

Анализ физико-механических и гидрофизических свойств песчаных почв, подвергшихся длительному загрязнению углеводородами

И.Ю. ЛАНГЕ ✉, П.В. КОТЮКОВ и Я.А. ЛЕБЕДЕВА

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ lange_iyu@pers.spmi.ru

Ссылка для цитирования оригинальной статьи: Lange, I.; Kotiukov, P.; Lebedeva, Y. Analyzing Physical-Mechanical and Hydrophysical Properties of Sandy Soils Exposed to Long-Term Hydrocarbon Contamination. *Sustainability* 2023, 15, 3599. <https://doi.org/10.3390/su15043599>

Аннотация: Целью данной работы является изучение проблемы загрязнения песчаных грунтов нефтяными углеводородами. Для изучения условно чистых и загрязненных песков использовались лабораторные методики, включающие измерение размеров зерен, оценку физико-механических и гидрофизических свойств. Результаты анализа проб песка с помощью визуальных и микроскопических исследований и ситового анализа показали, что в отличие от условно чистых песков, в загрязненных образцах поверхность минеральных частиц покрыта углеводородной пленкой. Наличие последней позволяет образовывать микро- и макроагрегаты. Исследования физических и гидрофизических свойств песков по методике с использованием предварительно взвешенных стеклянных контейнеров, а также фильтрующего устройства – трубки SPETSGEO – показали, что по сравнению с условно чистыми образцами загрязненные образцы песчаных грунтов имеют меньшую плотность и большую проницаемость и водоотдачу. Испытания механических свойств загрязненных песков на аппарате прямого сдвига ГПП-30 по методу консолидированной прочности при сдвиге в высушенном состоянии выявили увеличение угла внутреннего трения при снижении удельного сцепления по сравнению с условно чистыми песками.

Ключевые слова: песчаные грунты; загрязнение нефтяными углеводородами; гранулометрический состав; углеводородные пленки; микроагрегаты; свойства песчаных грунтов.

Analyzing Physical-Mechanical and Hydrophysical Properties of Sandy Soils Exposed to Long-Term Hydrocarbon Contamination

Ivan Yu. LANGE ✉, Pavel V. KOTIUKOV and Yana A. LEBEDEVA

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

✉ lange_iyu@pers.spmi.ru

Abstract: This paper aims to investigate the issue of sandy soil contamination by oil hydrocarbons. Laboratory procedures used to study conditionally pure and contaminated sands include grain-size measurements and evaluation of physical-mechanical and hydrophysical properties. The results of the analysis of sand samples using visual and microscopic studies and sieve analysis show that, unlike in conditionally pure sands, in contaminated samples, the surface of mineral particles is covered by hydrocarbon film. The presence of the latter enables micro- and macroaggregates to be formed. Studies of the physical and hydrophysical properties of sands using a technique with preweighed glass containers, as well as a filtering device, SPETSGEO pipes, showed that, in comparison with conditionally pure samples, contaminated specimens of sandy soils have lower densities and higher permeabilities and water yields. Testing the mechanical properties of contaminated sands on the GPP-30 direct shear apparatus using the consolidated dried shear strength method revealed an increase in the angle of internal friction with a decrease in specific adhesion compared to conditionally clean sands.

Keywords: sandy soils; oil hydrocarbon contamination; particle-size distribution; hydrocarbon films; microaggregates; sandy soil properties.

1. Введение

В настоящее время рост городских конгломератов предполагает использование территорий, которые ранее считались непригодными для городского развития [1, 2]. Прежде всего, это касается территорий, на которых расположены бывшие промышленные объекты. Это могут быть территории нефтеперерабатывающих и нефтеперерабатывающих заводов, а также резервуарные батареи, хранилища ГСМ и другие сооружения [3-5]. Работа таких объектов включает в себя переработку, обработку, хранение и утилизацию углеводородов, что неизбежно влечет за собой их утрату [6-9].

* Перевод подготовлен для повышения интереса русскоязычной аудитории к данной статье.

© 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

© Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (перевод), 2025.

По статистике, при эксплуатации резервуарных батарей и автозаправочных станций общие потери твердых и жидких углеводородов могут превышать 2,5 т и 140,0 т в год соответственно [10-12]. Поступление такого количества углеводородов в грунт, в верхней части которого обычно располагаются песчаные грунты, приводит к изменению их состава, физико-механических и гидрофизических свойств. Согласно опубликованным работам, поступление нефтяных углеводородов в песчаные грунты приводит к образованию углеводородных пленок на поверхности минеральных зерен и увеличению размера частиц песка. При этом отмечается снижение их проницаемости и прочности на сдвиг [13-18]. Однако проведенные исследования показывают некоторое несоответствие с механизмом нефтяного загрязнения песков в природных условиях. Это связано прежде всего с тем, что состав и свойства загрязненных песчаных грунтов определялись путем их смешивания с жидкими углеводородами. В природных условиях этот процесс протекает сложнее. Прочисывание нефтяных углеводородов сопровождается их трансформацией под действием химического окисления. По истечении длительного времени легкие фракции углеводородов испаряются из состава жидких углеводородов, а более тяжелые образуют углеводородные пленки на поверхности минеральных частиц. Этот механизм был подтвержден при изучении причин выхода из строя нефтяного пласта после 20 лет эксплуатации. Утечки углеводородов в процессе эксплуатации нефтяного резервуара привели к ухудшению свойств песчаных грунтов в его основании. Из-за этого произошла неравномерная деформация песчаного основания, что привело к его разрушению [19]. В то же время, несмотря на наличие практических примеров, а также научных работ о влиянии нефтяного загрязнения на свойства грунтов, механизм трансформации состава и свойств песчаных грунтов по сравнению с глинистыми еще недостаточно изучен. Поэтому существует необходимость проведения экспериментальных исследований песчаных почв.

2. Методы и результаты исследований

Для проведения экспериментальных исследований и сравнительного анализа трансформации состава и свойств песчаных грунтов, подвергшихся воздействию углеводородного загрязнения, было отобрано 12 проб загрязненных и незагрязненных песков (по 6 проб каждого типа). Места отбора проб были приурочены к территории заброшенного военного полигона, на котором ранее постоянно использовались нефтяные углеводороды в качестве горюче-смазочных материалов. Длительное использование нефтепродуктов привело к загрязнению почв, характерному для данной территории. Загрязненные участки в виде концентрических зон легко определялись по темно-серому и черному цвету песчаных отложений и характерному запаху нефтяных углеводородов. При раскопках пробных котлованов были обнаружены отдельные прослойки песка, содержащие нефтяные углеводороды.

