

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЧВЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ НА ИХ НЕФТЕНАСЫЩЕНИЕ ПРИ АНАЛИЗЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ В СЕВЕРНЫХ РЕГИОНАХ

**О.А. Джиошвили; С.Н. Рубилов;
М.А. Галишев, доктор технических наук, профессор,
заслуженный работник высшей школы РФ.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России**

Описаны процессы поведения нефтяного загрязнения в почвах и донных осадках. Исследован механизм разливов нефтепродуктов в пористых почвенных средах с использованием перколяционных процессов. Получены аппроксимирующие функции зависимостей эффективной пористости и проницаемости от среднего размера гранулометрических фракций. Разработанная методика позволяет оценить предельно допустимые значения нефтенасыщения почв, при которых происходит в одних случаях распространение нефтяного загрязнения по площади, в других – остаточное накопление нефти в почвенном слое.

Ключевые слова: почвы, нефтяные загрязнения, перколяция, пористость, проницаемость

EXPERIMENTAL INFLUENCE RESEARCH PHYSICAL PROPERTIES OF SOIL ADJOURNMENT ON THEM PETROSATURATION AT THE ANALYSIS OF THE EXTREME SITUATIONS IN NORTHERN REGIONS

O.A. Dgioshvili; S.N. Rubilov; M.A. Galishev.
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia

Work is devoted the description of processes of behavior of oil pollution in soils and ground deposits. The mechanism of floods of oil products in porous soil environments with use percolation processes is investigated. Approximating functions of dependences of effective porosity and permeability from the average size of mechanical fractions are received. The developed technique allows to estimate maximum permissible values of petrosaturation of soils at which there is in one cases a distribution of oil pollution on the area, in others – residual accumulation of oil in soil.

Key words: soils, oil pollution, percolation, porosity, permeability

Разведка, добыча и любые виды транспортировки нефти представляют собой определенный риск загрязнения и серьезную экологическую угрозу для арктической природной среды. Наиболее сложно описать процессы поведения нефтяного загрязнения в почвах и донных осадках. Данные субстанции являются благоприятной средой для аккумуляции загрязняющих веществ. Это связано, во-первых, с тем, что они являются пористой структурой, в которой нефтепродукты могут весьма неравномерно распределяться во всем объеме и на поверхности. Во-вторых, нефтепродукты активно взаимодействуют со всеми компонентами почвенной среды – твердой, жидкой и газообразной фазами, минеральным и органическим веществом, живыми организмами. Почвы, в силу их

геохимического положения на контакте со всеми природными средами обитания человека, являются основным депонирующим элементом окружающей среды. От характера поведения в них загрязняющих веществ во многом зависит состояние приземного слоя атмосферы, наземных водоемов и водотоков и опасность возникновения чрезвычайных ситуаций.

Причинами загрязнения почв и донных осадков нефтепродуктами являются аварии на магистральных и внутрипромысловых нефтепроводах, несовершенство и грубые нарушения технологии добычи и переработки нефти и нефтепродуктов, различные аварийные ситуации, при которых происходят залповые разливы нефти, нефтепродуктов и вод, содержащих нефть.

В результате, например, в отдельных районах Тюменской и Томской областей, концентрации нефтяных углеводородов в почвах превышают фоновые значения в 150 – 250 раз. В Западной Сибири выявлено свыше 20 тысяч гектаров земель, загрязненных нефтью, с толщиной слоя не менее пяти сантиметров [1].

По мере старения оборудования, повышается вероятность утечек нефти, особенно на внутри и межпромысловых трубопроводах. Одним из примеров такого рода может служить разлив десятков тысяч тонн нефти под городом Усинском (республика Коми) [2, 3]. Значительная часть российских трубопроводов создана более 20 лет назад и приближается к завершению проектных сроков своей эксплуатации, после чего риск аварий будет резко нарастать.

