

УДК 622.323:504

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ ПО РАЗРЕЗУ ГРУНТОВОГО МАССИВА

Красильников П.А., Середин В.В., Леонович М.Ф.

ФГБОУ ВПО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»,
Пермь, e-mail: kafedra.ingeo@gmail.com

При аварийных утечках нефти углеводороды оказывают негативное влияние не только на жизнедеятельность биоты, но и на свойства грунтов, являющихся основанием инженерных сооружений. Для выбора эффективных способов рекультивации почв, а также контроля изменения свойств грунтов необходимы знания по прогнозу глубины и степени загрязнения грунтов углеводородами. Данной проблеме посвящена эта работа. Скорость проникновения моторного масла в грунтовый массив контролируется номенклатурой грунтов. В глинистых грунтах наблюдается наименьшая скорость фильтрации углеводородов, в песках мелких она возрастает и в песках средней крупности достигает максимальных значений. Установлено, что скорость фильтрации масла машинного зависит от времени загрязнения. С увеличением времени нефтяного воздействия на грунт скорости фильтрации моторного масла закономерно уменьшаются, о чем свидетельствуют отрицательные значения коэффициентов парной корреляции между временем и скоростью проникновения углеводородов. Рассчитаны математические модели для прогноза скорости загрязнения в зависимости от времени техногенной нагрузки на грунт.

Ключевые слова: грунт, песок, глина, углеводородное загрязнение, инженерная геология, геоэкология

INVESTIGATION OF THE DISTRIBUTION OF HYDROCARBONS TO CUT THE SOIL MASS

Krasilnikov P.A., Seredin V.V., Leonovich M.F.

Perm State National Research University, National research, Perm, e-mail: kafedra.ingeo@gmail.com

When you spill oil hydrocarbons have a negative impact not only on the vital activity of the biota, but also to changes in soil properties, which are the basis of engineering structures. To select effective ways to land reclamation, as well as monitoring the change of soil properties requires knowledge projected depth and extent of soil contamination by hydrocarbons. This problem is addressed in this work. Penetration rate of engine oil into the ground array is controlled by the nomenclature of soils. In clay soils observed the lowest rate of filtration of hydrocarbons, fine sand and it grows in the sands of medium size reaches the maximum value. Found that the rate of oil filtration machine time-dependent contamination. With increasing time of exposure of oil to the ground speed of the engine oil filter naturally decreases, as evidenced by the negative values of the correlation coefficients between the paired time and penetration rate of hydrocarbons. Calculated mathematical models for the prediction of the rate of contamination depending on the time of anthropogenic impact on the ground.

Keywords: ground, sand, clay, hydrocarbon pollution, engineering geology, geoecology

С увеличением объемов и расширением масштабов добычи, транспортировки, переработки и использования нефти и нефтепродуктов возросла и проблема, связанная с загрязнением природной среды [3, 6, 13]. При аварийных утечках нефти углеводороды оказывают негативное влияние не только на жизнедеятельность биоты, но и на изменение свойств грунтов [2, 6, 8, 12, 13], являющихся основанием инженерных сооружений. Для выбора эффективных способов рекультивации почв [1, 4], а также контроля изменения свойств грунтов необходимы знания по прогнозу глубины и степени загрязнения грунтов углеводородами. Данной проблеме посвящен ряд работ по экспериментальному моделированию загрязнения геологической среды [1, 9] и изучению закономерностей распределения УВ [5, 11]. Полученная информация имеет ограниченное применение, так как грунты и почвы имеют сложный со-

став, различные состояния и свойства. Для повышения точности и надежности прогноза изменения их свойств требуется значительное расширение объема экспериментальных исследований. Поэтому целью настоящей работы является изучение особенностей распределения углеводородов по разрезу грунтовой толщи.

