

УДК 624.131

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

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-3-33-43

© А. V. Kvashuk, post-graduate student  
(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering,  
St. Petersburg, Russia)  
E-mail: [alina\\_kvashuk@mail.ru](mailto:alina_kvashuk@mail.ru)

## ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ ПРИ ИХ ЗАГРЯЗНЕНИИ НЕФТЕПРОДУКТАМИ

### CHANGES IN THE MECHANICAL PROPERTIES OF SANDY SOILS SUBJECTED TO CONTAMINATION WITH PETROLEUM PRODUCTS

Выполнен аналитический обзор существующих исследований отечественных и зарубежных авторов об изменении механических свойств песчаных грунтов в результате их загрязнения нефтью или различными видами нефтепродуктов в процессе эксплуатации сооружений нефтяной промышленности. Рассмотрено изменение таких механических характеристик песчаного грунта, как удельное сцепление, угол внутреннего трения и модуль деформации, в зависимости от вида загрязняющего вещества и его процентного содержания (концентрации) в составе грунта.

*Ключевые слова:* песчаный грунт, загрязнение нефтепродуктами, механические свойства, удельное сцепление, угол внутреннего трения, модуль деформации.

The article presents an analytical review of existing published studies of domestic and foreign authors on the change in the mechanical properties of sandy soils as a result of contamination with oil or various types of oil products during the operation of oil industry facilities. The author analyzes the changes of such mechanical characteristics of sandy soil as specific adhesion, internal friction angle and deformation modulus depending on the type of pollutant and its percentage (concentration) in the soil composition.

*Keywords:* sandy soil, oil contamination, mechanical properties, specific adhesion, internal friction angle, deformation modulus.

#### Введение

По данным Министерства природных ресурсов, доля углеводородного загрязнения грунтовой толщи на территории России по состоянию на 2015 год составила<sup>1</sup> более 5 млн т [1]. Так, например, потери нефтепродуктов на автозаправочных станциях в зависимости от емкости резервуаров и времени года могут достигать 8,4 т в месяц; в ряде случаев суммарные потери нефтепродуктов составляют 1–2 % от общего объема реализации. Большое количество нефтяных угле-

водородов зафиксировано в ливневых стоках с территорий автозаправок и резервуарных парков [2].

В актуализированной редакции ГОСТ 25100 «Грунты. Классификация» от 2020 г. нефтезагрязненные грунты вынесены как отдельный подвид техногенных грунтов по особенностям технологий создания (изменения) его свойств, а направленность данных изменений охарактеризована как ухудшенная. Е. А. Вознесенский, участвовавший в разработке и согласовании окончательной редакции данного ГОСТа, в статье [3] полагает, что техногенный грунт может считать-

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

ся таковым в случае, если неизбежно придется учитывать произошедшие изменения в интересах эксплуатационной надежности и долговечности возводимых сооружений.

В настоящее время многими отечественными [4–8] и зарубежными [9–15] учеными экспериментально доказано, что проливы нефтепродуктов на грунтовую поверхность приводят к снижению прочностных и деформационных характеристик грунтов, и лишь в отдельных случаях наличие нефтепродукта в составе грунта может привести к его упрочнению.

К сожалению, на территории Российской Федерации не существует нормативной базы, которая регламентировала бы предельно допустимые концентрации (ПДК) нефтепродукта в грунтах с точки зрения эксплуатационной надежности сооружений, возводимых на подобных грунтах, а не с позиции его экологической безопасности. Следует отметить, что в Российской Федерации, в отличие от многих зарубежных стран, ПДК для нефти в грунтах не разработаны ввиду ряда методологических трудностей, таких как многокомпонентный состав нефти, разноплановое воздействие различных компонентов нефти (легкие фракции быстро испаряются, тяжелые сохраняются на долгий срок), одновременное воздействие на различные грунтовые процессы (миграция и фильтрация поровой жидкости), неоднородность грунтового напластования и его разные физико-механические свойства и, наконец, «залповый» характер воздействия нефтяного загрязнения [16, 17].

#### **Изменение свойств песчаного грунта, загрязненного нефтепродуктами**

Рассмотрим характер изменения прочностных (удельное сцепление, угол внутреннего трения) и деформационных (модуль деформации) свойств песчаного грунта на примере исследований, проведенных отечественными и зарубежными авторами.

#### **Сцепление**

Аналитический обзор ряда лабораторных исследований изменения удельного сцепления нефтезагрязненных песков позволил заключить, что наличие нефтепродукта в составе песчаного грунта по-разному может влиять на удельное сцепление, а именно:

1) оно будет увеличиваться с увеличением процентного содержания нефтепродукта в составе грунта;

2) оно будет увеличиваться до определенного пикового значения и далее снижаться по неизученной зависимости.