В грунтах вокруг многих нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ) за многие десятилетия их работы накопились огромные количества нефти и нефтепродуктов. В США известны случаи, когда их количества измеряются сотнями тысяч тонн. Грунты под городом Грозным в Чечне являются одним из крупнейших в мире таких нефтяных месторождений, созданных человеком. Оценки его запасов достигают одного миллиона тонн [4]. Аналогичные проблемы отмечаются в окрестностях ряда НПЗ, нефтебаз, военных аэродромов. Утечки в грунт могут происходить не только вокруг НПЗ, но и вокруг любых хранилищ нефти и нефтепродуктов.

Сейчас ведущее положение на земле по распространенности занимают четыре типологические группы почв [5, 6]:

1) почвы влажных тропиков и субтропиков, преимущественно красноземы и желтоземы, для которых характерны богатство минерального состава и большая подвижность органики (более 32 млн км²);

2) плодородные почвы саванн и степей – черноземы, каштановые и коричневые почвы с мощным гумусовым слоем (более 32 млн км²);

3) скудные и крайне неустойчивые почвы пустынь и полупустынь, относящиеся к разным климатическим зонам (более 30 млн км²);

4) относительно бедные почвы лесов умеренного пояса – подзолистые, бурые и серые лесные почвы (более 20 млн км²).

Для России наиболее характерны почвы второй, третьей и четвертой типологических групп, причем к третьей группе в нашей стране принадлежат почвы тундровой и лесотундровой климатических зон, то есть почвы, наиболее характерные для северных и арктических районов.

В настоящей работе исследование разливов нефтепродуктов в пористых почвенных средах осуществлено с использованием механизма перколяционных процессов. Перколяция является критическим явлением. Это чисто геометрический фазовый переход, тесно связанный с обычными фазовыми переходами второго порядка (металл-изолятор, парамагнетик-ферромагнетик, золь-гель). Перколяция позволяет описать процессы самой разной природы, когда при плавном изменении одного из параметров свойства системы меняются скачком. Важная черта физики всех критических явлений состоит в том, что вблизи критической точки, система как бы распадается на блоки с отличающимися свойствами. Блоки расположены беспорядочно, однако в среднем их геометрия обладает

вполне определенными свойствами, а их физические свойства всегда неразрывно связаны с геометрией [7].

Степень загрязнения почв и донных отложений выражается нефтенасыщением, то есть относительной массой $m_{вг}$ (или объемом $v_{вг}$) нефтепродукта, впитавшегося в грунт.

Объемный коэффициент нефтеемкости (эффективная пористость) рассчитывался как:

$$\Pi = (m_{нп} / \rho_{нп} \cdot V_{п}) \cdot 100 \%,$$

где Π – пористость; $\rho_{нп}$ – плотность нефтепродукта [г/см³]; $V_{п}$ – объем почвенного образца.

Для различных нефтепродуктов принимались следующие значения плотности:

$\rho_{бензин} = 0,75$ г/см³; $\rho_{диз.топливо} = 0,85$ г/см³; $\rho_{нефть} = 0,87$ г/см³. Объем почвенного образца составлял 1 см³.

Пористость определялась по товарным нефтепродуктам (автомобильный бензин, дизельное топливо) и сырой нефти. Изучались грунты различного гранулометрического состава.

Значения эффективной пористости у мелкозернистых фракций очень близки для различных типов нефтепродуктов. Минимальные значения эффективной пористости (в крупнозернистых фракциях) возрастают от бензина к дизельному топливу, различаясь в 2,5 раза.

Аппроксимация зависимостей эффективной пористости от среднего размера гранулометрических фракций проводилась в пакете «Origin 8» с большим набором функций нелинейной аппроксимации [8]. Общеизвестным является тот факт, что с увеличением мелкозернистых пелитовых фракций в составе почв и грунтов возрастает их пористость по сравнению с грубозернистыми разностями. Это подтвердилось и по результатам проведенных измерений. Установлено что убывание значений пористости с увеличением размера фракций описывается обратной экспоненциальной зависимостью вида:

$$y = y_0 + A \cdot \exp(R_0 \cdot x) \text{ при } R_0 < 0.$$

На рис. 1, 2, 3 представлены зависимости значений эффективной пористости почв от гранулометрического состава. Найдены коэффициенты регрессионных уравнений данных зависимостей по различным видам нефтепродуктов.