Материалы и методы исследований

В пластиковые прозрачные цилиндры диаметром 5 см с рабочей высотой около 55 см насыпан раздельно песок средней крупности, мелкий песок и монтмориллонитовая глина. Грунт находился в воздушно-сухом состоянии. Песок был предварительно просеян, промыт, высушен в печи при температуре 105°C и снова просеян. В донной части цилиндров просверлены по 4 дренажных отверстия диаметром 3 мм и одному центральному отверстию диаметром 8,5 мм для штока (для выдавливания грунта из цилиндра по окончании эксперимента). На дно цилиндров уложены жесткая шайба (поршень), перфорированная

дренажными отверстиями диаметром 1,5 мм, а сверху на нее помещена прокладка из фильтровальной бумаги.

Грунт был уплотнен путем постукивания по стенкам цилиндра снизу вверх по всему периметру под статической нагрузкой в 0,007 МПа до полной стабилизации процесса осадка песка. В качестве углеводородов использовано моторное масло ЛУКОЙЛ «Мото2Т». Цилиндры сверху были закрыты пленкой, perforированной мелкими отверстиями. Параметры эксперимента приведены в табл. 1.

Измерения глубины проникновения масла в грунт проводились с помощью мерной линейки по масляному следу, оставляемому в грунте и на стенках цилиндров, с периодичностью от 1 до 10 раз в сутки с фиксацией времени наблюдений.

Анализ результатов показывает, что наиболее интенсивная фильтрация масла наблюдалась в первые сутки и особенно в первые часы эксперимента. Наибольшая скорость проникновения масла в грунт зафиксирована для песка средней крупности. Она составила 51 мм за первый час и снизилась до 17 мм/ч к пятому часу эксперимента, т.е. в три раза. Аналогичная картина наблюдалась и в цилиндре с мелким песком. Процесс проникновения масла в глинистый

грунт протекал менее интенсивно, более спокойно и стабильно. Скорости фильтрации масла в глине и песке отличались друг от друга в первые сутки практически на порядок, на десятые сутки – в 2–3 раза, а через месяц – в 1,5–2 раза. Однако в абсолютном выражении разница в суточной скорости фильтрации масла в песке и глине на тридцатые сутки составила лишь 1–2 мм/ч.

Результаты исследований и их обсуждение

Результаты измерений глубины проникновения масла в грунты во времени приведены на рис. 1.

Для установления скорости фильтрации от времени загрязнения грунтов маслом моторным проведен вероятностно-статистический анализ результатов экспериментов [10]. Следует отметить, что в расчетах исключены данные по скоростям фильтрации в первые сутки загрязнения грунтов углеводородами. Результаты корреляционного анализа приведены в табл. 2.

Таблица 1

Параметры эксперимента

Параметры	Песок средней крупности	Песок мелкий	Глина монтмориллонитовая
Вес цилиндра, г	399,7	398,4	394,9
Вес грунта, г	1660	1530	1341
Объем грунта, мл (г)	1000	1000	1000
Плотность грунта, г/см ³ – насыпная	1,46	1,39	0,99
Плотность грунта, г/см ³ – после уплотнения	1,66	1,53	1,34
Влажность грунта, %	0,3	0,5	5,6
Высота грунта в цилиндре, мм	540	540	540
Высота слоя масла моторного на грунте, см	5	5	5
Вес масла моторного, г	89	89	89
Температура окружающей среды, °С	+17...(±22)	+17...(±22)	+ 17...(±22)

