DOI: *10.25515/PMI.2017.6.624*

УДК 624.131.1

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ НЕГАТИВНЫХ ПОСЛЕДСТВИЙ КОНТАМИНАЦИИ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ НЕФТЕПРОДУКТАМИ

Р.Э.ДАШКО, И.Ю.ЛАНГЕ
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

В статье приведены особенности преобразования и миграции нефтепродуктов в подземной среде, определяющиеся физическими и физико-химическими свойствами нефтяных углеводородов (плотностью, вязкостью, растворимостью в воде и др.) и вмещающих их грунтов (сорбционной способностью, влажностью и др.). Рассмотрены основные процессы деградации нефтепродуктов в грунтовой толще. Показано влияние нефтепродуктов на изменение окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий подземного пространства, активизацию жизнедеятельности различных форм микроорганизмов. Экспериментально исследовано изменение состава и свойств дисперсных грунтов различной степени водонасыщения. Проведен анализ причин разрушения резервуара – хранилища мазута. Установлено, что активность микробной деятельности в его основании привела к переходу песков в плывуны, а моренных суглинков – в квазипластичные разности. Зафиксировано интенсивное газообразование в песках метана и его гомологов, азота, диоксида углерода, водорода.

На основе анализа результатов длительного мониторинга за влиянием контаминации дисперсных грунтов нефтепродуктами отмечено снижение их несущей способности в основании сооружений до 50 % от первоначального значения. Показана роль микробной деятельности в формировании агрессивной среды по отношению к строительным материалам.

***Ключевые слова*:** подземное пространство, нефтяные углеводороды, контаминация, микроорганизмы, песчано-глинистые грунты, агрегаты, биохимическая газообразование, плывун, коррозия.

***Как цитировать эту статью*:** Дашко Р.Э. Инженерно-геологические аспекты негативных последствий контаминации дисперсных грунтов нефтепродуктами / Р.Э.Дашко, И.Ю.Ланге // Записки Горного института. 2017. Т. 228. С. 624-630. DOI: 10.25515/PMI.2017.6.624

Введение. Проблема контаминации подземного пространства городских и промышленных регионов нефтепродуктами весьма актуальна в связи с добычей, переработкой и транспортировкой энергоносителей, а также их широким использованием во многих технологических циклах промышленных предприятий. Поступление нефтяных углеводородов в подземную среду приводит к изменению окислительно-восстановительных и кислотно-щелочных условий, к активизации либо подавлению микробной деятельности в водонасыщенной грунтовой толще. Развитие этих процессов отражается на напряженно-деформируемом состоянии дисперсных грунтов, их составе и физико-механических свойствах, а также интенсифицирует ряд природно-техногенных процессов, направленность которых зависит от степени водонасыщения пород.

В грунтах зоны аэрации, представленных песчаными разностями, за счет наличия кислорода воздуха происходит химическое окисление нефтепродуктов, результатом которого является их необратимая сорбция на поверхности минеральных частиц, сопровождающаяся образованием агрегатов. В результате указанных процессов песчаные отложения переходят в рыхлые разности ($p_d \geq 1{,}01\text{-}1{,}25$ г/см^3) с высокой водопроницаемостью ($k_ф \geq 60$ м/сут), которые при взаимодействии с водой приобретают «зыбучее» состояние. Поступление нефтепродуктов как питательного и энергетического субстрата в водонасыщенную грунтовую толщу приводит к их биохимическому преобразованию под действием микробного биоценоза, состоящего из природных и привнесенных микроорганизмов. Общая направленность данного преобразования выглядит следующим образом: исходный углеводород → спирт (R – OH) → альдегид (R – CHO) → кислота (R – COOH) → газы.

Накопление живых и мертвых клеток микроорганизмов, а также продуктов их метаболизма снижает сопротивление сдвигу глинистых грунтов, модуль общей деформации и повышает способность к развитию пластических деформаций. Активная деятельность микроорганизмов в песках переводит их в состояние плывунов. Результатом полной биохимической деградации нефтяных углеводородов в восстановительной среде является генерация хорошо растворимых (сероводород, диоксид углерода) и малорастворимых газов (метан, азот, водород). Образование хорошо растворимых газов наряду с органическими кислотами повышает коррозионную агрессивность подземных вод, в свою очередь накопление малорастворимых газов приводит к значительному

DOI: 10.25515/PMI.2017.6.624

разуплотнению дисперсных грунтов. Процессы деградации песчано-глинистых грунтов значительно снижают их несущую способность в основании сооружений различного назначения. В связи с этим, была предложена структура комплексного инженерно-геологического мониторинга за состоянием компонентов подземного пространства в условиях углеводородного загрязнения, на анализе результатов которого возможно своевременное предупреждение перехода сооружения в предаварийное либо аварийное состояние.