Зависимость пористости от гранулометрического состава для автомобильного бензина имеет вид:

$$y = 10,1 + 43,9 \cdot e^{-2,2x}$$

при достоверности аппроксимации $R^2=0,88$.

Для дизельного топлива:

$$y = 31 + 26 \cdot e^{-4,1x}$$

при достоверности аппроксимации $R^2=0,94$.

Для сырой нефти:

$$y = 22 + 35,8 \cdot e^{-3,4x}$$

при достоверности аппроксимации $R^2=0,95$.

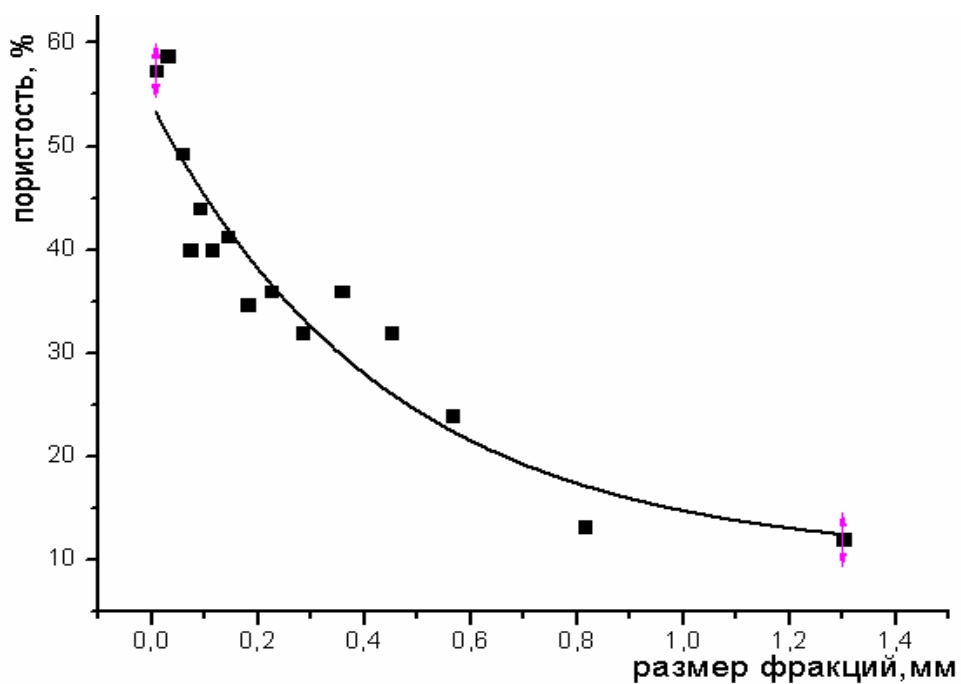


Рис. 1. Зависимость эффективной пористости почв от среднего размера гранулометрических фракций (по автомобильному бензину)