При визуальном анализе отобранных проб песка было установлено, что незагрязненные пески характеризуются желтовато-бежевым цветом, среднезернистой структурой (преобладающий размер зерен 0,25-0,5 мм) и кварц-полевошпатовым составом. В отличие от условно чистых песков, загрязненные образцы имели темно-коричневый до черного цвет и были похожи на плохо цементированный песчаник с ярко выраженным запахом нефтяных углеводородов (рис. 1).



Рис. 1. Визуальные различия между условно чистыми (а) и загрязненными песками (б)

Для определения количества нефтяных углеводородов в загрязненных песчаных почвах был проведен флуориметрический анализ с использованием анализатора Флюорат 02-3М. Суть такого анализа, проводимого в соответствии с нормативным документом (ПНД Ф 16.1:2.21-98), заключалась в экстракции нефтяных углеводородов из загрязненных проб раствором гексана и определении их содержания с помощью хроматографической колонки [20]. Полученные результаты показали, что в исследуемых образцах содержание нефтяных углеводородов составило 17,5 г/кг.

Визуальное описание образцов песка было дополнено микроскопическим исследованием, в результате которого были обнаружены углеводородные пленки на поверхности минеральных частиц в загрязненных песках (рис. 2).

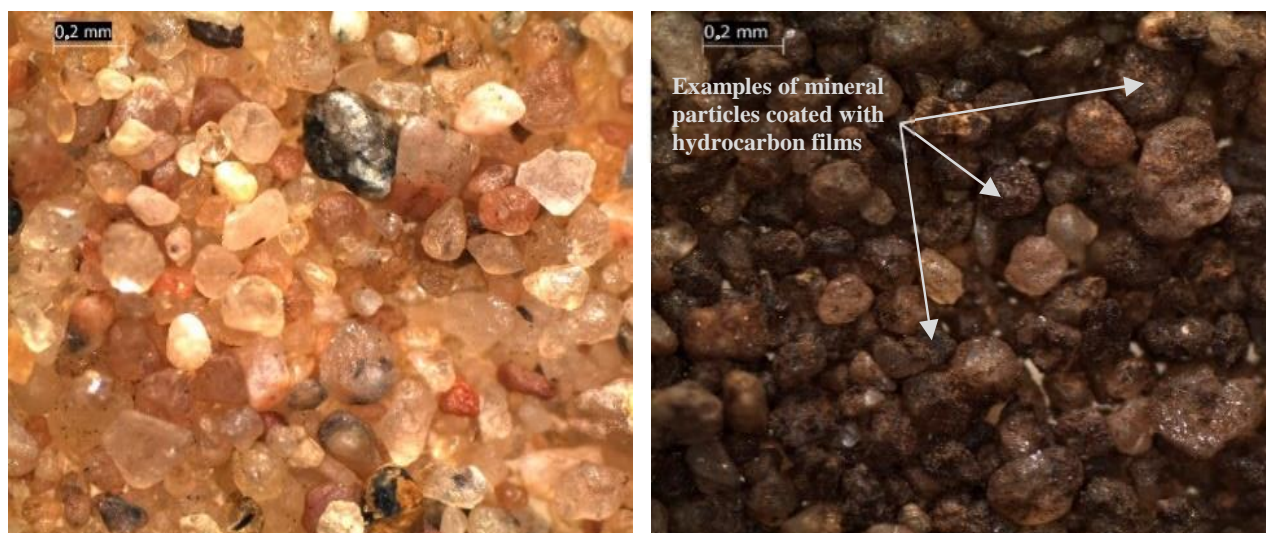


Рис. 2. Изображения песчаных почв, полученные с помощью микроскопа LEICA DM750: (а) условно чистые пески; (б) пески, загрязненные нефтяными углеводородами

Наличие пленок окисленных углеводородов на поверхности минеральных частиц в загрязненных песках приводило к образованию микроагрегатов размером от 0,5 до 5,0 мм. Обнаруженные пленки играли роль цементирующих веществ (рис. 3).



Рис. 3. Микроагрегаты частиц песка, загрязненного нефтяными углеводородами (изображение получено с помощью микроскопа LEICA DM750)

Изучение гранулометрического состава песка ситовым методом (ГОСТ 12536-2014) показало, что условно чистые образцы находятся в диапазоне среднезернистых песков, тогда как загрязненные пески относятся к крупно- и очень крупнозернистым (рис. 4).

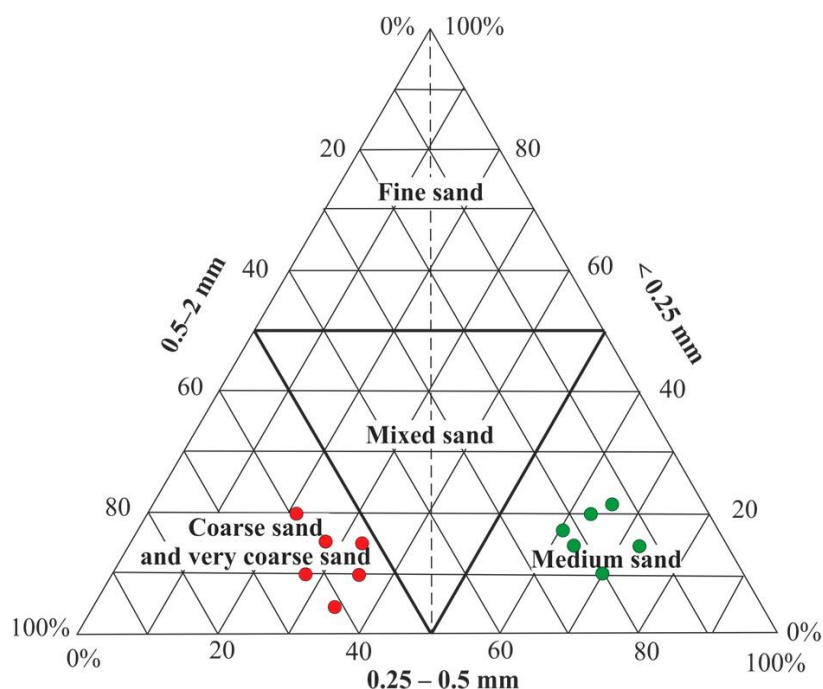


Рис. 4. Треугольная диаграмма гранулометрического состава изученных песков: зеленые точки – условно чистые пески; красные точки – пески, покрытые пленками углеводородов

Анализ гранулометрического состава исследуемых образцов показывает, что образование углеводородных пленок на поверхности песчинок и наращивание микроагрегатов приводит к увеличению крупности. Как видно из рисунка 4, содержание частиц размером от 0,5 до 2,0 мм в условно чистых песках колеблется от 12 до 22 %, в то время как в загрязненных песках оно превышает 51 %. Более того, в загрязненных образцах наблюдается появление отдельных агрегатов размером от 2,0 до 5,0 мм.