Авторы исследования [19] пришли к выводу, что удельное сцепление песчаного грунта плавно увеличивается с возрастанием процентного содержания нефтепродукта в составе грунта (табл. 1). Аналогичные результаты были получены в исследованиях [21].

Однако данная зависимость не всегда подтверждается, и во многом величина удельного сцепления грунта зависит от начальной крупности песка и процентного содержания нефтепродукта в составе грунта. Так, в исследованиях [5] были проведены испытания нефтезагрязненных песков различной крупности на сдвиг методом одноплоскостного среза (рис. 1).

#### **Угол внутреннего трения**

Аналитический обзор результатов лабораторных исследований отечественных и зарубежных авторов об изменении угла

Таблица 1

**Характеристики образцов песка с различным процентным содержанием нефти [19]**

Содержание нефти в песке, %	Сцепление $c$	$\varphi^\circ$	Оптимальная влажность, %
0	8	37,8	10,2
4	12	36,2	9,5
8	17	33,5	8,5
12	19	31,4	8,2
16	23	29,7	8



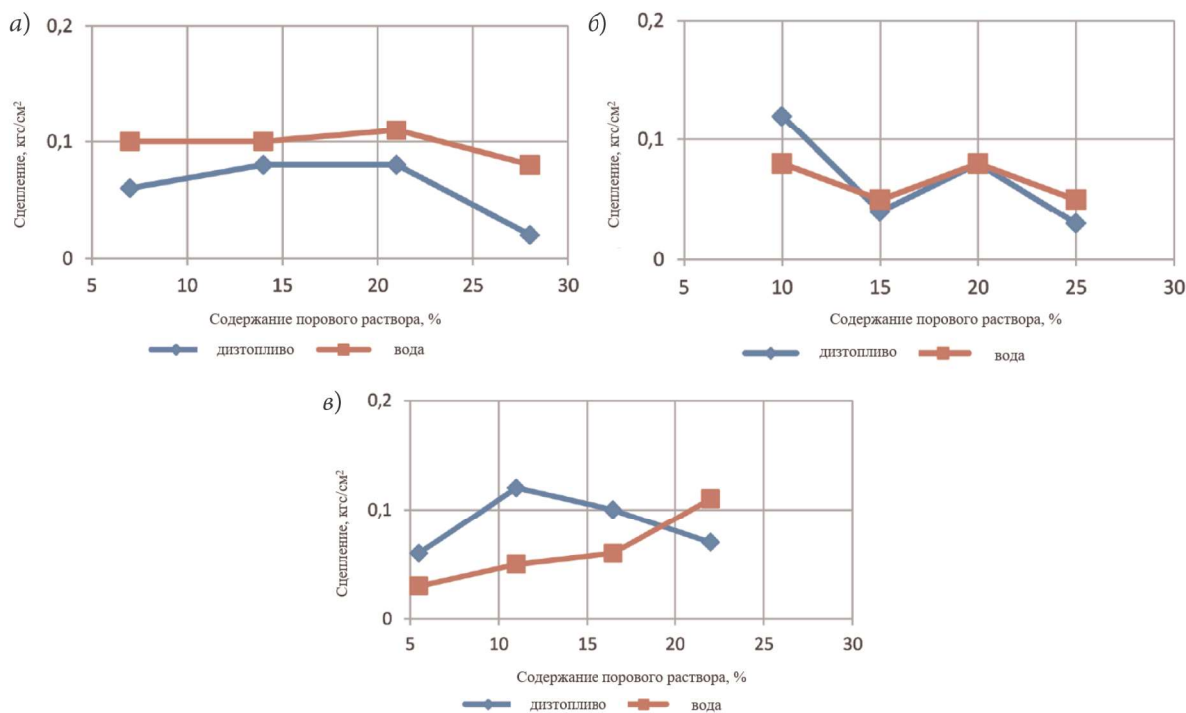


Рис. 1. Изменение сцепления (с) в зависимости от влажности и содержания дизтоплива: а — в мелких песках; б — в песках средней крупности; в — в крупных песках [5]

внутреннего трения песчаных грунтов, загрязненных нефтепродуктами, позволил заключить, что угол внутреннего трения снижается с увеличением процентного содержания нефтепродукта в составе песка.