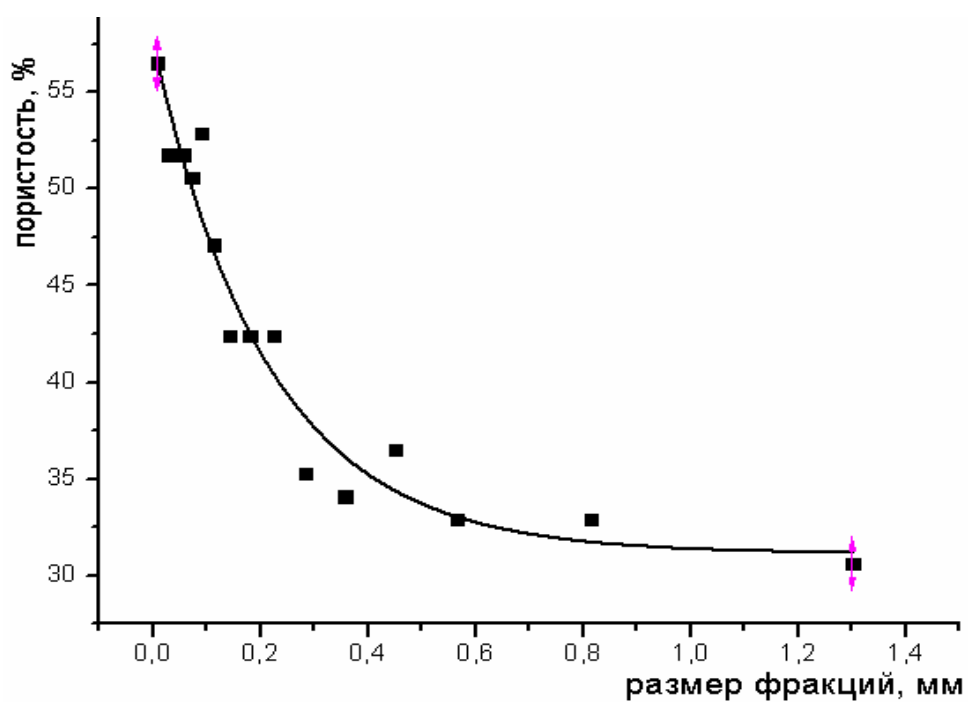


Рис. 2. Зависимость эффективной пористости почв от среднего размера гранулометрических фракций (по дизельному топливу)

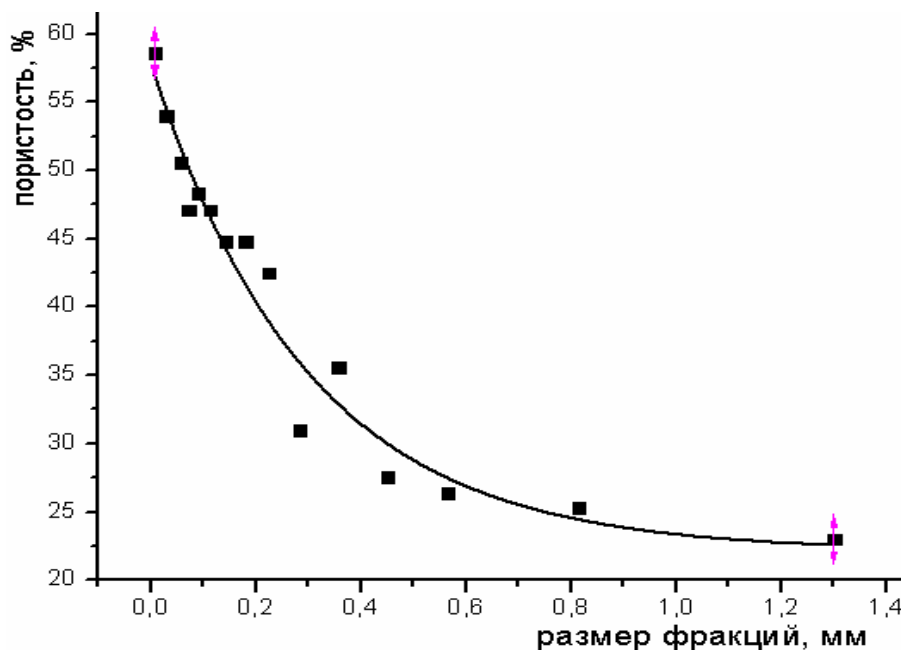


Рис. 3. Зависимость эффективной пористости почв от среднего размера гранулометрических фракций (по сырой нефти)

Согласно свойству обратной функции при малых значениях аргумента происходит резкое уменьшение значений функции. В рассматриваемом случае это означает, что существенное снижение значений пористости происходит в очень малом диапазоне изменения среднего размера фракций. По всем изученным нефтепродуктам этот диапазон ограничен верхним размером фракции примерно 0,2 мм. В диапазоне изменения гранулометрического состава почв от 0,2 до 0,6 мм наблюдается постепенный переход от мелкозернистых почвенных систем, обладающих высокой пористостью, к состоянию, при котором с увеличением размера зерен, практически не происходит дальнейшее снижение нефтеемкости почвы. При размерах фракций выше 0,6 мм значения пористости устанавливаются на одном уровне, который составляет для бензина – 10 %, для дизельного топлива – 31 %, для сырой нефти – 22 % (свободные члены в уравнениях регрессии).