Изменение гранулометрического состава в сторону увеличения содержания крупных фракций влияет на плотность загрязненных песков как с плотной, так и с рыхлой структурой. Измерения плотности песка проводились по методике, в которой использовались предварительно взвешенные стеклянные колбы одинакового объема. Наиболее рыхлая структура образцов песка достигалась путем свободного заполнения колб через воронку. Наиболее плотная структура достигалась путем заполнения колб песком небольшими порциями, после чего происходило уплотнение с помощью удара трамбовщика по стенкам колбы. Плотность рассчитывалась по следующей формуле:

$$\rho = (m_1 - m_2) / V, \quad (1)$$

где m_1 – масса песчаного грунта с наиболее рыхлой или плотной структурой, г; m_2 – масса стеклянной колбы, г; V – объем песка, заполняющего колбу, см^3 .

Результаты проведенных расчетов показывают, что при загрязнении грунта имеют меньшую плотность в наиболее рыхлом и плотном состояниях по сравнению с условно чистыми образцами (табл. 1).

Таблица 1

Измерения плотности исследуемых песков

Лабораторные номера	Рыхлое сложение			Плотное сложение		
	Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$		Среднее значение*, $\text{г}/\text{см}^3$	Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$		Среднее значение, $\text{г}/\text{см}^3$
	от	до		от	до	
Условно «чистый» песок						
1 – 6	1,41	1,43	1,42	1,71	1,72	1,72
Загрязненный песок						
7 – 12	1,31	1,34	1,32	1,51	1,52	1,51

* Рассчитано как средневзвешенное значение

Плотность загрязненного рыхлого и плотного песка уменьшается на $0,10 \text{ г/см}^3$ и $0,21 \text{ г/см}^3$ соответственно. В процентном соотношении плотность загрязненного песка в рыхлой структуре по сравнению с условно чистым песком уменьшилась на 7 %, а в плотной композиции – на 12 %. Это можно объяснить агрегацией минеральных частиц. Агрегаты, представляющие собой минеральные зерна, сцементированные углеводородными пленками, занимают больше места в единице объема по сравнению с незагрязненными частицами. Это напрямую влияет на пористость песка. Предыдущие исследования свойств песков в условиях углеводородного загрязнения показали, что наряду с уменьшением плотности с $1,43$ до $1,01 \text{ г/см}^3$ и с $1,68$ до $1,25 \text{ г/см}^3$ для рыхлых и плотных образцов, соответственно, пористость увеличилась с $0,47$ до $0,58$ и с $0,37$ до $0,49$, соответственно [19].

Снижение плотности и повышение пористости загрязненных песков приводит к изменению проницаемости. Для количественной оценки водопроницаемости песчаных грунтов были проведены лабораторные испытания с использованием образцов грунта. Согласно нормативной методике, коэффициент проницаемости измерялся при поддержании постоянного гидравлического градиента на протяжении всего испытания («условие стационарной фильтрации») [21]. Для этого использовался пермеаметр – фильтрационная трубка, разработанная компанией SPECGEO.

Полученные результаты позволили проанализировать связь между коэффициентом фильтрации и плотностью песка. Для проведения эксперимента были подготовлены образцы песчаных грунтов с наиболее рыхлой и наиболее плотной структурой. После достижения необходимой плотности песка и заполнения аппарата дистиллированной водой начались испытания на проницаемость. В ходе эксперимента измерялось время, необходимое для фильтрации заданного объема воды, при этом градиент напора поддерживался на уровне 1,0. Всего было проведено 24 испытания – по 12 для каждого типа песка. Полученные результаты были использованы для построения графика зависимости коэффициента фильтрации (при $T = 10^\circ\text{C}$) от плотности песка (рис. 5).

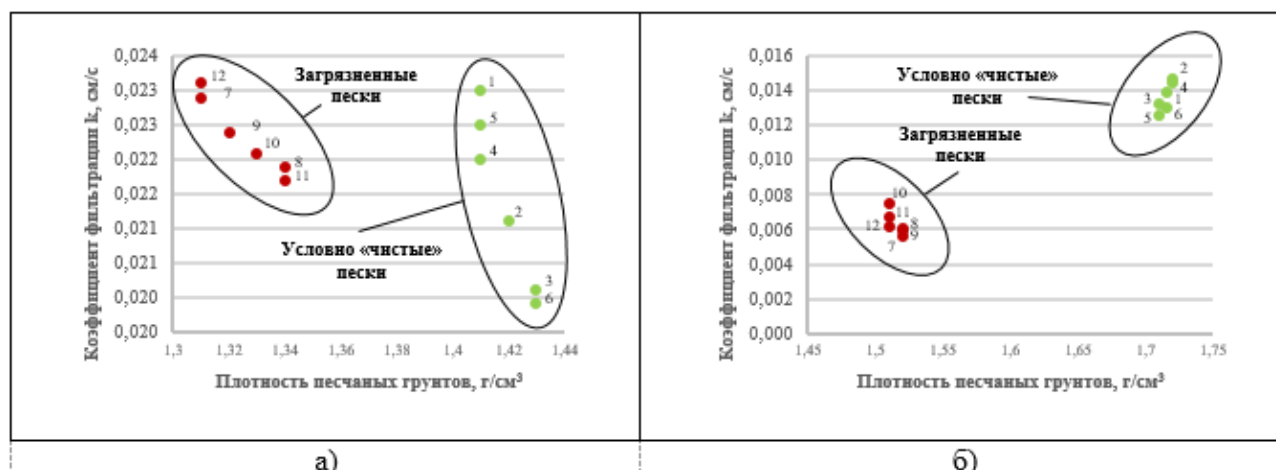


Рис. 5. Диаграммы рассеяния коэффициента проницаемости для условно чистых и загрязненных песков в зависимости от их плотности: (а) рыхлая структура; (б) плотная структура

На рисунке 5 показано, что, несмотря на различия в плотности рыхлого песка, загрязненные образцы имели практически сопоставимую проницаемость по сравнению с условно чистыми песками. Коэффициент фильтрации загрязненных песков составил около $18,7 \div 20,0$ м/сутки по сравнению с $17,3 \div 19,8$ м/сутки для чистых песков. В случае плотных образцов проницаемость существенно отличалась. Коэффициент фильтрации для загрязненных песков варьировал от $5,1$ до $6,5$ м/сут, для чистых песков – от $11,2$ до $13,0$ м/сут.