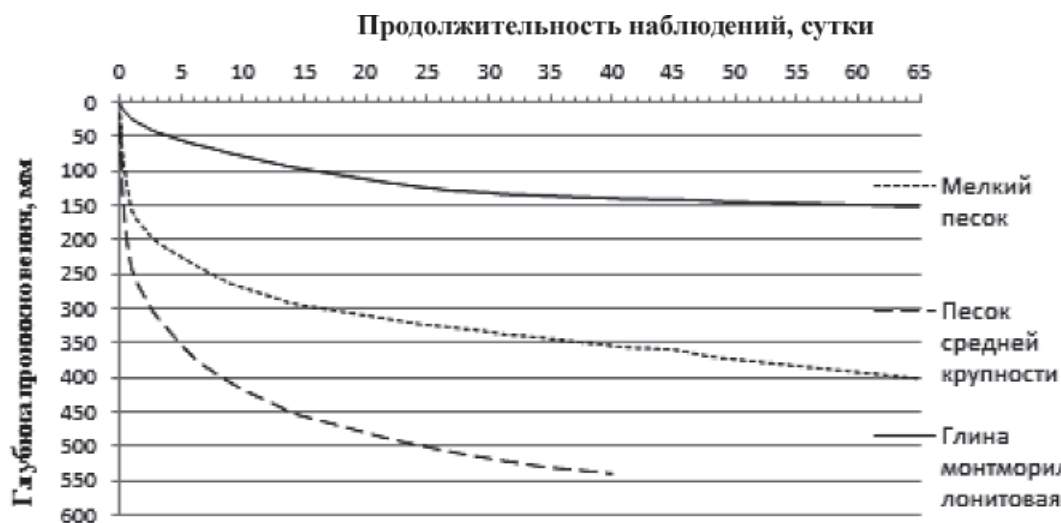


Рис. 1. Изменение глубины проникновения масла в песок средней крупности во времени

Из табл. 2 видно, что с увеличением времени нефтяного воздействия на грунт скорости фильтрации моторного масла закономерно уменьшаются, о чем свидетельствуют отрицательные значения коэффициентов парной корреляции между временем и скоростью проникновения УВ.

Анализ коэффициентов корреляции (табл. 2) показывает, что численные значения r выше, чем критические $r_{\kappa} = 0,50$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $\kappa = 14$. Это свидетельствует о том, что между исследуемыми признаками существуют статистические связи.

рис. 2. Анализ их показывает, что в песке средней крупности концентрация масла до глубины 140–150 мм остается постоянной, незначительно возрастает до глубины 480–490 мм, а затем наблюдается резкий рост концентрации (на дне цилиндра).

Этот вид распределения УВ можно объяснить следующим образом. В верхней части цилиндра процесс фильтрации масла завершился. Концентрация масла в грунте определяется величиной его поверхностной энергии, зависящей от удельной поверхности грунта.

Таблица 2

Результаты расчетов коэффициентов корреляции в грунтах, подверженных нефтяному загрязнению

	Время, сут.	Скорость фильтрации		
		песок средней крупности	песок мелкий	глина
Время, сут	1			
Скорость фильтрации в песке средней крупности, мм/сут	–0,82	1		
Скорость фильтрации в песке мелком, мм/сут	–0,85	0,99	1	
Скорость фильтрации в глинах, мм/сут	–0,92	0,96	0,97	1

Далее использован регрессионный анализ [10], который позволил рассчитать математические модели для прогноза скорости (V) загрязнения в зависимости от времени техногенной нагрузки на грунт.

Для песка средней крупности уравнение имеет вид

$$V_{\text{п.с.с}} = 24,0391 - 0,7733 \cdot t,$$

где $V_{\text{п.с.с}}$ – скорость фильтрации масла в песках сухой средней крупности, мм/сут; t – время фильтрации, сут.

Для песка мелкого уравнение имеет вид

$$V_{\text{п.м.с}} = 16,5558 - 0,5321 \cdot t,$$

где $V_{\text{п.м.с}}$ – скорость фильтрации масла в песках мелких, мм/сут; t – время фильтрации, сут.

Для глины уравнение имеет вид

$$V_{\text{г.с}} = 8,101 - 0,2309 \cdot t,$$

где $V_{\text{г.с}}$ – скорость фильтрации масла в глинах, мм/сут; t – время фильтрации, сут.

На 65-е сутки эксперимент был прекращен. С помощью штока и шайбы-поршня грунт был порционно вытеснен из цилиндров, отобран и передан для химического анализа с целью определения содержания масла в грунте по разрезу.

Результаты измерений содержания масла в грунте по разрезу приведены на

Повышенная концентрация масла в грунте на участке ниже глубины 140 мм связана с незавершенностью процесса фильтрации, а в районе дна цилиндра – с проявлением капиллярных свойств.

