

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ В ПРОЦЕССЕ ИХ КОНТАМИНАЦИИ НЕФТЕПРОДУКТАМИ

**Р.Э.ДАШКО**, *д-р геол.-минерал. наук, профессор, regda2002@mail.ru*

**И.Ю.ЛАНГЕ**, *аспирант, langeivan@yandex.ru*

*Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия*

Рассмотрены основные источники поступления нефтяных углеводородов в грунтовую толщу. Показано влияние нефтепродуктов на активизацию жизнедеятельности форм микроорганизмов и биохимическую трансформацию этих контаминантов. Экспериментально исследовано изменение состава и свойств грунтов при микробиологической деградации нефтепродуктов. Проведен анализ разрушения резервуара – хранилища мазута. Приведены результаты определения количества различных групп микроорганизмов в грунтах и грунтовых водах в разрезе площадки размещения мазутохранилищ. Показана роль микробной деятельности в изменении несущей способности песчано-глинистых грунтов на конкретном примере.

**Ключевые слова:** контаминация, нефтяные углеводороды, микробиота, резервуар, несущая способность, песчано-глинистые грунты.

В условиях непрерывного роста и развития нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности возрастает роль контаминации природной среды нефтяными углеводородами (НУ), из которых по данным государственного доклада «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2011 году», около 47 % (5,1 млн т) приходится на твердые и жидкие углеводороды, поступающие в подземное пространство [2]. Поступление такого количества нефтепродуктов связано с авариями на сооружениях нефтяного комплекса, потерями нефтяных углеводородов на промышленных предприятиях, а также с утечками при их транспортировке и хранении.

Хранение нефтепродуктов осуществляется в горизонтальных или вертикальных металлических резервуарах различной глубины заложения, при этом объем утечек из них может достигать 2,5 т в год [4]. Основные причины утечек нефтепродуктов – нарушение целостности резервуаров за счет коррозии днища и стенок и изменения напряженно-деформированного состояния в металлических конструкциях при развитии неравномерных осадок грунтов основания.

В практике эксплуатации резервуаров для хранения нефтепродуктов предполагается, что изменение состояния и свойств грунтов в основании резервуаров происходит только под воздействием знакопеременного давления в первые годы их функционирования. Вместе с тем пренебрегают другими процессами, которые приводят к глубокой и негативной трансформации грунтов, одним из которых является контаминация грунтов основания нефтяными углеводородами, поступающими в грунтовую толщу в процессе эксплуатации резервуаров.

Ярким примером необходимости учета поступления нефтяных углеводородов в грунты основания емкостей для хранения нефтепродуктов при оценке их длительной устойчивости является авария мазутного резервуара объемом 1000 м<sup>3</sup>, расположенного в пределах левого притока р. Невы. Разрушение емкости произошло в результате неравномерности деформаций грунтов основания сооружения, что привело к возникновению его недопусти-

мого крена (0,33 м) и разрыву стенки резервуара в вертикальном направлении. Это, в свою очередь, привело к разливу нефтепродуктов и последующему загрязнению речных вод.

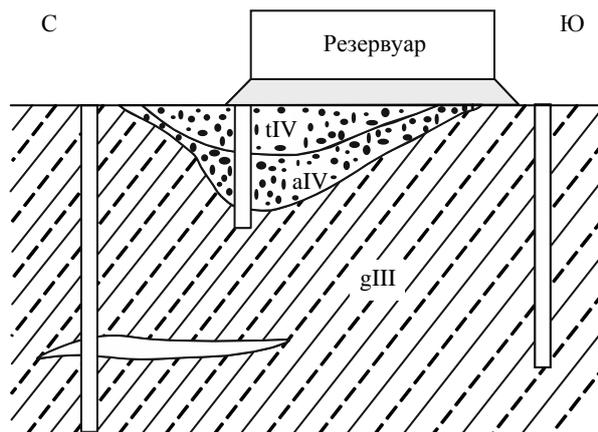
Стоит отметить, что в разрезе основания резервуара до начала эксплуатации отсутствовали слабые сильно сжимаемые грунты. Кроме того, емкость успешно функционировала в течение 20 лет, грунты претерпели несколько десятков циклов загрузки и разгрузки, что привело к переходу грунтов в квазиупругое состояние и стабилизации их деформаций. Однако динамика и развитие осадки емкости свидетельствовали о том, что происходит процесс постепенного роста деформаций, хотя их абсолютная и относительная величины были далеки от критических значений.