Лабораторные эксперименты с песчаными грунтами были дополнены прочностными испытаниями на аппарате прямого сдвига ГПП-30, разработанном институтом «Гидропроект». Для этого использовался консолидированный дренированный метод испытаний на прочность при сдвиге. Он подразумевает сдвиг предварительно консолидированных образцов на сжатие с медленной скоростью, что позволяет рассеяться поровому давлению, возникшему в ходе эксперимента. Метод широко используется для определения прочности песка на сдвиг [22-26].

Для проведения экспериментов было подготовлено 12 высушенных на воздухе образцов чистого и загрязненного песка – по 6 образцов как рыхлой, так и плотной структуры. В соответствии с рекомендациями, изложенными в нормативных документах, набор из трех образцов подвергался контролируемому нормальному напряжению (σ) – 100 кПа, 150 кПа и 200 кПа в каждом эксперименте. После этого прикладывалась боковая нагрузка, вызывающая деформацию, до разрушения образцов. Таким образом, были определены пиковые напряжения (τ) (табл. 2).

Таблица 2

Результаты испытаний песков на прочность при сдвиге

Лабораторный номер	Условно «чистый» песок		Лабораторный номер	Загрязненный песок	
	Нагрузка, кг/см ²			Нагрузка, кг/см ²	
	Нормальная (ограничительная) σ	Сдвиг по касательной, τ		Нормальная (ограничительная) σ	Сдвиг по касательной, τ
Рыхлое сложение					
1	1,00	0,65	7	1,00	0,75
2	1,50	0,99	8	1,50	1,19
3	2,00	1,30	9	2,00	1,70
Плотное сложение					
4	1,00	0,95	10	1,00	0,85
5	1,50	1,26	11	1,50	1,26
6	2,00	1,60	12	2,00	1,90

По результатам испытаний были построены графики напряжения сдвига в зависимости от нормального напряжения (рис. 6). Они были использованы для определения параметров прочности на сдвиг – сцепления c (кПа) и угла внутреннего трения ϕ (град.).

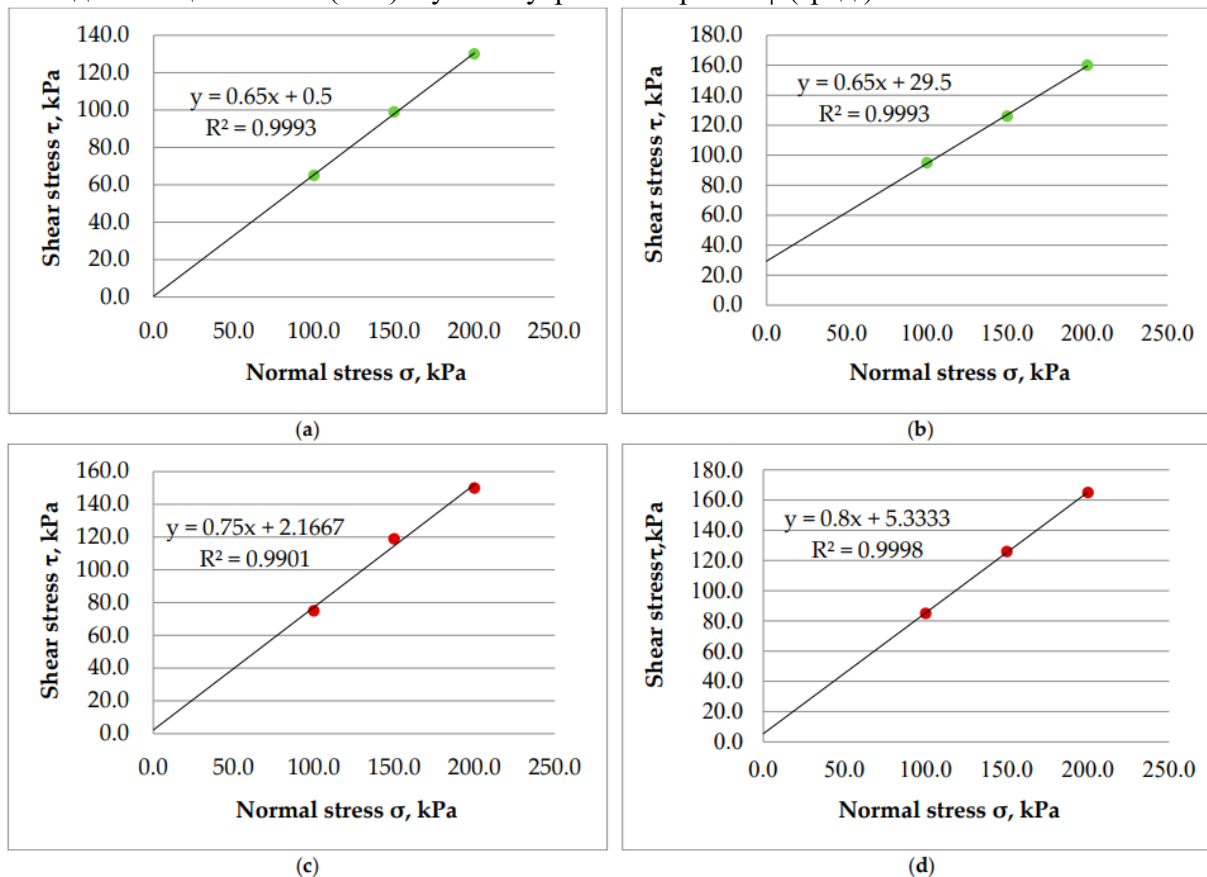


Рис. 6. Графическое представление коэффициентов сдвиговой прочности для условно чистых песков с рыхлой (а) и плотной (б) структурой; загрязненных песков с рыхлой (в) и плотной (г) структурой: зеленые точки – условно чистые пески; красные точки – пески, покрытые пленками углеводородов

Параметры прочности при сдвиге определялись с помощью прямолинейного уравнения, описывающего линейную кривую, соответствующую точкам результатов испытаний. Это уравнение также известно как уравнение Кулона для прочности при сдвиге:

$$\tau = \sigma \cdot \tan \varphi + c, \quad (2)$$

где σ – эффективное нормальное напряжение на плоскости разрыва, кг/см^2 ; $\tan \varphi$ – коэффициент внутреннего трения грунта; φ – угол внутреннего трения; c – сцепление, кПа.

