

*Д.А. Панжин<sup>1</sup>, М.А. Галишев<sup>1</sup>, А.Б. Сивенков<sup>2</sup>*  
(<sup>1</sup>Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России,  
<sup>2</sup>Академия ГПС МЧС России; e-mail: magalishev@yandex.ru)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ ПО ПОЧВЕННОМУ СЛОЮ**

*Предложена методика классификации почв по степени чувствительности и устойчивости к нефтяному загрязнению. Для исследования процессов распространения нефтяного загрязнения по пористому почвенному слою использована теория перколяции или протекания среды. Получены экспериментальные данные по проницаемости различных гранулометрических фракций пористых глинисто-алевролитовых песков.*

*Ключевые слова: почвенные отложения, нефтяное загрязнение, проницаемость, порог перколяции.*

*D.A. Panzhin, M.A. Galishev, A.B. Sivenkov*

## **INVESTIGATION OF THE CRITICAL PHENOMENA AT DISTRIBUTION OF OIL POLLUTION ON THE SOIL LAYER**

*The technique of soil classification on the degree of sensitivity and resistance to oil pollution is offered. For research of processes of distribution of oil pollution on a porous soil layer the theory percolation or courses of environment is used. Experimental data on permeability various fractions of porous clay-silty sand are received.*

*Key words: soil adjournment, oil pollution, permeability, a threshold of percolation.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 27 апреля 2011 г.

### **Введение**

Исследование процессов взаимовлияния нефти (и нефтепродуктов) и почвы сводится к выявлению влияния на это взаимодействие особенностей нефтяного загрязнения, его количества, природы и состава. Большое разнообразие почв по их морфологическим, физическим, химическим свойствам в наибольшей степени, по сравнению с другими природными средами обитания человека, должно сказываться на особенностях нахождения в них инородных нефтепродуктов. Между тем, не разработаны принципы выделения типов почвенных отложений по их влиянию на характер нефтяного загрязнения. Поэтому важной задачей представляется выработка методики, с использованием которой можно было бы классифицировать почвы по этому признаку.

Для исследования процессов распространения нефтяного загрязнения по пористому почвенному слою может быть использована теория перколяции или протекания среды. Пористое пространство почвы, как и других пористых материалов, можно представить как статистический лабиринт с чередующимися расширениями и сужениями разного размера и формы [1]. Этот лабиринт занимает часть суммарного объема пористого тела, соответствующую эффективной

пористости. При изучении процессов протекания интерес представляет именно эффективная пористость, то есть отношение сообщающихся между собой поровых пространств к видимому объему почвы, поскольку часть общего объема пор может не входить в лабиринт взаимосвязанных пор, образуя отдельные изолированные полости или группы полостей. Обычно эффективная пористость на 5-10 % меньше общей пористости.

Размер пор, их форма и сочетание весьма разнообразны, так как они являются производными от случайного расположения полидисперсных частиц механического состава – элементарных почвенных частиц, микроагрегатов и структурных частей, крайне различных по размерам, форме и характеру их поверхностей. Эти промежутки по форме и размерам сильно изменяются во времени в зависимости от происходящих в почве физико-механических и биологических процессов. Вследствие частичной или полной закупорки некоторые поры исчезают, другие возникают вновь [2].

Проницаемостью называют физическое свойство, которое позволяет жидкости перемещаться через сообщающиеся между собой поры без нарушения или смещения частиц почвы. Высокую или низкую проницаемость почвы определяет в основном размер пор и их взаимосвязь. Почвы различаются очень широким диапазоном размеров отдельных пор, а также расположением их относительно друг друга. С уменьшением размера зерен пористость возрастает, а благодаря большой извилистости и более высоким капиллярным давлениям с последующим более высоким насыщением смачивающей жидкостью относительная проницаемость такой системы уменьшается.

Почвы с крупными порами и низкой пористостью (гравелистые, песчаные, легкие супесчаные) имеют наивысшую фильтрационную способность. В таких почвах химические и биологические загрязнения быстрее продвигаются вглубь и достигают грунтовых вод, что приводит к их загрязнению и создает опасность для здоровья населения. В то же время почвы с маленькими порами и высокой пористостью (глинистые, тяжелые суглинистые) имеют низкую фильтрационную способность, в них загрязнение локализуется на месте разлива.