Аварийный резервуар размещался в пределах левого притока р. Невы, который был отведен. Разрез основания аварийной емкости был представлен разнозернистыми техногенными и аллювиальными песками, а также моренными суглинками и характеризовался резкой литологической неоднородностью – выклиниванием песчаных отложений в южном направлении (см. рисунок).

Исследование грунтов в основании аварийного резервуара, в том числе бурение семи скважин, позволило выполнить сравнительную оценку изменения состава и физико-механических свойств грунтов до начала эксплуатации емкости и после ее перехода в аварийное состояние. Оценка показала, что произошло негативное изменение гранулометрического состава и свойств грунтов несущего слоя – техногенных и речных песков, а также глинистых моренных отложений. Так, в песках, залегающих в разрезе северной части основания аварийного резервуара, было зафиксировано высокое количество фракций менее 0,1 мм (54 %), что в несколько раз превышало их содержание на момент начала эксплуатации резервуара (15-20 %). Наряду с этим отмечалось значительное разрыхление песков, коэффициент относительной плотности которых снизился от 0,63-0,60 до 0,16-0,05 (весьма рыхлое состояние). Результаты лабораторных исследований показали высокую величину максимальной молекулярной влагоемкости (0,19) и значительный начальный градиент напора ( $I_n > 5$ ), при котором начинается фильтрация воды через пески, что связано с повышенной дисперсностью грунтов и наличием в них микробной составляющей, которая сорбируется на песчаных частицах.

Стоит отметить, что в практике изучения песков сходного гранулометрического состава и плотности значение максимальной молекулярной влагоемкости не превышает 0,1, а коэффициент фильтрации составляет 1-2 м/сут и более. Весьма низкие показатели физико-механических свойств были получены для моренных отложений, распространенных в южной части основания мазутной емкости (табл.1). В инженерно-геологической практике для указанных отложений характерно варьирование естественной влажности в пределах 0,08-0,14 д.е., наличие твердой и полутвердой консистенции ( $I_L < 0,25$ ), изменение параметров прочности – сцепления 0,15-0,32 МПа и угла внутреннего трения 15-25°. Модуль общей деформации таких моренных отложений варьирует в пределах 40-50 МПа.

Из табл.1 видно, что моренные грунты в зоне основания резервуара имеют мягко- и тугопластичную консистенцию и характеризуются достаточно низкими параметрами прочности (сцепление 0,02-0,04 МПа, угол внутреннего трения 4-10 град.) и модулем общей деформации 0,3-1,5 МПа.



Схематический разрез грунтов основания аварийного резервуара

gIII – моренные суглинки, aIV – аллювиальный песок, tIV – техногенный разнозернистый песок

Некоторые показатели физико-механических свойств моренных грунтов

Место отбора	Консистенция	Естественная влажность	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Влажность на пределе текучести	Модуль общей деформации, МПа	Параметры прочности	
						Сцепление, МПа	Угол внутреннего трения, град.
Зона резервуара	Тугопластичная	Единичные определения			1,5*	0,04***	10***
	Мягкопластичная	0,15-0,20/0,18	2,07-2,17/2,14	0,19-0,25/0,22	0,3-0,5***	0,022***	4***
Вне зоны резервуара	Полутвердая и тугопластичная	0,15-0,17/0,16	2,06-2,18/2,14	0,21-0,27/0,24	9,7-14,9/12,3*	0,012-0,06**	27**
		0,14-0,17/0,16	2,14-2,23/2,18	0,18-0,21/0,19	6,2-9,9/7,9*	0,09***	15-20***
						0,023**	23**
						0,035***	11***

\* Результаты компрессионных испытаний.

\*\* Результаты испытаний по схеме КД в срезных приборах.

\*\*\* Результаты испытаний в стабилометре по схеме НН.

Ухудшение свойств грунтов в основании аварийного резервуара при условии его длительной эксплуатации (20 лет), предполагающей улучшение деформационной и несущей способности грунтов за счет действия циклических нагрузок, связано с особенностями расположения и функционирования мазутной емкости:

- наличие болотных отложений в пределах площадки мазутохранилища с существованием активного природного биоценоза;
- гидродинамическая обстановка – высокий уровень грунтовых вод, малые градиенты напора, относительно невысокие коэффициенты фильтрации, небольшие скорости движения грунтовых вод с формированием на отдельных участках застойных режимов;
- нагревание грунтов и подземных вод при поддержании мазута в состоянии вязкой жидкости до температуры 25-35 °С;
- контаминация грунтов мазутом при его перекачке из цистерн железнодорожного транспорта в емкости и котельные.