На рисунке 6 показано, что в условно чистом рыхлом песке (рисунок 6а) φ равен 33° , а значение c находится на близком к нулю уровне. Для плотного песка (рис. 6б) φ остается неизменным, а c значительно возрастает вплоть до 30 кПа. В загрязненных песках обнаруживается другая закономерность. Можно отметить, что φ песка с рыхлой структурой (рис. 6в) составляет 37° , $c = 2$ кПа. В случае плотной структуры φ увеличивается на 2° (39°), а c возрастает до 5 кПа. Полученные результаты свидетельствуют о том, что увеличение плотности загрязненных песков в меньшей степени влияет на изменение прочностных параметров по сравнению с условно чистыми песками.

При изучении прочности песков особое внимание уделялось деформационному поведению и его продолжительности при различных нормальных напряжениях (рис. 7 и 8).

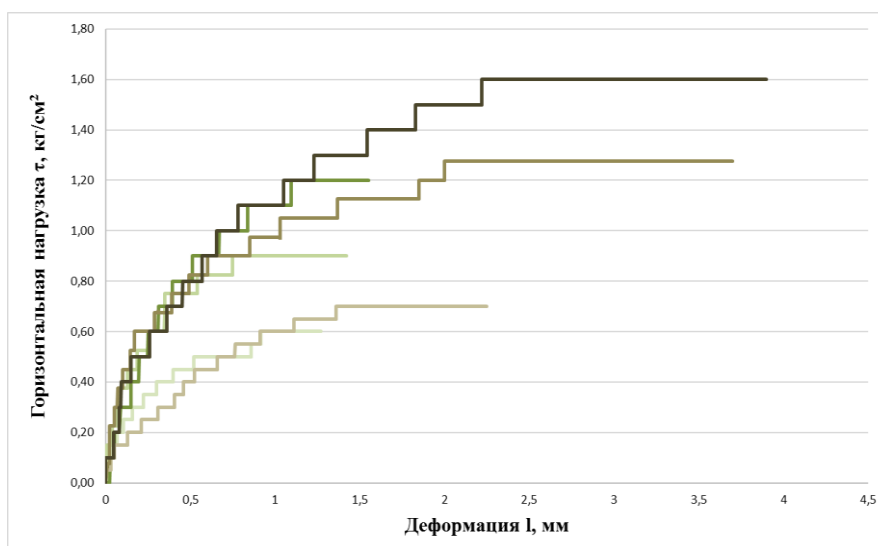


Рис. 7. Кривые сдвигового напряжения для сыпучих песков: σ_1 , σ_2 и σ_3 – нормальные значения напряжений, 100, 150 и 200 кПа, соответственно

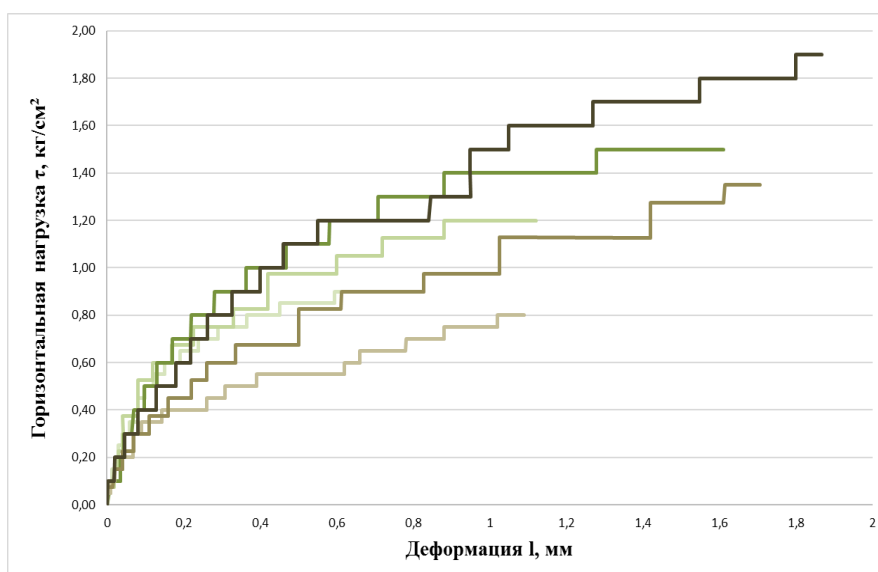


Рис. 8. Кривые сдвиговых напряжений для плотных песков: σ_1 , σ_2 и σ_3 – значения нормального напряжения, 100, 150 и 200 кПа соответственно

Полученные кривые позволили проследить определенные закономерности – сдвиговые смещения в загрязненных песках развивались в течение более длительного времени, чем в условно чистых песках при одинаковой нормальной нагрузке. В зависимости от величины нормальной нагрузки и плотности песка общая продолжительность сдвиговых деформаций в условно чистых песках не превышала 2-3 ч, тогда как в загрязненных образцах она могла длиться до 5-10 ч.

3. Обсуждение

Анализ результатов лабораторных исследований условно чистых и загрязненных песков позволил выявить некоторые закономерности в изменении гранулометрического состава песчаных грунтов, их физико-механических и гидрофизических свойств, происходящих в условиях длительного углеводородного загрязнения. Выявленные закономерности можно представить в виде следующей схемы (рис. 9).



Рис. 9. Схема трансформации песчаного грунта при длительном углеводородном загрязнении

Из рисунка 9 видно, что поступление нефтяных углеводородов в верхнюю часть профиля, а именно в ненасыщенную зону, сложенную воздушно-сухими песками, сопровождается сорбционным процессом [27-29]. Согласно опубликованным данным, сорбционная способность почв определяется их гранулометрическим составом [30-33]. Наибольшая емкость по отношению к углеводородам характерна для глинистых почв, которые способны сорбировать и удерживать более 40 л/м³. Наименьшая емкость характерна для крупнозернистых песков – менее 8 л/м³ [19,34]. Однако природа этого явления довольно сложна. Она определяется двумя основными факторами: образованием полярных групп в составе нефтяных углеводородов и наличием разноименных зарядов на поверхности песчаных частиц [35].