Удобство использования обратной экспоненциальной функции заключается в том, что свободный член здесь численно задает асимптотическое значение функции, то есть минимально возможное значение пористости. Данная функция также довольно определенно позволяет установить критический размер фракции грунта, выше которого, значения пористости практически не увеличиваются.

Помимо пористости важнейшей характеристикой порового пространства является показатель проницаемости. Коэффициент проницаемости k не зависит от типа протекающей жидкости, его, как характеристику среды, можно определять по любой жидкости. К факторам, определяющим проницаемость, относятся температура, гидравлический градиент, форма зерен и их упаковка. С повышением температуры вязкость жидкости понижается, а проницаемость породы изменяется обратно пропорционально вязкости. Скорость течения жидкости в пористой среде пропорциональна гидравлическому градиенту. При наличии в пористой структуре зерен с формой, отличающейся от сферической, проницаемость возрастает. Так, проницаемость песка, сложенного остроугольными зернами, выше проницаемости песка, представленного в основном сферическими зернами того же размера. Этот эффект можно объяснить тем, что остроугольные зерна упакованы более рыхло и образуют своды. Почвы, состоящие в основном из плоских, слюдообразных частиц и

кристаллов игольчатой формы, имеют рыхлую упаковку, высокую пористость и, в общем, вероятно, хорошую проницаемость. Наиболее проницаемой структурой почвы считается кубовидная [5].

С позиций перколяционных процессов, почву, сложенную геометрически неправильными зернами можно, считать более структурированной (то есть имеющей более развитую структуру), по сравнению с почвой, состоящей из сферических частиц. Таким образом, более структурированные почвы обладают лучшей проницаемостью.

Проницаемость почвенных образцов определялась в стеклянной бюретке, заполненной почвой на 10 см высоты. После механического уплотнения образца над ним помещался столб воды, высотой 10 см. Высота столба воды поддерживалась постоянной в течение всего эксперимента. После прохождения первой капли воды через почвенный образец включали отсчет времени. Фиксировали время, необходимое для прохождения через почву каждого последующего миллилитра воды. Для расчетов принималось среднее время прохождения 1 мл воды через слой почвы 10 см с гидравлическим градиентом 10 мл Н₂О. Разницей в атмосферном давлении между верхней и нижней частями бюретки пренебрегали.

На основании экспериментальных данных рассчитан коэффициент проницаемости почвенных образцов (k):

$$k = \frac{q \cdot \mu}{dp/dx} .$$

Динамическая вязкость воды (μ) при 20° С составляет 1 сп. Гидравлический градиент столба воды dp/dx в 10 см составляет 0,01 ат/см. Линейный расход воды (q) установлен путем прямых измерений. В работе использовалась внесистемная единица – Дарси, что связано со сложившейся практикой. В системе СИ 1 Дарси эквивалентен 1 мкм².

Измерения проводились для фракций, у которых время просачивания столба воды не превышало 4 часов. При превышении этого порога фракция считалась непроницаемой. Среди изученных фракций наибольшей проницаемостью обладают фракции крупнозернистого песка ($k = 21,7$ дарси). Самая мелкая фракция, у которой удалось определить коэффициент проницаемости, была фракция со средним размером частиц 0,056 мм ($k = 7$ миллидарси).

Зависимость коэффициента проницаемости различных гранулометрических фракций алевритовых и глинисто-алевритовых песков от среднего размера зерен выражается сигмоидальной функцией Больцмана вида (рис. 4):

$$y = 21,3 + \frac{-1,1 - 21,3}{\left[1 + \exp\left(\frac{x - 0,35}{0,09}\right)\right]}$$

Достоверность аппроксимации $R^2=0,98$. Функция имеет перегиб в точке $x=0,35$ со значением проницаемости 10,1 дарси. Пределы изменения значений проницаемости от -1,1 дарси до 21,3 дарси. Разумеется, проницаемость не может иметь отрицательного значения, и полученная величина нижней асимптоты объясняется погрешностью аппроксимации.