Наличие указанных факторов способствовало активизации микробиологической жизни. Известно, что нефтепродукты представляют собой питательный и энергетический субстрат, необходимый для жизнедеятельности микробиоты, при этом процесс биодegradации нефтепродуктов определяется особенностями их состава и метаболизма микроорганизмов, утилизирующих данные углеводороды [1]. К утилизируемым микроорганизмами углеводородам относятся керосины (C<sub>12</sub>-C<sub>15</sub>) и соляровые масла (C<sub>16</sub>-C<sub>25</sub>). Углеводороды, имеющие короткоцепочечную структуру (до C<sub>12</sub>), а также полициклические гибридные соединения – мазут и др., с длиной цепи > C<sub>25</sub> усваиваются хуже. Кроме того, для развития биотической компоненты необходим определенный рН водной среды (6-9), что и было зафиксировано в данных условиях. Особую роль играет и температура, значение которой в интервале 25-35 °С является оптимальным для развития мезофильных форм микробиоты – самой распространенной группы микроорганизмов.

Доказательством активизации микробной деятельности могут служить результаты определений величины микробной массы (ММ) по содержанию микробного белка – метод Бредфорда (табл.2), а также оценка численности различных физиологических групп микроорганизмов – метод десятикратных разведений и посева на селективные среды (табл.3).

Как видно из табл.2 и 3, активизация микробиологической деятельности сопровождается ростом величины микробной массы (с 69 до 133 мкг/г), а также численности различных физиологических групп микроорганизмов (до 10<sup>6</sup>-10<sup>7</sup> кл/1 г). Это выражается в увеличении числен-

ности живых и мертвых клеток микробиоты, а также продуктов их метаболизма, которые сорбируются на поверхности минеральных зерен грунтов, образуя бактериальные пленки, формирование которых приводит к резкому снижению трения и сцепления грунтов. Среди продуктов метаболизма микроорганизмов, помимо ферментов, большое значение имеют различные минеральные и органические кислоты, биогенные щелочи, а также газы, оказывающие существенное влияние на изменение состава и свойств дисперсных грунтов [3].

Таблица 2

**Содержание микробной массы в грунтах разреза**

Место отбора	Интервалы глубин, м	Тип грунта	Содержание ММ, мкг/г	Примечание
Вне зоны влияния мазутохранилищ	0,7-2,5	Супеси и суглинки	30,0-36,0/33,0*	Выше уровня грунтовых вод (аэробные условия – окислительная обстановка)
	3,0-4,5	Суглинки и супеси	36,0-69,0/53,0	Выше уровня грунтовых вод (переходная зона от аэробных к анаэробным условиям)
	5,0-10,0	Суглинки	69,0-112,0/92,0	Анаэробные условия – восстановительная обстановка
В основании аварийного резервуара	1,2-4,2	Суглинки и супеси	41,0-88,0/58,0	Аэробные и переходные условия к анаэробным
	4,8-10,0	Суглинки и супеси	76,0-133,0/104,0	Анаэробные условия – восстановительная обстановка

\* В числителе минимальная-максимальная величина ММ, в знаменателе – среднее значение мкг на 1 г сухого грунта.

Таблица 3

**Физиологические группы микроорганизмов и их численность в разрезе площадки размещения мазутохранилищ\***

Место отбора	Глубина отбора пробы, м	Сапрофиты	Сульфат-редуцирующие	Денитрифицирующие	Метан-образующие	Водород-образующие	Углеродородоксиляющие	
							соляро-окисляющие	мазутокисляющие
Суглинки и супеси								
Фон	0,4	10 <sup>6</sup>	10	10 <sup>4</sup>	**	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	**
	2,0	10 <sup>6</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>4</sup>	0	10 <sup>4</sup>	10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup>
Зона резервуара	0,5	10 <sup>7</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	**	10 <sup>4</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>
	1,0	10 <sup>6</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup>	**	10 <sup>2</sup>	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>
	4,0	10 <sup>3</sup>	**	**	0	**	10	10 <sup>2</sup>
Грунтовая вода								
Фон	0,4	10 <sup>5</sup>	0	–	0	10 <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup>	10
Зона резервуара	1,2	10 <sup>4</sup>	10 <sup>5</sup>	10 <sup>3</sup>	0	10 <sup>2</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>2</sup>

\* Количество клеток на 1 г грунта естественной влажности.

\*\* Единичные клетки.

Определение состава газовой смеси, образующейся в толще грунтов мазутохранилища, проводилось в полевых условиях с определением таких соединений как N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и его гомологов (табл.4).