Известно, что химический состав подавляющего большинства нефтепродуктов включает парафин в разных концентрациях. Увеличение объемной доли парафина влияет на уровень самой низкой температуры, при которой нефть или нефтепродукт обладают подвижностью (течет как жидкость). С учетом технологических особенностей хранения и транспортировки нефтепродуктов пребывание нефтепродукта в жидком состоянии обязательно. Таким образом, аварийный разлив или другой выброс нефтепродукта на грунтовое основание приводит к инфильтрации нефтепродукта в грунт. В условиях обозначенного процесса происходит частичное или полное замещение поровой жидкости, в результате чего частицы песка приобретают вокруг себя маслянистую пленку. Покры-

тые маслянистой оболочкой частицы грунта под действием нагрузки проскальзывают относительно друг друга, в результате чего снижается трение между частицами и значение угла внутреннего трения уменьшается.

В исследовании [7] отмечено, что при загрязнении машинным маслом песка средней крупности наблюдается четкая закономерность: с увеличением процентного содержания нефтепродукта угол внутреннего трения уменьшается. При содержании машинного масла 10 мг на 100 г песка  $\varphi = 24,5^\circ$ ; при 40 мг —  $\varphi = 22^\circ$ . Автор сообщает, что для разнозернистого песка при содержании машинного масла 20 мг и 30 мг наблюдается та же закономерность, однако конкретных значений угла внутреннего трения не приводит. Следует отметить, что в данном исследовании не был зафиксирован угол внутреннего трения песчаного грунта до его загрязнения машинным маслом, поэтому в условиях проведенного исследования сложно судить

о влиянии нефтепродукта на угол внутреннего трения.

Авторы исследования [19] также пришли к выводу, что неочищенная нефть оказывает существенное влияние на угол внутреннего трения песчаного грунта: наблюдается его

уменьшение по мере увеличения процентного содержания нефти. Авторы объясняют это тем, что неочищенная нефть действует как вяжущее вещество, уменьшая при этом трение между частицами, но повышая при этом удельное сцепление (см. табл. 1).

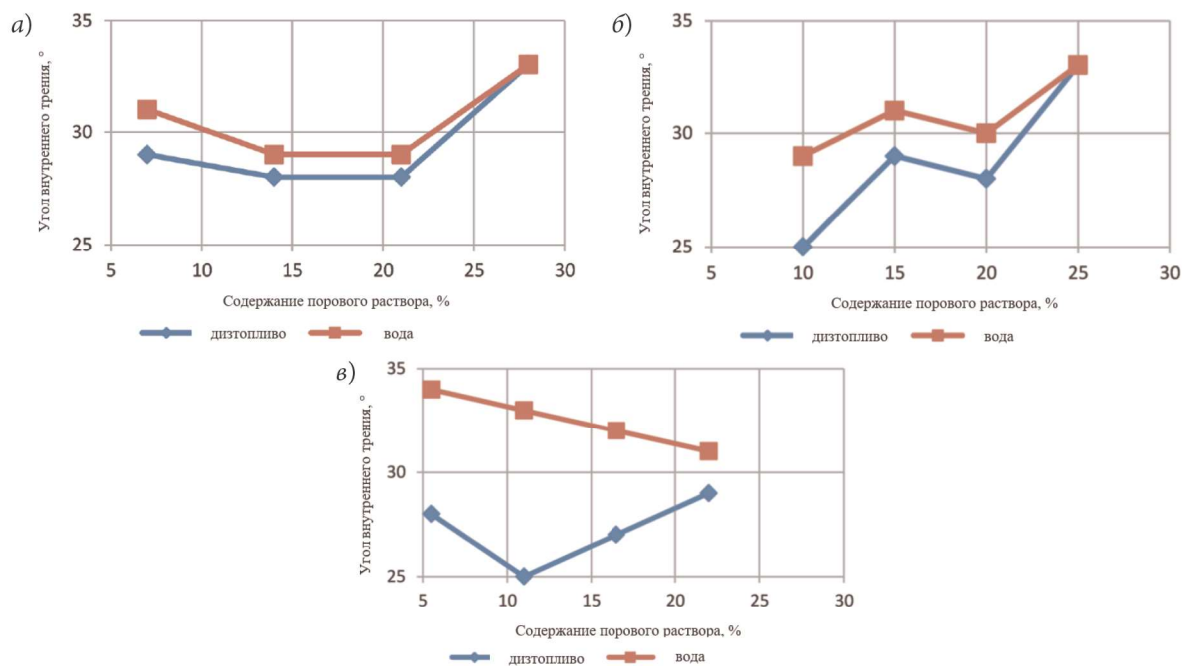


Рис. 2. Изменение угла внутреннего трения в зависимости от влажности и содержания дизельного топлива: а — в мелких песках; б — в песках средней крупности; в — в крупных песках