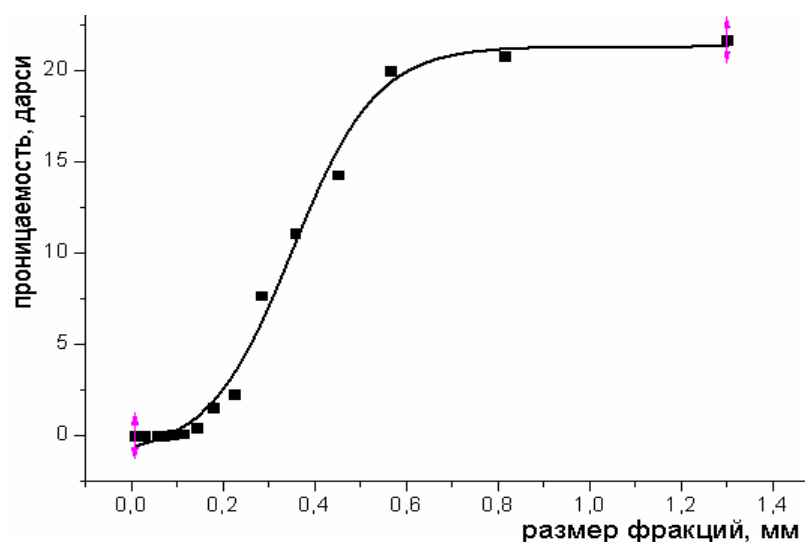


Рис. 4. Зависимость коэффициента проницаемости различных гранулометрических фракций алевритовых и глинисто-алевритовых песков от размера зерен

Таким образом, установлено, что в регрессионной зависимости значений коэффициента проницаемости от среднего размера изученных фракций имеется критическая область значений. Ниже размера фракций 0,2 мм пористая структура, практически непроницаема для жидкости. В ней могут образовываться отдельные изолированные кластеры. С другой стороны во фракциях размером свыше 1 мм устанавливается одинаковый коэффициент проницаемости.

Полученные результаты рассмотрены совместно с результатами экспериментов по определению эффективной пористости этих же фракций алевритовых и глинисто-алевритовых песков. Пористость, как уже отмечалось, в отличие от проницаемости зависит не только от свойств среды, но и от типа жидкости. Если использовать вместо гранулометрического состава образцов значения пористости соответствующих фракций, то можно говорить, что ниже величин пористости 22 % (по сырой нефти) возникает проникающий через всю систему перколяционный кластер, сосуществующий с изолированными кластерами этой структуры.

Экспериментально определенные значения пористости крупных фракций устанавливаются на одинаковом минимальном уровне 12 % по отношению к сырой нефти, начиная с размера частиц 0,6 мм. То есть, ниже величин пористости 12 % подавляющая часть пор становится взаимосвязанной и доступной для жидкости, свободно распространяющейся по поверхности и в объем пористого тела.

Критическое состояние системы, в котором наблюдается плавный рост коэффициента проницаемости, соответствует фракциям с размерами зерен от 0,2 до 1,0 мм с пористостью от 22 до 12 %. В конкретном изученном примере порог перколяции наступает во фракции со средним размером частиц $\approx 0,5$ мм, имеющей пористость 17 % и коэффициент проницаемости ≈ 11 дарси.

К такого типа почвам, по-видимому, можно отнести гумусовый почвогрунт, содержащий мелкие включения растительных остатков самой различной формы. Характерно, что имеющиеся в литературе данные об образовании крупных подземных залежей техногенных нефтепродуктов за счет процессов инфильтрации относятся к районам со вторым и четвертым типами почв, в той или иной степени, содержащим гумусовые компоненты (Моздок, Туапсе, Ейск, Орел, Новокуйбышевск и др. города) [4]. Однако, такие случаи не зафиксированы на Аравийском полуострове и на севере России, где преобладает третий тип почв. Таким образом, приобретает практическое значение выявление морфологии почвенных отложений для анализа возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с разливами нефтепродуктов.

Использование разработанной методики позволяет оценить предельно допустимые значения нефтенасыщения грунтов, при которых происходит в одних случаях распространение нефтяного загрязнения по площади, в других – остаточное накопление нефти в почвенном слое. Полученные данные экспериментально подтверждены и могут быть использованы для объективного обоснования норм нефтяных загрязнений почв и грунтов.