### **Результаты исследования**

В качестве простейшего примера можно рассмотреть модель протекания в двумерной квадратной решетке, состоящей из узлов, которые могут быть проводящими или непроводящими. В начальный момент времени все узлы сетки являются непроводящими. Под воздействием источника протекания непроводящие узлы заменяются на проводящие и число проводящих узлов постепенно растет. При этом узлы замещаются случайным образом, то есть выбор любого из узлов для замещения является равновероятным для всей поверхности решетки. Перколяцией называют момент появления такого состояния решетки, при котором существует хотя бы один непрерывный путь через соседние проводящие узлы от одного до противоположного края. Очевидно, что с ростом числа проводящих узлов этот момент наступит раньше, чем вся поверхность решетки будет состоять исключительно из проводящих узлов.

Теорию перколяции в непрерывной среде можно применить к прохождению жидкости через объемный пористый образец (например, нефтепродукта через почвенный слой), в котором происходит постепенное заполнение пор до тех пор, пока не сформируется непрерывный путь просачивания жидкости от одного края образца до другого. В этом состоянии жидкость, просачиваясь в поровое пространство, образует кластер протекания или перколяционный кластер. Перколяционный кластер является фрактальным образованием. Фрактальная массовая размерность фронта продвижения зависит от вязкости жидкости, пористости породы и способности жидкости смачивать поверхность породы.

Порогом протекания  $R$  называется количество элементов перколяционного кластера  $n$ , отнесенное к общему количеству элементов рассматриваемой среды  $N$  [3].

$$R = n/N. \quad (1)$$

Иными словами, решётка становится проницаемой лишь после того, как численная доля потенциально проницаемых пор превысит некоторое пороговое значение. Ввиду случайного характера переключений состояний элементов среды, в конечной системе четко определенного порога (размера перколяционного кластера) не существует, а имеется так называемая критическая область значений  $\delta(N)$ , в которую попадают значения порога перколяции, полученные в результате различных случайных реализаций. С увеличением размеров системы область сжимается в точку.

Жидкость быстрее будет протекать по почве с большими порами и хорошей взаимосвязью между ними. Небольшие поры с тем же уровнем связей дадут меньшую проницаемость, так как поток жидкости будет проходить медленнее. Бывает, что почва с крупными порами имеет нулевую проницаемость (нет потока), потому что поры в этом случае изолированы (не связаны друг с другом). Нулевую проницаемость также имеет порода с очень маленькими порами (например, глина). 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. Действительно, по некоторым данным, пористость торфяной почвы, содержащей мелкие включения растительных остатков самой различной формы, составляет – 80 %, а песчаной – 40 % [2]. Почву, сложенную геометрически "неправильными" зернами можно, на наш взгляд, считать более структурированной (имеющей более развитую структуру), по сравнению с почвой, состоящей из сферических частиц. Таким образом, более структурированные почвы должны обладать лучшей проницаемостью.

Проницаемость не абсолютная величина, а относительная. Почва считается проницаемой, если через нее за короткое время (до нескольких часов) проходит заметный объем жидкости, и непроницаемой, если скорость фильтрации

жидкости ничтожна. Зависимость скорости фильтрации флюида от градиента напора выражается законом Дарси [4], по имени Анри Дарси, который в 1856 г. проводил эксперименты над фильтрацией жидкостей в пористой среде.

Закон Дарси выражается уравнением:

$$q = \frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx}, \quad (2)$$

где  $q$  – линейный расход жидкости (предполагается горизонтальное течение, см/сек;

$k$  – коэффициент проницаемости, дарси;

$\mu$  – вязкость жидкости, сп;

$\frac{dp}{dx}$  – гидравлический градиент, разность в давлении  $p$  в направлении течения, ат/см.

В системе измерения СИ 1 дарси эквивалентен 1 мкм<sup>2</sup> [5].