При исследовании процессов контаминации подземной среды нефтепродуктами необходимо выполнить анализ форм миграции нефтепродуктов, их физико-химической, химической и биохимической трансформации в дисперсных грунтах различной степени водонасыщения. Кроме того, следует проследить влияние нефтепродуктов на активизацию микробной деятельности в подземной среде в зависимости от степени водонасыщения грунтов и их инженерно-геологических типов, выявить ее позитивную и негативную направленность.

Геотехнический и инженерно-геологический аспект заключается в оценке снижения несущей способности песчано-глинистых грунтов в основании сооружений различного назначения при комплексном воздействии изменения физико-химических условий и активизации деятельности микробиоты в подземной среде при их контаминации нефтепродуктами.

Решение сложной проблемы – последствия контаминации подземной среды нефтепродуктами – требует применения разнообразных методологических подходов. При этом необходимы: теоретический анализ форм миграции нефтепродуктов в грунтовой толще, особенностей их химической и биохимической трансформации в дисперсных грунтах с различной степенью водонасыщения: экспериментальные исследования влияния различных типов нефтепродуктов в зависимости от природы и полноты их деградации в подземной среде на состав, состояние и физико-механические свойства песчано-глинистых грунтов; изучение воздействия нефтепродукта (соляровое масла) на песчаные грунты в зонах аэрации и водонасыщения; расчетные методы для оценки и прогнозирования изменения несущей способности преобразованных песчано-глинистых грунтов в основании сооружений различного назначения.

Обсуждение результатов исследований. Более 90-95 % нефти составляют углеводороды четырех гомологических рядов: парафиновые (алканы), нафтеновые (циклоалканы), ароматические (арены) и гибридные – парафино-нафтено-ароматические. Общее число углеродных атомов в нефтяных углеводородах изменяется от C_1-C_4 (газы) до C_{60}. Кроме химического состава, различают и фракционный состав нефти, получаемый в результате ее перегонки (см. таблицу).

Основной фракционный состав нефти [2]

Фракции нефти	Основные соединения	Длина углеводородной цепи
Бензины	Парафины, нафтены, арены	C_3-C_{10}
Керосины	Парафины, нафтены, арены, непредельные углеводороды	C_{10}-C_{16}
Соляровые масла	Парафины, нафтены, арены	C_{17}-C_{25}
Мазуты	Высокомолекулярные парафины, полициклические арены, гибридные парафино-нафтено-ароматические углеводороды	$>C_{25}$

Преобразование и миграция нефтепродуктов в толще пород и подземных водах определяется их физическими и физико-химическими свойствами: плотностью, вязкостью, растворимостью в воде, способностью к сорбции на поверхности минеральных частиц и агрегатов, а также испаряемостью (температурой кипения). Основные физические свойства нефтепродуктов [4]:

	Бензины	Керосины	Соляровые масла	Мазут
Плотность, г/см^3	0,700-0,780	0,775-0,800	0,795-0,850	0,879-1,030
Вязкость, мм^2/с	0,66-0,80	1,05-1,5	2,5-8,0	296-1021
Растворимость в воде при T = 20 °С и атмосферном давлении, мг/дм^3	9-505	2-5	8-22	–
Температура кипения, °С	40-200	200-300	300-400	>400

В процессе миграции нефтяных углеводородов в подземных водах особое значение имеет их растворимость, которая связана с химическим составом и возрастает в следующем ряду: парафины – нафтены – ароматические углеводороды [4, 14]. В целом растворимость нефти и нефтепродуктов в воде варьирует в широких пределах [9].

