykh rezervuarov. Diss. doktyu tekhn. nauk* [Forecasting of the individual residual service life of steel vertical tanks. Dr. Sci. Tech. diss.]. Ufa, 1994, 304 p.

21. Gamarnik A. V. *Iz opyta proektirovaniya i stroitel'stva osnovaniy pod rezervuary* [From the experience of designing and constructing of bases for tanks]. *Neftepromyslovoe stroitel'stvo – Oil Field Construction*, 1975, no. 9, p. 11.

22. Dashko R. E., Lange I. Yu. *Prognozirovaniye izmeneniya nesushchey sposobnosti peschano-glinistykh gruntov v protsesse ikh kontaminatsii nefteproduktami* [Forecasting of changes in the bearing capacity of sandy-clay soils during the contamination with oil products]. *Zapiski Gornogo universiteta – Notes of the Mining University*, 2015, vol. 211, pp. 16–21.

23. Al'-Adili A., Yali K., Shakir A. *Issledovaniye vliyaniya zagryazneniya nef'tyu peschanogo i gipsosoderzhashchego gruntov na prochnost'* [Study of the effect of oil contamination of sandy and gypsum bearing soils on their strength]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov – Bases, Foundations and Soil Mechanics*, 2017, no. 4, pp. 30–35.

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

25. 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.

26. Zobell C. E., Anderson D. Q. Vertical distribution of bacteria in marine sediments. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 1936, vol. 20, pp. 258–269.

27. Lange I. Yu. *Inzhenerno-geologicheskii analiz i otsenka izmeneniya nesushchey sposobnosti dispersnykh gruntov pri ikh kontaminatsii nefteproduktami. Diss. kand. geol.-mineral. nauk* [Engineering-geological analysis and assessment of changes in the bearing capacity of dispersed soils during their contamination with petroleum products. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2016, 234 p.

28. Seredin V. V., Yadzinskaya M. R. *Issledovaniye mekhanizma agregatsii chastits v glinistykh gruntakh pri zagryaznenii ikh uglevodorodami* [Study of the mechanism of particle aggregation in clay soils polluted with hydrocarbons]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental Research*, 2014, no. 8, pt. 6, pp. 1408–1412.

29. Dashko R. E., Lange I. Yu. *Vliyanie zagryazneniya nefteproduktami i ikh degradatsii v podzemnoy srede na geotekhnicheskie parametry peschano-glinistykh gruntov* [Impact of pollution by oil products and their degradation in the underground environment on geotechnical parameters of sandy clay soils]. *Geotekhnika – Geo-engineering*, 2013, no. 5–6, pp. 50–63.

30. 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.

31. Rahman Z. A., Hamzah U., Ahmad N. Geotechnical characteristics of oil-contaminated granitic and meta-sedimentary soils. *Asian Journal of Applied Sciences*, 2010, vol. 3, iss. 4, pp. 237–249.

32. 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

33. Shibalova G. V., Shkaredo V. A. *Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya glinistykh gruntov, zagryaznennykh uglevodorodami, v stroitel'nykh tselyakh* [Evaluation of the possibility of using clay soils contaminated by hydrocarbons for construction purposes]. *Stroitel'stvo i arkhitektura – Construction and Architecture*, 2017, no. 5, pp. 50–57.

34. Ijimdiya T. S., Igboro T. The compressibility behavior of oil contaminated soils. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 2012, vol. 17, pp. 3653–3662.