Известно, что при взаимодействии нефтяных углеводородов с кислородом воздуха происходит их активное превращение, обусловленное химическим окислением [36,37]. При этом происходит испарение легких фракций углеводородов и увеличение количества полярных групп (-ОН, -СООН и др.) в составе более тяжелых углеводородов, что способствует повышению их активности [38,39]. Функциональные группы, входящие в состав нефтяных углеводородов, можно рассматривать как полиэлектролиты, которые могут сорбироваться на поверхностях с разноименными зарядами. Такая сорбция считается необратимой [40,41]. Количество задержанных молекул углеводородов зависит от их состава, молярной массы, энергии сорбции и свойств контактирующих поверхностей минеральных зерен (рис. 10) [13].

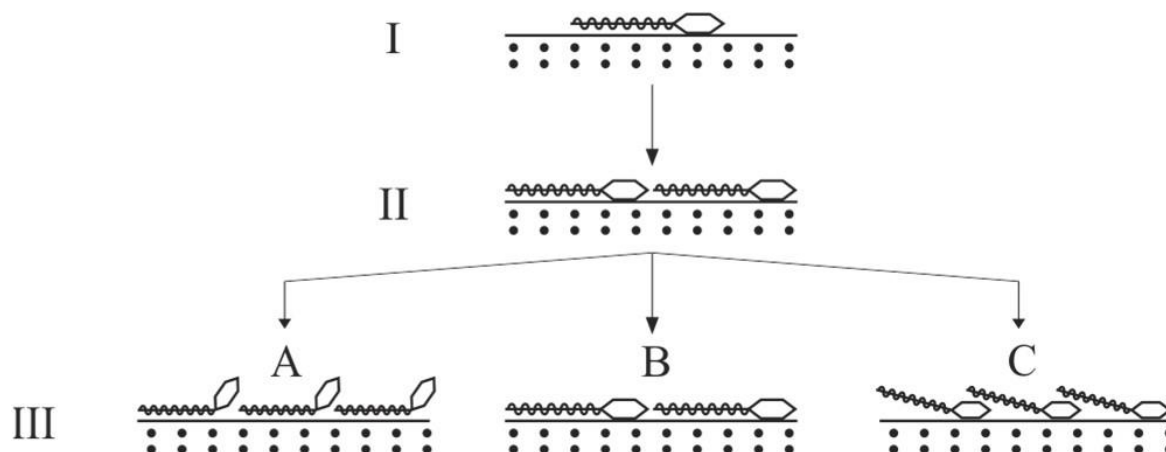


Рис. 10. Некоторые механизмы сорбции нефтяных углеводородов с полярными группами, демонстрирующие выравнивание молекул на поверхности минеральных частиц [13]:

I-III – последовательные стадии сорбции; A-C соответствуют слабым, промежуточным и сильным взаимодействиям

Современное понимание формирования непохожих зарядов на поверхности минеральных частиц песка, основанное на спектрофотометрических исследованиях, заключается в том, что это связано с зарядовой неоднородностью, которая выражается в образовании активных центров (кислот и оснований Льюиса). В роли таких центров выступают атомы кремния с разноименными зарядами, которые могут вступать в химические реакции с адсорбированными молекулами углеводородов (рис. 11) [13].

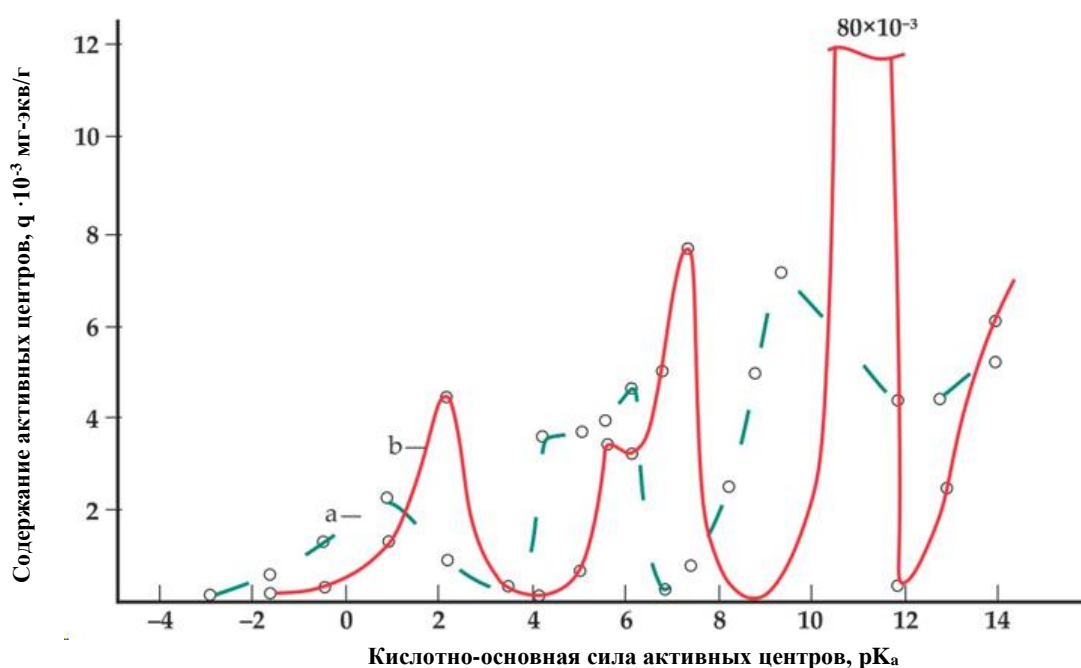


Рис. 11. Кривая распределения кислотно-основных центров на поверхности природного (а) и обогащенного (б) кварцевого песка [13]

Из сказанного следует, что взаимодействие песчаных грунтов с нефтяными углеводородами – сложный процесс, развитие которого зависит от минерального и гранулометрического состава песков, а также от структуры углеводородов. Следует отметить, что для выявления механизмов сорбции нефтяных углеводородов на поверхности минеральных частиц необходимы отдельные тщательные исследования. Однако, несмотря на недостаточное знание природы таких взаимодействий, результаты проведенных исследований выявили некоторые взаимосвязи между изменением состава загрязненных грунтов и трансформацией их физико-механических свойств. Обобщая полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

4. Выводы

Потери нефтяных углеводородов при эксплуатации промышленных объектов приводят к загрязнению песчаных грунтов, что негативно сказывается на их составе и свойствах. В основе таких изменений лежит физико-механическое взаимодействие между полярными группами нефтяных углеводородов и активными центрами песчаных зерен. Результатом этого взаимодействия является сорбция нефтяных углеводородов песчаными грунтами, в процессе которой происходит изменение гранулометрического состава и, следовательно, физико-механических и гидрофизических свойств грунтов. Для установления закономерностей трансформации песков в условиях углеводородного загрязнения были проведены лабораторные исследования. Обобщая полученные результаты, можно сделать выводы о следующем:

(1) Сорбция нефтяных углеводородов приводит к образованию углеводородных пленок на поверхности зерен песчаных грунтов и способствует развитию микроагрегатов размером от 0,5 до 5,0 мм, которые цементируются обнаруженными пленками.