DOI: 10.25515/PMI.2017.6.624

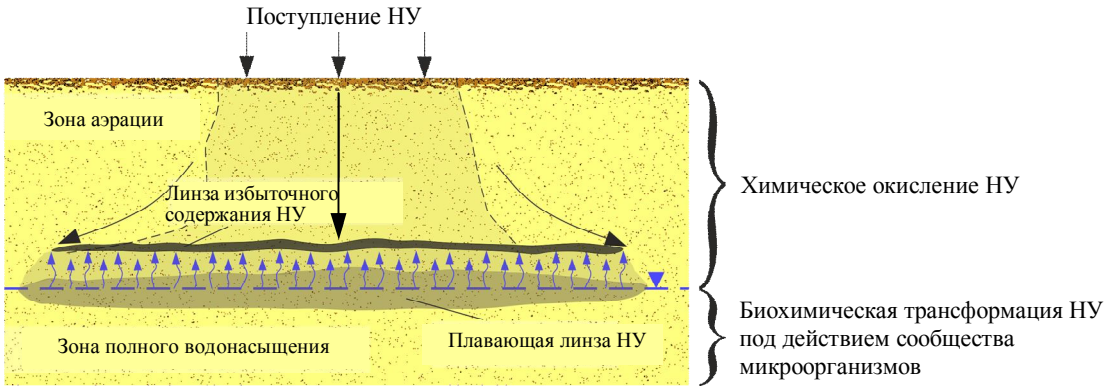


Рис.1. Схема основных процессов преобразования нефтяных углеводородов, поступающих в подземное пространство

При взаимодействии нефтяных углеводородов с толщей грунтов происходит их преобразование в результате химического окисления и биохимической деструкции при участии различных форм микроорганизмов (рис.1).

Продуктами химического окисления углеводородов являются спирты, альдегиды, кетоны, кислоты, смолы и пр., которые переходят в газообразное или растворенное состояние и продолжают миграцию по разрезу, либо накапливаются в трещинно-поровом пространстве грунтов и подвергаются дальнейшей трансформации при участии различных групп микроорганизмов в водонасыщенной среде.

Способностью к утилизации нефтяных углеводородов обладают различные группы микроорганизмов, развивающиеся как в кислородных (аэробных), так и бескислородных (анаэробных) условиях. Установлено, что микроорганизмы могут использовать практически все виды органического вещества от C_1 до полимеров. Микроорганизмы сравнительно легко утилизируют керосины (C_{10}-C_{16}) и соляровые масла (C_{16}-C_{25}), труднее – легкокипящие углеводороды с длиной цепи до C_8. Нафтеновые и полициклические ароматические соединения разлагаются только в соокислительных циклах в средах с богатым биоценозом. Гибридные полициклические соединения – мазут и другие, с длиной цепи C >25 усваиваются хуже [4, 5, 13, 16].

В процессе деградации углеводородов в грунтовой толще принимают участие как природные микроорганизмы, так и поступающие в составе нефтяных углеводородов, в том числе сульфатредуцирующие, железовосстанавливающие, бродильные бактерии, ацето- и метаногены и др. [1, 15]. Наличие в составе окисленных углеводородов полярных групп (–OH, –COOH, $–NO_2$ и др.) приводит к росту их сорбционной способности [10]. При рассмотрении сорбции нефтяных углеводородов сохранность структуры играет основную роль при взаимодействии с твердой поверхностью дисперсных частиц. Особенностью сорбции полиэлектролитов является ее необратимость. Рост дисперсности грунтов при переходе от грубозернистых песков к глинам в зоне аэрации приводит к увеличению сорбционной способности с 8 до 40 л/м^3 [4]. Наличие органической составляющей повышает сорбционную способность дисперсных грунтов по отношению к нефтяным углеводородам, особенно при содержании $C_{орг} \geq 1{,}2$ % [5].

Поступление нефтяных углеводородов в подземные воды изменяет направленность окислительно-восстановительных реакций. Для подземных вод значения окислительно-восстановительных потенциалов варьируют от +860 до –600 мВ. Значения окислительно-восстановительного потенциала подземных вод, содержащих нефтяные углеводороды, составляют +100 ÷ -350 мВ и в некоторых случаях могут снижаться до –400 ÷ –500 мВ [3, 7, 8]. Величина кислотно-щелочного потенциала (pH) подземных вод изменяется от 0 до 12, 5, но в большинстве случаев находится в пределах 6-8,5 [11]. Однако окисление природной органики и особенно образование органических кислот снижает pH до 5 и менее (по результатам определения в полевых условиях).