Учитывая большое количество пожаров, происходящих вследствие утечек и залповых выбросов нефтепродуктов на объектах нефтегазового комплекса, необходимо располагать параметрами, характеризующими почвенную систему в той или иной степени, пропитанную нефтью. Известно, что системы показателей пожарной опасности, принятые в России и ряде других стран подразумевают в первую очередь подразделение всех горючих веществ и материалов по условному агрегатному состоянию [9]. Поэтому для того, чтобы применять к тем или иным объектам показатель пожарной опасности, необходимо, прежде всего, определить к какому агрегатному состоянию следует их относить. Почвы, образующие с нефтепродуктами практически неразделимые системы следует, очевидно, оценивать по показателям пожарной опасности, принятым для твердых горючих веществ. При выделении нефтепродуктов в отдельную фазу к таким объектам следует применять показатели пожарной опасности, установленные для жидкостей.

В системе ориентировочных допустимых концентраций нефтепродуктов в почвах [10] среди возможных агрегатных состояний нефтепродуктов в почвах предусмотрено: парообразное и жидкое состояние в порах почв, сорбированное состояние на органических и минеральных частицах почв, свободное состояние на поверхности почв. Однако не имеется никаких указаний о том, какому типу почв свойственно то или иное состояние. Предлагаемая в настоящей работе методика и полученные результаты дают практические основания для выделения типов почвенных систем по агрегатному состоянию содержащихся в них инородных нефтепродуктов.

Результаты работы дают также основания для отнесения процессов поглощения нефтепродуктов пористыми почвенными отложениями к разряду критических процессов. Установлена критическая область размеров гранулометрических фракций, в которой происходит постепенный переход от системы связанного с почвой нефтепродукта к системе, содержащей беспрепятственно распространяющиеся в почве нефтепродукты. Эта область для алевритовых и глинисто-алевритовых песков находится в пределах 0,2–0,6 мм. Методика также позволяет определять максимальный уровень нефтяного загрязнения крупнозернистых гранулометрических фракций для различных типов нефтепродуктов. Предлагаемая методика и полученные с ее использованием результаты могут служить основой для классификации почв и подобных ей пористых структур по отношению к нефтяному загрязнению.

Литература

1. Денисов В.В., Денисов И.А., Гутенев В.В. Безопасность жизнедеятельности. Защита населения и территорий при чрезвычайных ситуациях. М., 2003. 607 с.
2. Брызгалов В.А., Граевский А.П., Иванов В.В. Влияние аварийных разливов нефти в бассейне реки Печора на состояние воды и донных отложений в устьевой области // Экологическая химия. 1999. Т. 8. Вып. 3. С. 177–185.
3. Печорская губа – опыт органо-геохимического мониторинга / В.И. Петрова, Г.И. Батова, М.А. Галишев [и др.]. // Океанология, 1999. Т. 39. № 4. С. 539–547.
4. Григорьев А.Ю. Экологические проблемы российского нефтяного сектора [Электронный ресурс]. URL: <http://www.forest.ru/rus/problems/oil/index.html> (дата обращения: 05.12.2010).
5. Шишов Л.Л., Лебедева И.И., Тонконогов В.Д. Классификация почв России и перспективы ее развития. // Почвоведение: история, социология, методология. Памяти основателя теоретического почвоведения В.В. Докучаева / отв. ред. В.Н. Кудеяров, И.В. Иванов. М.: Наука, 2005. С. 272–279.

6. Почвы: их роль, проблемы и охрана. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ecosystema.ru> (дата обращения: 05.12.2010).
7. Эфрос А.Л. Физика и геометрия беспорядка // Библиотечка «Квант», Вып. 19. М.: Наука, 1982. 265 с.
8. Исакова О.П., Тарасевич Ю.Ю., Юзюк Ю.И. Обработка и визуализация данных физических экспериментов с помощью пакета «Origin». М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 136 с.
9. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федер. закон Рос. Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ.
10. Государственная система санитарно-эпидемиологического нормирования РФ. Федеральные санитарные правила и гигиенические нормативы. 2.1.7. Почва, очистка населенных мест, бытовые и промышленные отходы. Ориентировочные допустимые концентрации нефти и нефтепродуктов в почвах. М., 2002.