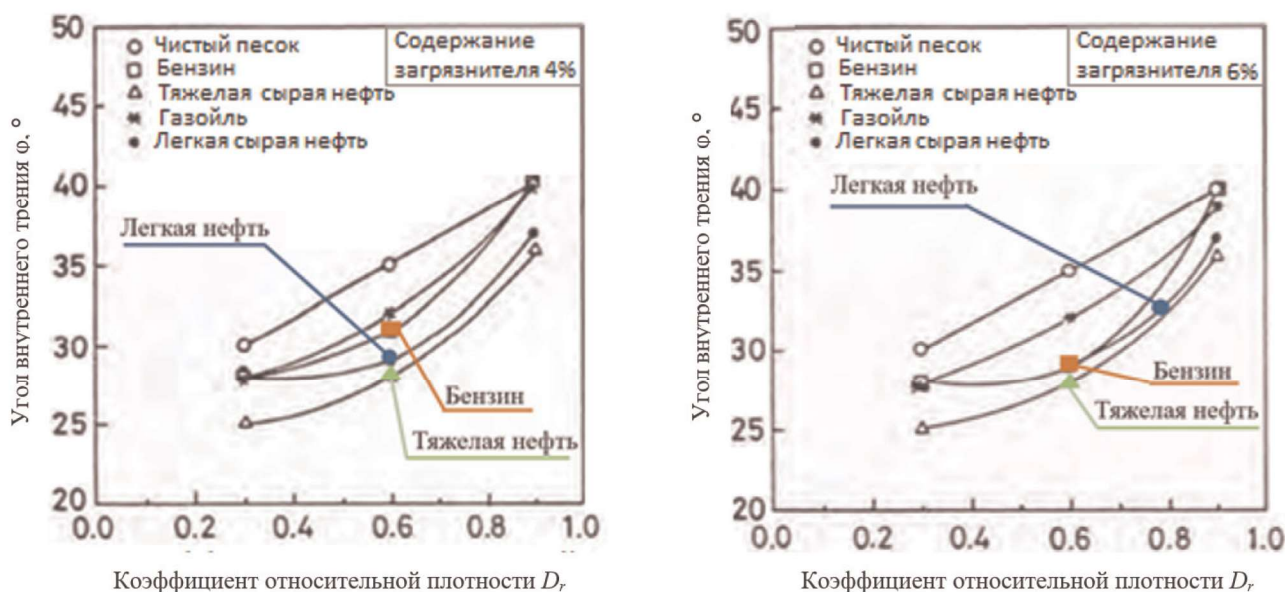


Рис. 3. Изменение угла внутреннего трения в зависимости от коэффициента относительной плотности песчаного грунта и содержания нефтепродукта [9]



В исследованиях [18] авторы также говорят о снижении угла внутреннего трения нефтезагрязненных песков.

К противоречивым результатам пришли авторы исследования [5]. Результаты лабораторных испытаний представлены на рис. 2. В зависимости от концентрации нефтепродукта угол внутреннего трения не изменялся по явной закономерности. Например, для мелких песков наблюдалось увеличение угла трения при концентрации дизельного топлива 21 %, при концентрации от 14 до 21 % угол внутреннего трения не изменялся, при концентрации от 7 до 14 % — снижение незначительно (примерно на 2°).

В Кувейтском университете было проведено обширное исследование [9] изменения механических свойств нефтезагрязненных песков. В качестве изменяемых параметров были приняты типы нефтепродукта (легкая и тяжелая нефти, бензин), процентное содержание загрязнителя (4 %, 6 %) и плотность сложения испытываемых образцов. В данном исследовании графики полученных зависимостей (рис. 3) были построены в осях  $\varphi$  и  $D_r$ , где  $D_r$  (relative density) — отношение плотности песка к плотности загрязняющего вещества, то есть относительная плотность песков нарушенного сложения, определяемая выражением (1). В российской инженерной практике аналогом  $D_r$  является показатель (индекс) плотности  $I_d$ , определяемый по той же формуле, что и  $D_r$ :

$$I_d = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}, \quad (1)$$

где  $e_{\max}$  и  $e_{\min}$  — коэффициенты пористости песка в максимально рыхлом и максимально плотном состояниях соответственно;  $e$  — коэффициент пористости грунта в естественном состоянии.