Для оценки влияния нефтяных углеводородов на песчаные грунты зоны аэрации были проведены лабораторные исследования воздушно-сухих песков с различным содержанием НУ (солярового масла) от 20 до 100 мг/кг. Выполненные эксперименты позволили оценить преобразование состава, состояния, водных и физико-механических свойств песков по мере повышения

DOI: 10.25515/PMI.2017.6.624

содержания углеводородов. Сорбция нефтяных углеводородов на воздушно-сухих песках сопровождается агрегированием частиц при формировании водородных связей в цепочечных структурах солярового масла (C_{16}-C_{25}). Образование агрегатов способствует повышению общей пористости и размеров пор, что вызывает рост полной влагоемкости (способности грунта вмещать только воду) и коэффициента фильтрации песков (рис.2, 3).

Появление окисленных углеводородов приводит к росту числа активных центров, что повышает гидрофильность песков, и соответственно, величину максимальной молекулярной влагоемкости (рис.4).

Уменьшение плотности скелета песчаных разностей связано с повышением их пористости и изменением вещественного состава за счет необратимой сорбции окисленных углеводородов (рис.5).

Наличие водородных связей, характеризующихся гибкостью в цепочечных структурах, обеспечивает ярко выраженную способность песков к развитию пластических деформаций, что проявляется при изучении их прочности в условиях длительных испытаний в одноплоскостных срезных приборах (рис.6).

Контаминация водонасыщенных песков нефтепродуктами приводит к активизации микробной деятельности за счет поступления питательных и энергетических субстратов, а также микроорганизмов, привнесенных с нефтяными углеводородами. Поскольку в водонасыщенных песках отсутствует сорбция НУ, основные процессы изменения состава, состояния и свойств песков будут связаны с активизацией микробиологической деятельности при наличии нефтяных углеводородов в подземных водах. Известно, что даже наиболее прочные бензольные кольца в ароматических углеводородах способны разрывать микробиологическим путем гидроксилирования.

Исследования кафедры гидрогеологии и инженерной геологии Горного университета водонасыщенных песчаных грунтов, содержащих в своем со-

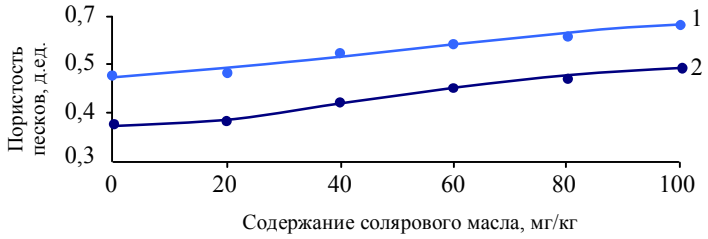


Рис.2. Изменение пористости песков в рыхлом (1) и плотном (2) сложении с различным содержанием солярового масла

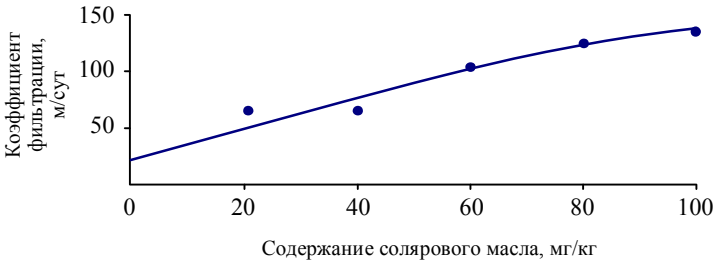


Рис.3. Изменение коэффициента фильтрации песков с различным содержанием солярового масла (при градиенте напора I = 3)

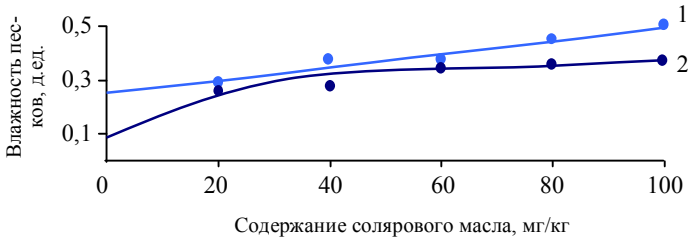


Рис.4. Изменение водоемкости $w_п$ (1) и максимальной молекулярной влагоемкости $w_{мм}$ (2) песков с различным содержанием солярового масла

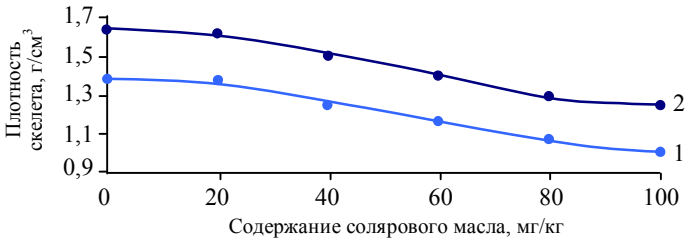


Рис.5. Изменение плотности скелета песков в рыхлом (1) и плотном (2) сложении с различным содержанием солярового масла