Дополнительные исследования показали, что капиллярная маслоемкость песка средней крупности составляет 19–19,5%. В нашем эксперименте в нижнем слое грунта зафиксировано содержание масла на уровне 10%. Это свидетельствует о том, что вышеописанная зона является переходной к зоне капиллярной маслоемкости.

Аналогичная картина распределения содержания масла наблюдается и в мелком песке. Процесс фильтрации масла здесь завершился на отрезке до глубины 70–75 мм. Дальнейшее повышение концентрации масла в песке с увеличением глубины объясняется также незавершенностью процесса фильтрации, который в мелком песке протекает значительно медленней, чем в песке средней крупности.

Фильтрация масла в сухом грунте сопровождается расходом его на взаимодействие с частицами грунта. При этом объем свободного несвязанного масла постоянно уменьшается. Интенсивность его расходования (расход масла на 1 см³ грунта) будет зависеть от суммарной площади по-

верхности всех частиц грунта в единице объема. Как известно, наибольшими значениями суммарной площади поверхности частиц обладают мелкодисперсные грунты. В нашем случае это – глина. Высокое содержание масла в верхнем слое глины и резкое снижение его на глубине указывают, прежде всего, на недостаточность объема масла и времени проведения данного эксперимента.

ном значении содержания масла на уровне 17000–20000 мг/кг (17–20%).

Выводы

Скорость проникновения моторного масла в грунтовый массив контролируется номенклатурой грунтов. В глинистых грунтах наблюдается наименьшая скорость фильтрации углеводородов, в песках

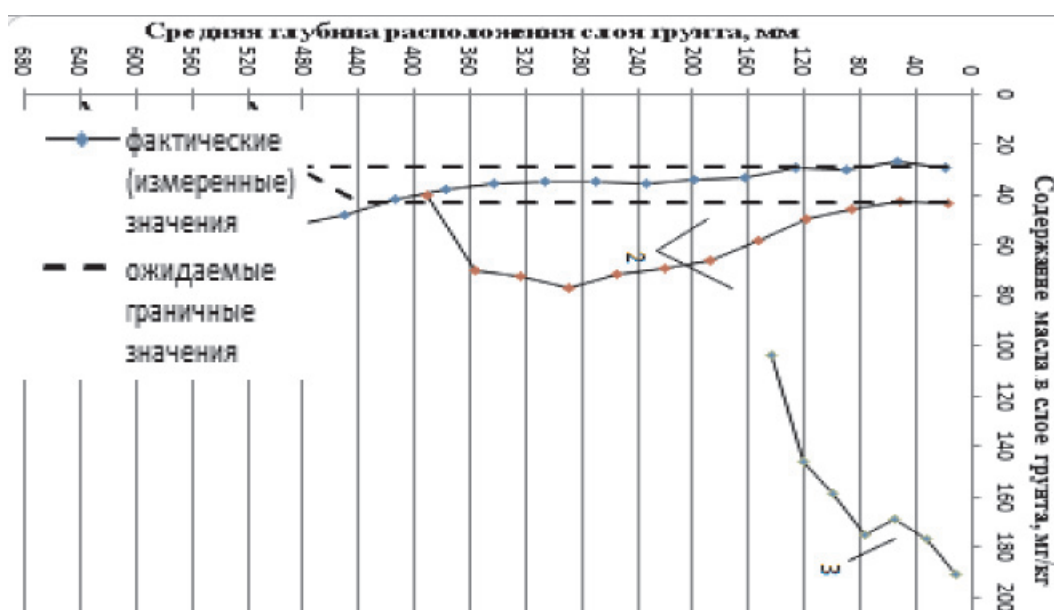


Рис. 2. Изменение содержания масла в грунтах по разрезу: 1 – песок средней крупности; 2 – мелкий песок; 3 – глина монтмориллонитовая

Для получения завершенной картины фильтрации масла в сухой глине и оценки «устоявшихся» граничных значений концентрации в ней масла следует повторить данный эксперимент при увеличении объема масла до 200–300 мл и продолжительности наблюдений до полугода. Так как на момент завершения эксперимента еще наблюдалась некоторая фильтрация масла в грунте, наиболее реальными граничными значениями содержания масла (для данной вязкости масла ЛУКОЙЛ «Мото 2Т», температуры воздуха и прочих условий эксперимента) следует считать содержание его в верхних слоях грунта по разрезу: для песка средней крупности – 27000–30000 мг/кг (2,7–3,0%), для мелкого песка – 42000–45000 мг/кг (4,2–4,5%).