(2) Содержание микроагрегатов в загрязненных песках увеличивает их крупность более чем на 51 % до крупнозернистого и очень крупнозернистого типов по сравнению с условно чистыми песками, которые относятся к среднезернистым.

(3) Агрегированное состояние минеральных зерен в загрязненных песках влияет на их плотность. В рыхлых и плотных структурах она становится ниже на 0,10 и 0,21 г/см³ соответственно, в отличие от условно чистых песков, плотность которых составляет 1,42 г/см³ и 1,72 г/см³ соответственно.

(4) Изменение плотности загрязненных песков влияет на их проницаемость. В рыхлых песках коэффициент фильтрации аналогичен коэффициенту фильтрации условно чистых образцов и колеблется в пределах 18,7–20,0 м/сут. Коэффициент фильтрации плотных песков снижается до 5,1–6,5 м/сут.

(5) Изучение прочностных параметров загрязненных песков методом консолидированного дренажа при испытании на прямой сдвиг показывает, что по сравнению с условно чистыми песками загрязненные образцы имеют больший угол внутреннего трения ϕ (до 39°) и большое сцепление c (до 5 кПа). Особое внимание следует обратить на продолжительность сдвиговых деформаций загрязненных песков – в зависимости от приложенного нормального напряжения и плотности образца эксперимент может длиться до 10 ч.

Вклад авторов: концептуализация, И.Л.; методология, Ю.Л.; валидация, П.К.; формальный анализ, И.Л.; исследование, И.Л.; ресурсы, Ю.Л.; написание – подготовка первоначального проекта, И.Л.; визуализация, П.К. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Финансирование: данное исследование не получало внешнего финансирования.

Заявление совета по институциональному надзору: не применимо.

Заявление об информированном согласии: не применимо.

Заявление о доступности данных: данные будут предоставлены по запросу читателя.

Конфликты интересов: авторы не заявляют о конфликте интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kazantsev, A.I.; Boikov, A.V.; Valkov, V.A. Monitoring the deformation of the earth's surface in the zone of influence construction. *E3S Web Conf.* 2020, 157, 02013. <http://doi.org/10.1051/e3sconf/202015702013>
2. Trushko, O.V.; Trushko, V.L.; Demenkov, P.A. Arrangement of multistory underground parking garages in complex engineering and geological environment. *Int. J. Math. Eng. Manag. Sci.* 2020, 5, 897–912. <http://doi.org/10.33889/IJMEMS.2020.5.5.069>
3. Sarapulova, G.I. Geochemical approach in assessing the technogenic impact on soils. *J. Min. Inst.* 2020, 243, 388–392. <http://doi.org/10.31897/pmi.2020.3.388>
4. Iakovleva, E.V.; Belova, M.V.; Soares, A.O. Allocation of Potentially Environmentally Hazardous Sections on Pipelines. *Geosciences* 2021, 11, 3. <http://doi.org/10.3390/geosciences11010003>
5. Iurchenko, V. Contamination and “Self-Cleaning” of soils, boarded on the objects of automobile and road complex, from petroleum products. *Procedia Eng.* 2017, 187, 783–789. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.438>
6. Shulaev, N.S.; Pryanichnikova, V.V.; Kadyrov, R.R. Regularities of electrochemical cleaning of oil-contaminated soils. *J. Min. Inst.* 2021, 252, 937–946. <http://doi.org/10.31897/PMI.2021.6.15>
7. Buzmakov, S.A.; Khotyanovskaya, Y.V. Degradation and pollution of lands under the influence of oil resources exploitation. *Appl. Geochem.* 2020, 113, 104–443. <http://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104443>
8. Marinin, M.A.; Dolzhikov, V.V.; Isheyskiy, V.A. Improving the efficiency of drilling and blasting operations for high water cut conditions. *Key Eng. Mater.* 2020, 836, 124–130. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.836.124>