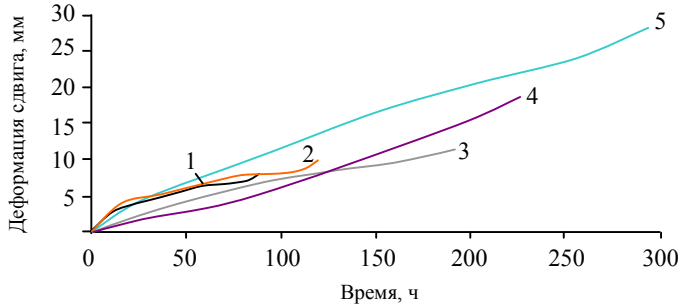


Рис.6. Характер развития деформаций сдвига воздушно-сухих песков с различным содержанием солярового масла (при нормальном давлении 0,15 МПа)
1 – 20; 2 – 40; 3 – 60; 4 – 80; 5 – 100 мг/кг

DOI: 10.25515/PMI.2017.6.624

ставе нефтяные углеводороды, показали, что среднезернистые песчаные разности перешли в пески с преобладанием в их составе мелко- и тонкозернистых фракций. В песках повысилась водоудерживающая способность $w_{мм}$ с 0,10 до 0,19 д.ед. и снизились водопроницаемость по сравнению с первоначальным значением $k_ф$ = 3 м/сут до 0,4 м/сут, а также углы внутреннего трения (≤1,2 град.). Как было установлено ранее, при содержании микробной массы более 40 мкг/г пески начинают проявлять плывунные свойства [5].

При наличии нефтяных углеводородов в грунтовых водах существенно повышаются все показатели, определяющие содержание органических соединений (перманганатная окисляемость, химическое потребление кислорода), а также активизируется деятельность микроорганизмов, что фиксируется по повышению величины биологического потребления кислорода $БПК_5$ в течение 5 дней. Генерация органических кислот микроорганизмами приводит к снижению pH до 4 и менее. Результаты исследований содержания органических соединений в воде: нефтепродукты – 55 мг/дм^3; перманганатная окисляемость – 390 мгO_2/дм^3; ХПК – 770 мгO_2/дм^3; $БПК_5$ – 310 мгO_2/дм^3; pH – 6,7 (в лабораторных условиях); pH – 3-4 (в полевых условиях).

Выполненные экспериментальные исследования состава, состояния и физико-механических свойств супесей и суглинков, озерно-морского (mIVlt), озерно-ледникового (lgIIIbl) и ледникового происхождения (gIIIos) в условиях высокой степени контаминации грунтовых вод НУ и микробной пораженности позволили выявить следующие закономерности: отсутствие цементационных связей в грунтах за счет гидрооксидов железа; низкие значения модуля общей деформации и сопротивления сдвигу по сравнению с инженерно-геологическими характеристиками тех же грунтов на незагрязненных территориях. Особенно большое воздействие углеводородное загрязнение оказывает на озерно-ледниковые и моренные отложения. Несмотря на устойчивые формы консистенции, такие морены проявляют выраженные пластические свойства при исследовании их механических свойств.

Выполненные микробиологические исследования глинистых грунтов в условиях контаминации нефтепродуктами позволили установить относительно высокую численность различных групп микроорганизмов (10^5-10^7 кл/г) – сапрофитов, аммонифицирующих, железовосстанавливающих, сульфатредуцирующих, тионовых и др., среди которых главенствующую роль занимают гетеротрофные формы микробиоты, в том числе генерирующие сероводород, который отчетливо фиксировался при опробовании скважин.

Повсеместно в песчано-глинистых грунтах по всей глубине скважины отмечались образования гидротроилита. Помимо бактериальных форм, было выявлено высокое содержание микромицетов, численность которых достигала 7000 КОЕ/1 г. В разрезе территории было установлено 18 видов грибных культур, большинство из которых относились к активным деструкторам нефтяных углеводородов и обладали агрессивностью по отношению к строительным материалам (*Aspergillus*, *Fusarium*, *Penicillium* и др.).