Авторы данного исследования пришли к выводу, что угол внутреннего трения незначительно снижается при увеличении процентного содержания нефтепродукта на 2 %, при этом максимальное снижение тре-

ния зафиксировано у образцов, загрязненных бензином (при  $D_r = 0,6$   $\varphi = 30^\circ$  и  $27^\circ$  при 4- и 6 %-ном загрязнении соответственно). Следует отметить, что незначительное снижение угла внутреннего трения в рамках обозначенного исследования может быть связано с узким диапазоном процентных содержаний нефтепродукта. При дальнейшем увеличении процентного содержания нефтепродукта увеличение угла внутреннего трения более вероятно.

Значительное снижение угла внутреннего трения песчаного грунта при увеличении процентного содержания нефтепродукта отметили в своих исследованиях Shin E. C. и Lee J. B. [23]. Испытания проводились на образцах песка средней крупности при процентных содержаниях сырой нефти 1, 2, 3, 4 % при  $D_r = 0,75$  и 0,5. При увеличении содержания нефтепродукта менее чем на 2 % угол внутреннего трения снизился от  $42^\circ$  до  $35^\circ$  при  $D_r = 0,75$  и от  $35^\circ$  до  $29^\circ$  при  $D_r = 0,5$  (рис. 4). Авторы заключили, что 4 %-ная концентрация нефтепродукта приводит к снижению угла внутреннего трения на 25 %. Результаты данного исследования противоречат результатам исследований [9], где при увеличении концентрации всего на 2 % угол внутреннего трения изменился не более чем на 3°.

### Модуль деформации

К деформационным характеристикам грунта принято относить коэффициент относительной сжимаемости  $m_v$ , коэффициент сжимаемости  $m_0$  и модуль деформации. Однако обзор отечественной и зарубежной литературы показал, что в подавляющем большинстве лабораторных испытаний нефтезагрязненных песков, проведенных за рубежом, говорится о сжимаемости грунтов в целом, а не о конкретных деформационных характеристиках, в частности — о модуле общей деформации  $E$ .

Так, в исследовании [23] проводились модельные испытания нефтезагрязненного песка, используемого в качестве основания

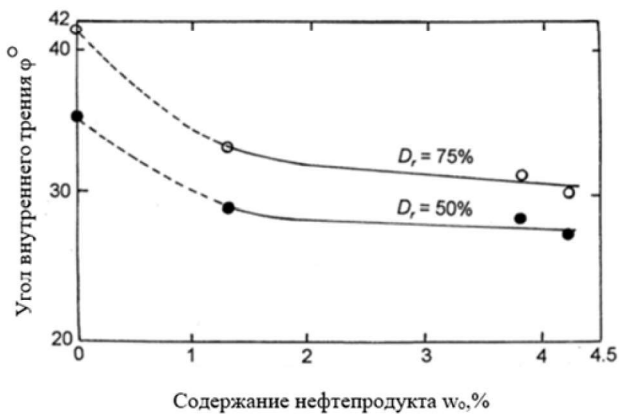


Рис. 4. График зависимости угла внутреннего трения от процентного содержания нефтепродукта в составе песчаного грунта при  $D_r = 0,75$  и  $D_r = 0,5$

столбчатого фундамента. Модель фундамента была изготовлена из алюминиевой пластины  $70 \times 3175$  мм. Испытания проводились в боксе, боковые стороны которого были закреплены уголками для сведения к минимуму боковой деформации при уплотнении грунта. Ввиду того, что габаритные размеры бокса и длина смоделированного

фундамента были примерно одинаковыми, достигалось условие плоской деформации. После завершения процесса уплотнения песков (с последовательно увеличивающимся процентным содержанием нефтепродукта) модель фундамента помещалась по центру бокса, и нагрузка на фундамент подавалась с помощью поршня с гидравлическим приводом. Для корректной оценки изменения сжимаемости песков при их первичном загрязнении нефтепродуктом также был испытан чистый песок ( $w_0 = 0\%$ ). Скорость нагружения составляла 1 мм/с. Полученные результаты приведены на рис. 5.

Анализируя полученные результаты, становится очевидно, что сжимаемость и, следовательно, модуль деформации загрязненного грунта уменьшились как при первичном его загрязнении на 1,3 %, так и при последующем увеличении концентрации до 4,2 %. Увеличение сжимаемости наблюдается вне зависимости от коэффициента относительной плотности песка. Результаты иссле-