При этом ожидаемое распределение содержания масла по глубине в песке мелкой и средней крупности при полном завершении процесса фильтрации будет предположительно иметь вид, представленный на рис. 2. Аналогичного распределения, вероятно, следует ожидать и для глины монтмориллонитового состава при гранич-

мелких она возрастает и в песках средней крупности достигает максимальных значений. Установлено, что скорость фильтрации масла машинного зависит от времени загрязнения. С увеличением времени нефтяного воздействия на грунт скорости фильтрации моторного масла закономерно уменьшаются, о чем свидетельствуют отрицательные значения коэффициентов парной корреляции между временем и скоростью проникновения УВ.

Анализ коэффициентов корреляции (табл. 2) показывает, что численные значения r выше, чем критические $r_k = 0,50$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $k = 14$. Это свидетельствует о том, что между исследуемыми признаками существуют статистические связи.

Рассчитаны математические модели для прогноза скорости (V) загрязнения в зависимости от времени техногенной нагрузки на грунт.

Установлены взаимосвязи между концентрацией масла в грунте и глубиной отбора проб. В песке средней крупности концентрация масла до глубины 140–150 мм

остается постоянной, незначительно возрастает до глубины 480–490 мм, а затем наблюдается рост концентрации (на дне цилиндра).

Данный вид распределения УВ можно объяснить следующим образом. В верхней части цилиндра процесс фильтрации масла завершился. Концентрация масла в грунте определяется величиной его поверхностной энергии, зависящей от удельной поверхности грунта.

На участке ниже глубины 140 мм повышенная концентрация масла в грунте связана с незавершенностью процесса фильтрации, а в районе дна цилиндра – с проявлением капиллярных свойств грунта.

Список литературы

1. Галкин В.И., Середин В.В., Бачурин В.А. Применение вероятностно-статистических моделей при изучении распределения углеводородов в грунтах и выборе технологий их санации. – Пермь: РИО ПГТУ, 1999. – 140 с.
2. 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. – № 11. – С. 164–165.
3. Круподеров И.В., Мосейкин В.В. Моделирование углеводородного загрязнения геологической среды на территории Воронежской нефтебазы ОАО «Воронежнефтепродукт» // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 11. – С. 273–281.
4. Кузнецов Ф.М., Козлов А.П., Середин В.В., Пименова Е.В. Рекультивация нефтезагрязненных почв: учебное пособие. – Пермь, 2003. – 196 с.
5. Середин В.В. Математические методы в гидрогеологии и инженерной геологии: курс лекций; М-во образования и науки Российской Федерации, гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «Пермский гос. ун-т», каф. инженерной геологии и охраны недр. – Пермь, 2011. – 122 с.
6. Середин В.В. Оценка геоэкологических условий санации территорий, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. – Пермь: РИО ПГТУ, 1998. – 153 с.
7. Середин В.В. Исследование влияния вязкости поровой жидкости (углеводородов) на прочностные свойства песков // Инженерная геология. – 2014. – № 4. – С. 45–48.
8. Середин В.В. Исследование пространственного распределения углеводородов в почвогрунтах и водах на территориях, загрязненных нефтью и нефтепродуктами. – Пермь: РИО ПГТУ, 1998. – 110 с.
9. Середин В.В. Исследование температуры пород в зоне трещины разрушения // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 9–12. – С. 2713–2717.
10. Середин В.В. К вопросу о прочности засоленных глинистых грунтов // Инженерная геология. – 2014. – № 1. – С. 66–69.
11. Середин В.В., Ядзинская М.Р. Закономерности изменения прочностных свойств глинистых грунтов, загрязненных нефтепродуктами // Инженерная геология. – 2014. – № 2. – С. 26–32.
12. Середин В.В., Ядзинская М.Р. Исследование механизма агрегации частиц в глинистых грунтах при загрязнении их углеводородами // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8 (Часть 6). – С. 1408–1412.
13. Середин В.В., Стародумова А.О., Пушкарева М.В., Лейбович Л.О. Экспериментальное изучение распространения углеводородного загрязнения в геологической среде // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 10. – С. 131–133.