9. Wozney, A.; Clark, I.D.; Mayer, K.U. Quantifying natural source zone depletion at petroleum hydrocarbon contaminated sites: A comparison of 14C methods. *J. Contam. Hydrol.* 2021, 240, 103795. <http://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103795>
10. Khaustov, A.P.; Redina, M.M. Hydrocarbon contamination of soils and soils: The practice of regulation, problems and trends. *Geoecol. Eng. Geol. Hydrogeol. Geocryol.* 2017, 1, 3–14.
11. Golovina, E.I.; Karennik, K.S. Modern trends in the field of solving transboundary problems in groundwater extraction. *Resources* 2021, 10, 107. <http://doi.org/10.3390/resources10100107>
12. Golovina, E.I.; Pasternak, S.N.; Tsiglianu, P.P.; Tselishev, N.A. Sustainable management of transboundary groundwater resources: Past and future. *Sustainability* 2021, 13, 12102. <http://doi.org/10.3390/su132112102>
13. Baranova, N.V.; Pashina, L.A.; Kostochko, S.V. Comparative analysis of some methods for determining the acid-base properties of the surface of solids from the point of view of studying the adhesive interaction. *Her. Technol. Univ.* 2014, 19, 19–36.
14. Dashko, R.E.; Lokhmatikov, G.A. The Upper Kotlin clays of the Saint Petersburg region as a foundation and medium for unique facilities: An engineering-geological and geotechnical analysis. *J. Min. Inst.* 2022, 254, 180–190. <http://doi.org/10.31897/PMI.2022.13>
15. Kondrasheva, N.K.; Baitalov, F.D.; Boitsova, A.A. Comparative assessment of structural-mechanical properties of heavy oils of timano-pechorskaya province. *J. Min. Inst.* 2017, 225, 320. <http://doi.org/10.18454/pmi.2017.3.320>
16. Estabragh, A.R. Consolidation behavior of two fine-grained soils contaminated by glycerol and ethanol. *Eng. Geol.* 2014, 178, 102–108. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.05.017>
17. Haghsheno, H.; Arabani, M. Geotechnical properties of oil-polluted soil: A review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022, 29, 32670–32701. <http://doi.org/10.1007/s11356-022-19418-1>
18. Nasehi, S.A. Influence of gas oil contamination on geotechnical properties of fine and coarse-grained soils. *Geotech. Geol. Eng.* 2016, 34, 333–345. <http://doi.org/10.1007/s10706-015-9948-7>
19. Dashko, R.E.; Lange, I.Y. Engineering-geological aspects of negative consequences of contamination of dispersive soils by petroleum products. *J. Min. Inst.* 2017, 228, 624–630. <http://doi.org/10.25515/pmi.2017.6.624>
20. Chen, C.S.; Tien, C.J. Factors affecting in situ analysis of total petroleum hydrocarbons in contaminated soils by using a mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy. *Chemosphere* 2020, 261, 127751. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127751>
21. Gordon, G. Oil spill effects on soil hydrophobicity and related properties in a hyper-arid region. *Geoderma* 2018, 312, 114–120. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.008>
22. Abdelhalim, R.A.; Selamat, M.R.; Ramli, H. Evaluation of strength properties of oil-contaminated sands upon stabilisation with laterite soil. *Int. J. Pavement Eng.* 2021, 23, 2981–2997. <http://doi.org/10.1080/10298436.2021.1876875>
23. Abousnina, R.M. Effects of light crude oil contamination on the physical and mechanical properties of fine sand. *Soil Sediment Contam. Int. J.* 2015, 24, 833–845. <http://doi.org/10.1080/15320383.2015.1058338>
24. Al-Adili, A.; Alsoudany, K.Y.; Shakir, A. Investigation of crude oil pollution effect on stiffness characteristics of sandy and gypseous soil. *Soil Mech. Found. Eng.* 2017, 54, 276–282. <http://doi.org/10.1007/s11204-017-9469-x>
25. Askarbioki, M.H. Impact of gasoline contamination on mechanical behavior of sandy clay soil. *J. Min. Environ.* 2019, 10, 389–399. <http://doi.org/10.22044/JME.2019.7660.1622>
26. Kererat, C. Effect of oil-contamination and water saturation on the bearing capacity and shear strength parameters of silty sandy soil. *Eng. Geol.* 2019, 257, 105–138. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.05.015>
27. Chen, Y.A. Effect of soil organic matter on petroleum hydrocarbon degradation in diesel/fuel oil-contaminated soil. *J. Biosci. Bioeng.* 2020, 129, 603–612. <http://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2019.12.001>
28. Gharedaghlou, B.; Price, J.S. Characterizing the immiscible transport properties of diesel and water in peat soil. *J. Contam. Hydrol.* 2019, 221, 11–25. <http://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2018.12.005>
29. Quiñones-Bolaños, E.; Bustillo-Lecompte, C. Geotechnical Properties and Stabilization of Well-graded Sand with Clay and Gravel Soils Contaminated with Gasoline. *Water Air Soil Pollut.* 2020, 231, 1–13. <http://doi.org/10.1007/s11270-020-04898-z>
30. Liu, H. Hydrocarbon transformation pathways and soil organic carbon stability in the biostimulation of oil-contaminated soil: Implications of 13C natural abundance. *Sci. Total Environ.* 2021, 788, 147–580. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147580>
31. Olatunde, K.A. Determination of petroleum hydrocarbon contamination in soil using VNIR DRS and PLSR modeling. *Heliyon* 2021, 7, e06794. <http://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06794>, <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/33898850>
32. Rajabi, H.; Sharifipour, M. Geotechnical properties of hydrocarbon-contaminated soils: A comprehensive review. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 2019, 78, 3685–3717. <http://doi.org/10.1007/s10064-018-1343-1>
33. Salimnezhad, A.; Soltani-Jigheh, H.; Soorki, A.A. Effects of oil contamination and bioremediation on geotechnical properties of highly plastic clayey soil. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 2021, 13, 653–670. <http://doi.org/10.1016/j.jrmge.2020.11.011>
34. Goldberg, V.M.; Zverev, V.P.; Arbuzov, A.I.; Kazennov, S.M.; Kovalevsky, Y.V.; Putilin, V.S. *Technogenic Pollution of Natural Waters by Hydrocarbons and Its Environmental Consequences*; Nauka: Moscow, Russia, 2001; p. 125.
35. Mousavi, S.E. Shear strength behavior in the interface of contaminated soil with bio-diesel oil and geosynthetics. *Transp. Geotech.* 2017, 10, 62–72. <http://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.12.003>
36. Alvim, G.M.; Pontes, P.P. Aeration and sawdust application effects as structural material in the bioremediation of clayey acid soils contaminated with diesel oil. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 2018, 6, 253–260. <http://doi.org/10.1016/j.iswcr.2018.04.002>
37. Wei, K.H. Recent progress on in-situ chemical oxidation for the remediation of petroleum contaminated soil and groundwater. *J. Hazard. Mater.* 2022, 432, 128738. <http://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128738>
38. Yao, Y. Modeling capillary fringe effect on petroleum vapor intrusion from groundwater contamination. *Water Res.* 2019, 150, 111–119. <http://doi.org/10.1016/j.watres.2018.11.038>
39. Safedian, H.; Rajabi, A.M.; Ghasemzadeh, H. Effect of diesel-contamination on geotechnical properties of illite soil. *Eng. Geol.* 2018, 241, 55–63. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.04.020>
40. Bykova, M.V.; Alekseenko, A.V.; Pashkevich, M.A.; Drebenstedt, C. Thermal desorption treatment of petroleum hydrocarboncontaminated soils of tundra, taiga, and forest steppe landscapes. *Environ. Geochem. Health* 2021, 43, 2331–2346. <http://doi.org/10.1007/s10653-020-00802-0>
41. Meng, L.; Bao, M.; Sun, P. A new perspective of particle adsorption: Dispersed oil and granular materials interactions in simulated coastal environment. *Mar. Pollut. Bull.* 2017, 122, 100–109. <http://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.023>