Коэффициент проницаемости  $k$  не зависит от типа протекающей жидкости, его, как характеристику среды, можно определять по любой жидкости. В качестве образцов пористой среды были изучены гранулометрические фракции алевритовых и глинисто-алевритовых песков, состоящих из алюмосиликатного кварца с небольшим количеством растительного детрита. Изучено 15 фракций с размером частиц от 0,005 до 1,6 мм. Для расчетов принимались средние размеры фракций от 0,008 до 1,3 мм.

Проницаемость образцов определялась по воде 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 Н<sub>2</sub>О. Разницей в атмосферном давлении между верхней и нижней частями бюретки пренебрегали.

На основании экспериментальных данных рассчитан коэффициент проницаемости почвенных образцов (по формуле). Динамическая вязкость воды при 20 °С составляет 1 сп. Гидравлический градиент столба воды в 10 см составляет 0,01 ат/см. Линейный расход воды установлен экспериментально. 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).

Выбор наилучшего варианта согласия между экспериментальными результатами и искомой теоретической функциональной зависимостью проводился в пакете Origin 8 с большим набором функций нелинейной аппроксимации. Зависимость коэффициента проницаемости различных гранулометриче-

ских фракции алевритовых и глинисто-алевритовых песков от среднего размера зерен выражается сигмоидальной функцией Больцмана (рис. 1):

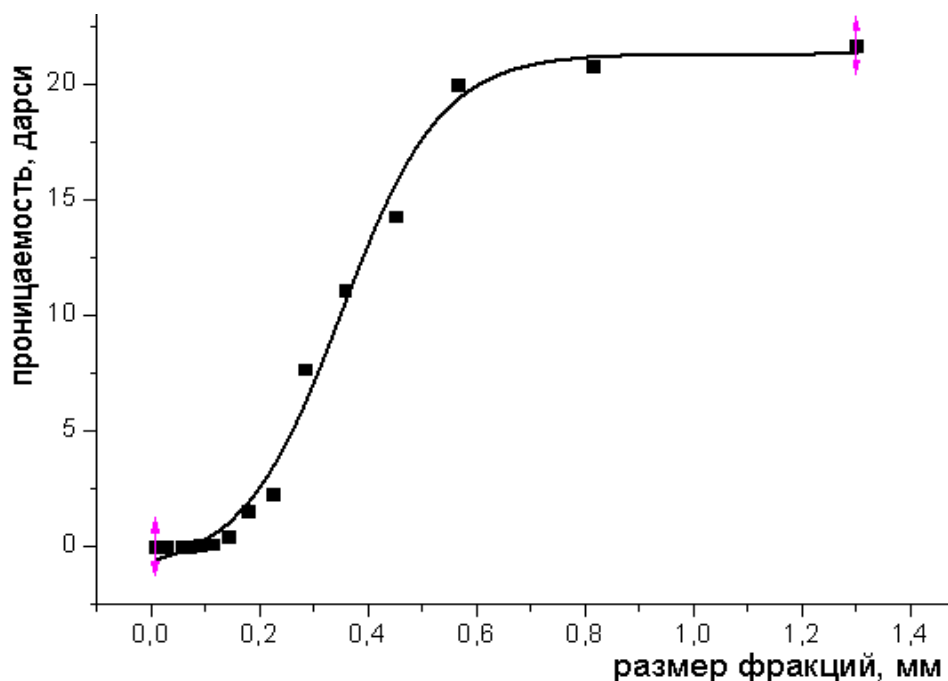
$$y = A_2 + (A_1 - A_2) / \left[ 1 + \exp \left( \frac{x-x_0}{dx} \right) \right]. \quad (3)$$

Коэффициенты в уравнении имеют значения:

$A_1 = -1,16$  – нижняя асимптота;

$A_2 = 23,4$  – верхняя асимптота,

Функция имеет перегиб в точке  $x_0 = 0,53$  со значением  $(A_1 + A_2)/2 = 11,1$ .  
 $dx = 0,15$ .



**Рис. 1.** Зависимость значений коэффициентов проницаемости фракций глинисто-алевритовых песков от среднего размера частиц

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.