Анализ газовой смеси в пробуренных скважинах показал, что по истечении 1,5 мес. в ее составе преобладали малорастворимые газы – метан и его гомологи, водо-

род, азот, содержание увеличивалось в пять раз по сравнению с пробами, отобранными в первые дни наблюдений за газогенерацией. Значительно возросло содержание биохимического газа с 35,26 до 95,24 %. Образование указанных газов по данным многочисленных исследований способствует возникновению газодинамического давления и разуплотнению дисперсных грунтов, в том числе переходу песков и супесей в состояние плывунов и т.д.

Таблица 4

Состав газозудной смеси, отобранной из скважин на территории мазутохранилища

Место отбора	Объемный состав газа, %						
	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Фон	5,39	0,009	0,0	0,0	0,0	0,0	94,6
В 10 м западнее от зоны резервуара	2,73	79,35	0,057	0,039	0,002	0,03	17,79

Таким образом, пример аварии резервуара для хранения мазута показал, что при решении вопросов изменения несущей способности песчано-глинистых грунтов необходим учет возможности активизации микробиологической деятельности, которая при наличии определенных условий – существовании природного биоценоза за счет наличия аллювиальных и болотных отложений, постепенного углеводородного загрязнения, подогрева грунтов оказывает большое влияние на изменение состава и свойств дисперсных грунтов, что приводит к изменению их несущей способности. В рассмотренном примере активизация микробиологической деятельности привела к снижению водо- и газопроницаемости грунтов за счет постепенного накопления микропузырьков малорастворимого газа и увеличения содержания тонких фракций, что ускорило переход песчаных грунтов в состояние «тяжелой» жидкости. Формирование плавунных свойств песков в основании мазутного резервуара наряду с быстрым увеличением давления, созданного при его заполнении, привело к недопустимому крену, в результате чего неравномерность деформаций превысила допустимые значения и послужила причиной разрушения резервуара.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дашко Р.Э. Геотехника и подземная микробиота / Р.Э.Дашко, Д.Ю.Власов, А.В.Шидловская. СПб: Изд-во «ПИ Георекострукция», 2014. 280 с.
2. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2011 году: государственный доклад. М.: Минприроды России, 2012.
3. Радина В.В. Роль микроорганизмов в формировании свойств грунтов и их напряженного состояния // Гидротехническое строительство. 1973. № 9.
4. Экология нефтегазового комплекса / Под общ. ред. А.И.Владимирова, В.В.Ремизова. М.: Нефть и газ, 2003. Т.1. 415 с.

#### REFERENCES

1. Dashko R.E., Vlasov D.Ju., Shidlovskaja A.V. Geotechnika i podzemnaja mikrobiota (*Geotechnics and subsurface microbiota*). St Petersburg: Izd-vo «PI Georekstrukcija», 2014, p.280.
2. O sostojanii i ob ohrane okruzhajushhej sredy Rossijskoj Federacii v 2011 godu: gosudarstvennyj doklad (*On the state of the Russian Federation environment in 2011 and its protection: govern. report*). Moscow: Minprirody Rossii, 2012.
3. Radina V.V. Rol' mikroorganizmov v formirovanii svojstv gruntov i ih naprjazhennogo sostojanija (*Role of microorganisms in the formation of soil properties and their stress pattern*). Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo. 1973. N 9.
4. Jekologija neftegazovogo kompleksa (*Ecology of Oil and Gas Complex*). Edited by A.I.Vladimirova, V.V.Remizova. Moscow: Neft' i gaz, 2003. Vol.1, p.415.

---

---

## FORECASTING BEARING CAPACITY CHANGE OF SANDY-ARGILLACEOUS SOILS IN COURSE OF THEIR CONTAMINATION BY OIL-PRODUCTS

**R.E.DASHKO**, *Dr. of Geological and Mineral Sciences, Professor, regda2002@mail.ru*

**I.Y.LANGE**, *post-graduate student, langeivan@yandex.ru*

*National Mineral Resources University (Mining University), St Petersburg, Russia*

The paper deals with the main petroleum hydrocarbon sources in the earth cover. Oil products influence on intensification of different microbial forms activity as well as on biochemical transformation of the pollutants themselves is shown. Changes in state and properties of soils due to microbial degradation of oil products are experimentally studied. The analysis of reservoir destruction through the example of black oil fuel storage is carried out. Results of determining different groups of microorganisms in soils and groundwater in the fuel oil storage tank area cross-section are given. The role of microbial activity in bearing capacity change of sandy-argillaceous soils with specific reference is presented.

**Key words:** contamination, petroleum hydrocarbons, microbiota, reservoir, bearing capacity, sandy-argillaceous soils.