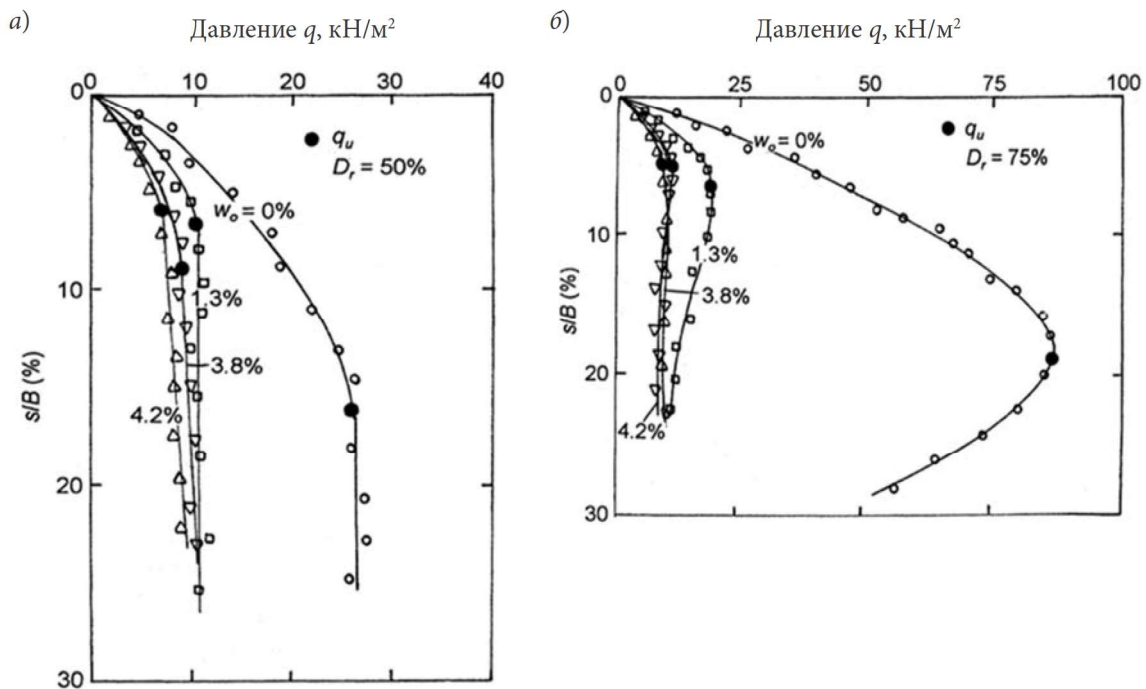


Рис. 5. График зависимости давления  $q$  от величины  $s/B$  ( $s$  — осадка,  $B$  — ширина фундамента) для грунта с различным содержанием нефтепродукта [23] при коэффициенте относительного уплотнения: а —  $D_r = 50\%$ ; б —  $D_r = 75\%$



дования показали, что давление по подошве модельного фундамента до потери несущей способности основания (предельное) максимально у чистого песка. Далее, с увеличением процентного содержания нефтепродукта, предельное давление  $q_u$  уменьшается с 25 до 6 кН/м<sup>2</sup> при увеличении концентрации нефтепродукта с 0 % до 4,2 % (при  $D_r = 0,5$ ) и с 88 до 6 кН/м<sup>2</sup> при  $D_r = 0,75$ .

Исследования [19] показали, что осадка песчаного грунта увеличивается при добавлении нефти в процентном содержании от 8 до 16 %. Содержание нефти в 8, 12, 16 % увеличило осадку на 24, 14,5 и 60 % соответственно. При добавлении 4 % нефти осадка уменьшилась примерно на 28 %. Отсюда можно заключить, что наличие нефтепродукта в составе грунта в малых концентрациях может приводить к увеличению механических характеристик грунтов.

Так, например, автор [24] пришел к выводу о возможности укрепления пылеватых песков сырой маловязкой (низкосмолистой) нефтью, улучшенной цементом. Сущность физико-механических процессов, протекающих в системе «пылеватый песок–сырая нефть с добавками», заключается в том, что вначале наступает смачивание грунта и растекание по нему вязущего, затем — физико-химическая адсорбция и прививка макромолекул и молекул активных компонентов (цемента, извести) вязущего к поверхности частиц грунтов с образованием водородных связей, вносящих основной вклад в об-

разование прочных связей между грунтом и вязущим. При этом в зависимости от добавки образуются материалы с конденсационной (в случае органических добавок) и кристаллизационной структурами (в случае неорганических добавок). Исследования [24] проводились на пылеватых песках, по определению обладающих большой удельной поверхностью, а следовательно, и высокой химической активностью. В качестве вязущего применялась маловязкая нефть, в качестве улучшающих добавок применялись портландцемент марки 400, гашеная известь, алкилароматическая смола и концентраты сероорганических соединений. Анализ изотерм адсорбции показал, что адсорбционное равновесие в системе «грунт–нефть» наступает через 48–60 ч. С увеличением концентрации нефти в растворе интенсивность адсорбционного процесса возрастает. Предельное адсорбционное насыщение грунтов компонентами нефти наступает при дозировке последней 5 % от массы грунта. Оптимальные дозировки добавок, соответствующие предельному адсорбционному насыщению, составляют для цемента 4–5 %, для извести — 4 % от массы сухого грунта.