Совместно с настоящей работой были проведены эксперименты по определению эффективной пористости этих же фракций алевритовых и глинисто-алевритовых песков. Пористость, в отличие от проницаемости, зависит не только от свойств среды, но и от типа жидкости. Пористость по отношению к сырой нефти фракции со средним размером зёрен 0,2 мм составила 220 г/кг. Таким образом, если использовать вместо гранулометрического состава образцов значения пористости соответствующих фракций, то можно говорить, что ниже величин пористости 22 % возникает проникающий через всю систему перколяционный кластер, сосуществующий с изолированными кластерами этой структуры.

Экспериментально определенные значения пористости крупных фракций устанавливаются на одинаковом минимальном уровне 120 г/кг 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 зёрен 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  $\approx 11$  дарси.

В работе [1] были проведены эксперименты по вдавливанию ртути в пористые углеродистые структуры. В этих экспериментах порог перколяции был установлен при пористости 16 %.

Для сравнения была измерена проницаемость готового цветочного почвогрунта "живая земля". Этот почвогрунт, как любые торфянистые почвы, характеризуется мелким гранулометрическим составом. Однако в нем визуальны различимы неразложившиеся растительные остатки, придающие грунту высокую структурированность. Пористость почвогрунта составила 43 % при коэффициенте проницаемости 96 дарси. Таким образом, цветочный почвогрунт характеризуется одновременно высокими значениями пористости и высокой проницаемостью. Сочетание эти свойств делает данный тип почв наиболее уязвимым для нефтяного загрязнения. С одной стороны, такие типы почв способны накапливать очень большие объемы нефтяного загрязнения. С другой стороны, загрязнение в этих почвах способно распространяться на значительные расстояния.

## Выводы

Получены экспериментальные данные по проницаемости различных гранулометрических фракций пористых глинисто-алевролитовых песков. Регрессионная зависимость значений коэффициента проницаемости от среднего размера изученных фракций имеет вид сигмoиды Больцмана. В найденной зависимости имеется критическая область значений, которую можно определить как порог перколяции (порог протекания).

Сопоставление результатов исследования проницаемости пористых структур со значениями пористости соответствующих гранулометрических фракций показывает, что пористая почвенная структура со средним размером зерен менее 0,2 мм и пористостью более 22 %, практически непроницаема для жидкости. В ней могут образовываться лишь отдельные изолированные кластеры. Попадающие на такие почвы нефтяные загрязнения должны локализоваться на местах разливов.

Ниже величин пористости 22 % во фракциях со средним размером от 0,2 до 0,6 мм возникает проникающий через всю систему перколяционный кластер, сосуществующий с изолированными кластерами этой структуры. Нефтяное загрязнение в таких почвах уже способно распространяться по структуре.

Во фракциях крупнее 0,6 мм, имеющих пористость ниже 12 %, проницаемость системы становится максимально возможной. Подавляющая часть пор становится взаимосвязанной и доступной для жидкости, свободно распространяющейся по поверхности и в объем пористого тела.

"Структурированные" почвы, содержащие частицы, далекие по форме от правильных сфер, в частности торфяные почвы наиболее уязвимы для нефтяного загрязнения. Они обладают наибольшими значениями пористости и проницаемости и поэтому способны накапливать очень большие объемы нефтяного загрязнения и распространять их на значительные расстояния.

Разработанная методика определения порога протекания для пористых почвенных структур может быть положена в основу градации почв по степени чувствительности и устойчивости к нефтяному загрязнению.

### **Литература**

1. **Финелонов В.Б.** Пористый углерод // Новосибирск, 1995.
2. **Геннадиев А.Н., Глазковская М.А.** География почв с основами почвоведения. Учебник. 2 изд. М.: Высшая школа, 2008. 462 с.
3. **Эфрос А.Л.** Физика и геометрия беспорядка. М.: Наука, 1982. 268 с.
4. **Басниев К.С., Кочина Н.И., Максимов М.В.** Подземная гидромеханика. М.: Недра, 1993. С. 41-43
5. **Леворсен А.И.** Геология нефти. М.: Гостоптехиздат, 1958. 487 с.