В практике проектирования и эксплуатации сооружений, предполагающих переработку, хранение и использование нефтяных углеводородов, оценка их длительной устойчивости и безопасности функционирования ведется без учета влияния контаминации дисперсных грунтов основания нефтяными углеводородами.

Наибольшее влияние на подземную среду за счет утечек оказывают резервуары для хранения нефтяных углеводородов, объем которых в настоящее время может достигать 200 000 м^3. При проектировании резервуаров предполагается, что изменение состояния и свойств дисперсных грунтов в основании происходит только под действием циклических нагрузок в процессе гидроиспытаний в первые годы их эксплуатации. Считается, что циклы «заполнение – отбор» углеводородов переводят грунты в «квазиупругое» состояние [12]. Комплексный анализ причины аварии мазутной емкости, разрушившейся по истечении 19,5 лет ее эксплуатации, показал, что продольный разрыв стенки резервуара произошел из-за развития больших и неравномерных деформаций основания за счет негативного изменения состояния и свойств песчано-глинистых грунтов при их загрязнении мазутом, активном развитии микробиоты, биохимическом газообразовании, способствующих переходу песчаных грунтов в состояние плывунов и глинистых отложений в пластичные разности [6]. Определение расчетного сопротивления песчано-глинистых грунтов основания позволило установить, что его величина в конце срока эксплуатации емкости стала значительно ниже действующего давления при полном заполнении емкости (p = 0,12 МПа):

DOI: 10.25515/PMI.2017.6.624

пески потеряли свою несущую способность, а величина расчетного сопротивления глинистых грунтов снизилась до 0,09 МПа. Крен резервуара произошел за счет выпора песков-плывунов и составил 0,027.

При проектировании сооружений на территориях, подверженных длительному углеводородному загрязнению, необходимо учитывать не только снижение несущей способности грунтов в основании сооружения при активизации микробиологической деятельности, газогенерации и переходе песчано-глинистых грунтов в группу неустойчивых, пластичных разностей с высоким содержанием органических соединений абиогенного и биогенного генезиса, но и формирование агрессивной среды по отношению к бетонным конструкциям. Прежде всего, это относится к буронабивным сваям, технология изготовления которых предполагает их твердение в толще грунтов. Если в составе подземных вод содержатся следы нефтепродуктов, перманганатная окисляемость превышает 15 мгO_2/дм^3, а значение pH < 4, то в подобной гидрохимической обстановке твердение бетонов на основе портландцемента происходить не будет. Указанные условия прослеживались в пределах разреза территории строительства жилого комплекса «Илматар», расположенного в юго-западной части Васильевского острова в пределах Косой и 26-й линий.

Выводы

1. Особенности преобразования и миграции нефтяных углеводородов в подземной среде, представляющих собой различные органические соединения с длиной углеродной цепи от C_1 до C_{60}, определяются их физическими и физико-химическими свойствами: плотностью, вязкостью, растворимостью в воде, испаряемостью, способностью к сорбции на поверхности минеральных частиц.

2. Трансформация нефтяных углеводородов в толще пород может происходить в результате химического окисления (зона аэрации) и биохимической деструкции при участии природных и привнесенных микроорганизмов (зона водонасыщения). Основными продуктами деградации нефтяных углеводородов под действием указанных процессов являются спирты, альдегиды, кислоты и газы.

3. Миграция нефтяных углеводородов в песчано-глинистых грунтах сопровождается их сорбцией, величина которой определяется гранулометрическим составом и влажностью грунтов, наличием органики. Увеличение дисперсности отложений, наряду с повышением содержания органической составляющей в зоне аэрации, приводит к росту сорбционной способности грунтов по отношению к нефтяным углеводородам, а повышение их влажности снижает активность такого взаимодействия.

4. Присутствие нефтяных углеводородов в составе водонасыщенных песчано-глинистых грунтов предопределяет изменение их окислительно-восстановительных (Eh ≤ 0 мВ) и кислотно-щелочных условий (pH<5) за счет микробной деятельности и образования метаболических кислот.

5. Сорбция нефтяных углеводородов на воздушно-сухих песках сопровождается агрегированием частиц при формировании водородных связей в цепочечных структурах углеводородов, увеличением общей пористости, ростом полной и максимальной молекулярной влагоемкости, повышением коэффициента фильтрации песков. Появление в составе песков органического компонента снижает значение плотности минеральной части, а наличие водородных связей в цепочечных структурах способствует появлению ярко выраженных пластических свойств песков в условиях длительных испытаний при определении сопротивления сдвигу.