Исследование изменения предела прочности образцов во времени показало, что особенно интенсивно прочность повышается в течение первого месяца формирования структуры. Обобщенные показатели физико-механических свойств нефтегрунта представлены в табл. 2 [24].

Таблица 2

**Показатели физико-механических свойств нефтегрунта [24]**

Наименование показателей	Нефтегрунты с добавкой		
	Известь	Цемент	Смолы
Водонасыщение, % по объему	1,8	1,2	2,0
Коэффициент водоустойчивости	0,82	0,92	0,88
Предел прочности грунтов при сжатии, МПа, при температуре 20 °С:			
– сухих	0,92	1,42	2,05
– водонасыщенных	0,75	1,3	1,8
Модуль упругости, МПа	175	210–220	235



Из приведенных данных видно, что грунты, укрепленные нефтью с добавками, обладают достаточно высокими прочностными показателями и коэффициентом водоустойчивости, малым водонасыщением по объему, что существенно для долговечности укрепленных нефтегрунтов.

### Выводы

Анализ отечественной и зарубежной литературы о влиянии нефти и нефтепродуктов на механические свойства песчаного грунта позволил сделать следующие выводы:

1. Наличие нефтепродукта в составе песчаного грунта негативно влияет на его физико-механические свойства, что необходимо учитывать при расчетах по I и II группам предельных состояний и производстве работ нулевого цикла.

2. Если нефтезагрязненный песок выделен в отдельную категорию техногенных грунтов и характер изменения их свойств описан как «ухудшенный», то, следовательно, должны быть обозначены области и граничные условия возможного применения такого типа грунта в качестве оснований сооружений.

3. Изменение удельного сцепления песков с увеличением процентного содержания нефтепродукта не имеет общей закономерности и требует дальнейшего изучения.

4. Угол внутреннего трения с увеличением процентного содержания нефтепродукта в составе грунта уменьшается. Вероятно, покрытые маслянистой оболочкой песчаные частицы под действием нагрузки проскальзывают относительно друг друга, в результате чего снижается трение между частицами.

5. Сжимаемость нефтезагрязненных песков увеличивается с повышением процентного содержания нефтепродукта в составе грунта. Увеличение сжимаемости наблюдается при разных коэффициентах относительной плотности песков. В ряде работ указывается, что с увеличением процентного содержания нефтепродукта в составе грунта уменьшается величина предельного давле-

ния, что обусловлено снижением угла внутреннего трения и возможным снижением удельного сцепления.

6. В небольших концентрациях наличие нефтепродукта в составе песчаного грунта приводит к его упрочнению. В настоящее время теоретически обоснована и практически доказана возможность использования сырых нефтей для укрепления пылеватых песков с добавлением цемента.

### Заключение

Из результатов проведенного анализа по изменению механических характеристик грунтов в результате их загрязнения нефтепродуктами видно, что выполненные ранее исследования в основном касаются инженерно-геологического и экологического (возможное вторичное использование нефтегрунтов) направлений, в то время как вопросы, связанные с особенностями проектирования фундаментов зданий и сооружений на таких грунтах и методов прогнозирования их осадок, остаются малоизученными.

Для возможной объективной оценки работы грунтовых оснований при их загрязнении нефтепродуктами необходимо учитывать изменения физико-механических свойств с учетом ряда изменяемых параметров, таких как гранулометрические составы песков, типы и концентрации нефтепродуктов, их плотность, а также плотности сложения испытываемых образцов.

### Библиографический список

1. 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.
2. 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.
3. Вознесенский Е. А. Общая генетическая классификация техногенных грунтов // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2019. № 5. С. 3–9.



4. 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.
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 // Usmen, 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., Abduljawwad 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. Шагидуллин Р. Р., Латыпова В. З., Иванов Д. В., Шагидуллина Р. А., Тарасов О. Ю., Петров А. М. Нормирование допустимого остаточного содержания нефти и продуктов ее трансформации в почвах // Георесурсы. 2011. № 5 (41). С. 2–5.
17. Трофимов С. Я., Прохоров А. Н. Разработка нормативов допустимого остаточного содержания нефти в почвах // Экология производства. 2006. № 10. С. 30–37.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. Богомолов Ю. Н. Исследование технологического комплекса укрепления пылеватых песков маловязкой нефтью с улучшающими добавками в дорожном строительстве в условиях нефтепромысловых районов Западной Сибири: дис. ... канд. техн. наук. Л., 1980. 259 с.