References

1. Galkin V.I., Seredin V.V., Bachurin V.A. Primenenie veroyatnostno-statisticheskikh modelej pri izuchenii raspredeleniya uglevodorodov v gruntah i vybore tehnologij ih sanacii. Perm: RIO PGTU, 1999. 140 p.
2. Kachenov V.I., Seredin V.V., Karmanov S.V. K voprosu o vlijanii nefjtjanyh zagraznenij na svojstva gruntov // Geologija i poleznye iskopaemye Zapadnogo Urala. 2011. no. 11. pp. 164–165.
3. Krupoderov I.V., Mosejskin V.V. Modelirovanie uglevodorodnogo zagraznenija geologicheskoj sredy na territorii Voronezhskoj neftebazy OAO «Voronezhnefteprodukt» // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten. 2012. no. 11. pp. 273–281.
4. Rekul'tivacija neftezagraznennyh pochv: uchebnoe posobie / Kuznecov F.M., Kozlov A.P., Seredin V.V., Pimenova E.V. Perm, 2003. 196 p.
5. Seredin V. V. Matematicheskie metody v gidrogeologii i inzhenernoj geologii: kurs lekcij / V.V. Seredin; M-vo obrazovanija i nauki Rossijskoj Federacii, Gos. obrazovatelnoe uchrezhdenie vyssh. prof. obrazovanija «Permskij gos. un-t», Kaf. inzhenernoj geologii i ohrany neдр. Perm, 2011. 122 p.
6. Seredin V.V. Ocenka geojekologicheskikh uslovij sanacii territorij, zagraznennyh neftju i nefteproduktami. Perm: RIO PGTU, 1998. 153 p.
7. Seredin V.V. Issledovanie vlijanija vjazkosti porovoj zhidkosti (uglevodorodov) na prochnostnye svojstva peskov // Inzhenernaja geologija. 2014. no. 4. pp. 45–48.
8. Seredin V.V. Issledovanie prostranstvennogo raspredelenija uglevodorodov v pochvogrunтах i vodah na territorijah, zagraznennyh neftju i nefteproduktami. Perm: RIO PGTU, 1998. 110 p.
9. Seredin V.V. Issledovanie temperatury porod v zone treshiny razrushenija // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 9–12. pp. 2713–2717.
10. Seredin V.V. K voprosu o prochnosti zasolennyh glinistyh gruntov. Inzhenernaja geologija. 2014. no. 1. pp. 66–69.
11. Seredin V.V., Jadzinskaja M.R. Zakonomernosti izmenenija prochnostnyh svojstv glinistyh gruntov, zagraznennyh nefteproduktami // Inzhenernaja geologija. 2014. no. 2. pp. 26–32.
12. Seredin V.V., Jadzinskaja M.R. Issledovanie mehanizma agregacii chastic v glinistyh gruntah pri zagraznenii ih uglevodorodami // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 8 (Chast6). pp. 1408–1412.
13. Jeksperimentalnoe izuchenie rasprostranenija uglevodorodnogo zagraznenija v geologicheskoj srede / Seredin V.V., Starodumova A.O., Pushkareva M.V., Lejbovich L.O. // Neftjanoe hozjajstvo. 2014. no. 10. pp. 131–133.

Рецензенты:

Наумов В.А., д.г.-м.н., профессор кафедры поисков и разведки полезных ископаемых, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь;

Наумова О.Б., д.г.-м.н., зав. кафедрой поисков и разведки полезных ископаемых, Пермский государственный национальный исследовательский университет, г. Пермь.

Работа поступила в редакцию 10.04.2015.