6. Поступление нефтяных углеводородов как питательных и энергетических субстратов в водонасыщенные дисперсные грунты активизирует деятельность микроорганизмов, в первую очередь гетеротрофных форм, что негативно сказывается на состоянии грунтов, водопроницаемости песков и их водоотдаче, а также на показателях механических свойств: снижении углов внутреннего трения и сцепления, модуля общей деформации. Полная биохимическая деградация нефтяных углеводородов в восстановительной среде приводит к генерации различных газов – диоксида углерода, метана, сероводорода, азота, водорода.

7. При проектировании сооружений, в технологическом цикле которых предусматривается возможность утечек нефтяных углеводородов даже в малых количествах, прогнозирование их длительной устойчивости необходимо проводить на основе постепенного снижения несущей способности песчано-глинистых грунтов в основании. Анализ опыта аварий сооружений и результатов длительного мониторинга изменения состояния и свойств дисперсных грунтов дает возможность количественно оценить снижение их расчетного сопротивления до 50 % от первоначального значения для глинистых отложений, а для водонасыщенных песков возможна полная потеря их несущей способности за счет перехода в состояние плывунов при активизации микробной деятельности в условиях поступления нефтяных углеводородов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биометоды увеличения нефтеотдачи / Н.А.Еремин, Р.Р.Ибатуллин, Т.Н.Назина, А.А.Ситников. М.: РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 2003. 125 с.

2. *Бунчук В.А.* Транспорт и хранение нефти, нефтепродуктов и газа. М.: Недра, 1977, 366 с.

3. *Германов А.И.* Кислород подземных вод и его геохимическое значение // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1955. № 6. С. 70-81.

4. *Гольдберг В.М.* Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения / В.М.Гольдберг, С.Газда. М.: Недра,1984. 262 с.

5. *Дашко Р.Э.* Геотехника и подземная микробиота / Р.Э.Дашко, Д.Ю.Власов, А.В.Шидловская; ПИ «Георекострукция». СПб, 2014. 269 с.

6. *Дашко Р.Э.* Прогнозирование изменения несущей способности песчано-глинистых грунтов в процессе их контаминации нефтепродуктами / Р.Э.Дашко, И.Ю.Ланге // Записки Горного института. 2015. Т. 211. С. 16-21.

7. *Закутин В.П.* Окислительно-восстановительные состояния подземных вод / В.П.Закутин, В.А.Щека. М.: ВИЭМС, 1985. 53 с.

8. *Крайнов С.Р.* Гидрогеохимия / С.Р.Крайнов, В.М.Швец. М.: Недра, 1992. 463 с.

9. *Мироненко В.А.* Загрязнение подземных вод углеводородами / В.А.Мироненко, Н.С.Петров // Геоэкология. 1995. № 1. С. 3-27.

10. *Парфит Г.* Адсорбция из растворов на поверхностях твердых тел / Г.Парфит, К.Рочестер. М.: Мир, 1986. С. 488.

11. *Перельман А.И.* Геохимия. М.: Высшая школа, 1989. 528 с.

12. Фундаменты стальных резервуаров и деформации их оснований / П.А.Коновалов, Р.А.Мангушев, С.Н.Сотников и др. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009. 335 с.

13. *Cegelsky L.* Microbial Adhesion / L.Cegelsky, C.L.Smith, S.J.Hultgren // Desk Encyclopedia of Microbiology. Elsevier, 2010. P. 20-28.

14. *Fried I.I.* Groundwater pollution: theory, methodology, modeling and practical rules. Oxford – New York, 1975. P.330.

15. *Okolelova A.A.* Determination of Oil Products in Soil by Fractions / A.A.Okolelova, N.G.Kasterina, A.S.Merzlyakova // International Journal of Environmental Problems. 2005. Vol. 1. P. 49-58.

16. *O´Toole G.* Biofilm formation as microbial development / G.O´Toole, H.B.Kaplan, R.Kolter // Annu. Rev. Microbiol. 2000. Vol. 54. P.49-79.

***Авторы*: Р.Э.Дашко,** *д-р геол.-минерал. наук, профессор, regda2002@mail.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*), **И.Ю.Ланге,** *канд. геол.-минерал. наук, ассистент, langeivan@spmi.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*).

Статья принята к публикации 11.05.2017.