## References

1. Dashko R. E., Lange I. Yu. *Geotekhnicheskiy analiz dlitel'noy ustoychivosti neftyanykh rezervuarov na vodonasyshchennykh peschano-glinistykh 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.
2. Dashko R. E., Lange I. Yu. *Vliyanie zagryazneniya nefteproduktami i ikh degradatsii v podzemnoy srede na geotekhnicheskie parametry peschano-glinistykh gruntov* [Influence of oil products' pollution and their degradation in the underground environment on the geotechnical parameters of sandy clay soils]. *Geotekhnika–Geoengineering*, 2013, no. 5-6, pp. 50–63.



3. Voznesenskiy E. A. *Obshchaya geneticheskaya klassifikatsiya tekhnogennykh gruntov* [General genetic classification of technogenic soils]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 4. Geologiya – Bulletin of Moscow University. Ser. 4. Geology*, 2019, no. 5, pp. 3–9.
4. Dashko R. E., Lange I. Yu. *Negativnye posledstviya kontaminatsii podzemnoy sredy neftyanymi uglevodorodami: preobrazovanie gruntov i konstruktsionnykh materialov* [Negative consequences of contamination of the underground environment by petroleum hydrocarbons: transformation of soils and structural materials]. *Zhilishchnoe stroitel'stvo – Housing Construction*, 2014, no. 10, pp. 56–59.
5. Osovetskiy B. M., Kachenov V. I., Rastegaev A. V., Afanas'ev R. A., Pikulev D. A. *Zakonomernosti izmeneniya prochnostnykh svoystv peskov, zagryaznennykh dizel'nykh 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-geologicheskii i ekologo-geologicheskii aspekty* [Oil pollution of soils: engineering-geological and ecological-geological aspects]. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co.KG (Germaniya), 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 influence of oil pollution on properties of soils]. *Geologiya i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala – Geology and Mineral Resources of the Western Urals*, 2011, no. 14, pp. 164–165.
8. Kopylov Yu. N. *Izmenenie svoystv peschanogo i glinistogo grunta v rezul'tate vozdeystviya motornogo masla* [Changes in the properties of sandy and clayey soil as a result of exposure to motor oil contamination]. *Trudy molodykh uchenykh i studentov*. 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 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 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. Shagidullin R. R., et al. *Normirovanie dopustimogo ostatochnogo sodержaniya nefi i produktov ee transformatsii v pochvakh* [Normalization of acceptable residual content of oil and its products transformation in soils]. *Georesursy – Geo-Resources*, 2011, no. 5 (41), pp. 2–5.
17. Trofimov S. Ya., Prokhorov A. N. *Razrabotka normativov dopustimogo ostatochnogo sodержaniya nefi v pochvakh* [Development of norms of the permissible residual content of oil in soils]. *Ekologiya proizvodstva – Ecology of production*, 2006, no. 10, pp. 30–37.
18. 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
19. Al'-Adili A., Yali K., Shakir A. *Issledovanie vliyaniya zagryazneniya nef'tyu peschanogo i gipso-soderzhashchego grunta na prochnost'* [Study on the effect of oil contamination of sandy and gypsiferous soils on the strength]. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov – Bases, Foundations and Soil Mechanics*, 2017, no. 4, pp. 30–35.
20. Brakorenko N. N., Emel'yanova T. Ya. *Vliyanie nefteproduktov na petrograficheskii 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 (on the example of Tomsk)]. *Vestnik Tomskogo gos.un-ta – Bulletin of Tomsk State University*, 2011, no. 342, pp. 197–200.
21. 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.
22. 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. Geo.-Min. diss.]. St. Petersburg, 2016, 234 p.

23. 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.

24. Bogomolov Yu. N. *Issledovanie tekhnologicheskogo kompleksa ukrepleniya pylevatykh peskov*

*malovyazkoy nef't'yu s uluchshayushchimi dobavkami v dorozhnom stroitel'stve v usloviyakh neftepromyslovykh rayonov Zapadnoy Sibiri. Diss. kand. tekhn. nauk* [Research of technological complex of strengthening dusty sands with low-viscosity oil with improving additives in road construction in the conditions of oilfield areas of Western Siberia. PhD in Sci. Tech. diss.]. Leningrad, 1980, 259 p.