

УДК 58.051

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ПОРИСТЫЕ СРЕДЫ

канд. техн. наук, доц. В.К. ЛИПСКИЙ, М.Е. ХОРУН
(Полоцкий государственный университет)

Рассмотрены аналитические и экспериментальные исследования процессов фильтрации нефтепродуктов в грунты при авариях на магистральных нефтепроводах. В результате исследований определены фильтрационные параметры грунта, оценены масштабы загрязнения грунта нефтепродуктами.

По территории Республики Беларусь протяженность магистральных трубопроводов, перекачивающих нефть, бензин, дизельное топливо и природный газ, составляет около 7 тыс. км [1].

Ежегодно в стране происходят аварии, которые сопровождаются попаданием нефти или нефтепродуктов на поверхность почвы. Как последствия аварий, так и связанные с ними материальные убытки характеризуются размерами (степенью) загрязнения. В связи с этим существенный интерес представляют исследования процесса загрязнения и определение конечных размеров загрязнения грунтовой среды в зоне повреждений нефтепроводов.

При оценке масштабов загрязнения почвы возникают вопросы о глубине и ширине загрязнения, о количестве нефти (или нефтепродукта), находящейся в почве. Для решения этих вопросов в Полоцком государственном университете были проведены аналитические и экспериментальные исследования по проникновению нефти и нефтепродуктов в грунты.

Для аналитического описания процесса фильтрации нефтепродуктов в грунты используется модель [2], описывающая двухфазное гравитационно-капиллярное течение нефтегазовой смеси в пористой среде. Область, в которой протекает исследуемый процесс, представлена на рис. 1.

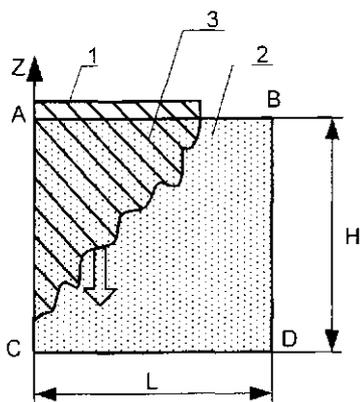


Рис. 1. Двухфазное гравитационно-капиллярное течение:

- 1 – слой нефтепродукта на поверхности;
- 2 – почва, насыщенная воздухом;
- 3 – нефтепродукт, проникший в почву

Процесс проникновения жидкости в пористую среду протекает по закону двухфазной фильтрации. Для математического описания процесса используется закон Дарси для двухфазной фильтрации несжимаемой жидкости под действием силы тяжести в вертикальном направлении. В роли одной фазы выступает воздух, которым насыщены поры грунта, а другая фаза – фильтрующаяся жидкость (нефть или нефтепродукт).

Уравнения, описывающие двухфазную фильтрацию смеси в пористой среде, имеют следующий вид:

$$m \frac{\partial s_i}{\partial t} = \text{div} \left[k \frac{k_i(s)}{\mu_i} (\nabla P_i - \rho_i \vec{q}) \right], (i=1,2); \quad (1)$$

$$P_c(s) = P_2 - P_1 = \frac{\sigma \cos \Theta}{\sqrt{k/m}} J(s), \quad (2)$$

где $s = s_1$ – нефтенасыщенность; $s_2 = 1 - s$; ρ_i – плотность; μ_i – вязкость; P_i – давление; k – абсолютная проницаемость; $k_i(S)$ – относительная фазовая проницаемость; σ – поверхностное натяжение на границе «нефть – газ»; m – пористость; $J(S)$ – функция Леверетта; Θ – угол смачивания; t – время; индексы $i = 1, 2$ означают нефть и газ соответственно.

Безразмерная функция $h(\tau)$, являющаяся текущей высотой нефтяного слоя над поверхностью, определяется из уравнения сохранения полного объема нефти:

$$h(\tau) = 1 - \frac{m H L}{h_0 l_0} \int_{\Omega} s(z, y, \tau) dz dy, \quad (3)$$

где h_0 , l_0 , H , L – соответственно начальная высота нефтяного слоя над поверхностью, ширина нефтяного слоя над поверхностью, высота области фильтрации и ее полуширина (все четыре величины размерные).

Цель аналитических исследований - получение численных зависимостей глубины проникновения нефти или нефтепродукта от времени для двух случаев; при проникновении жидкости под действием силы тяжести в случае противодействия (суммарная скорость фильтрации равна нулю) и при безнапорной фильтрации с возможностью, при которой воздух может двигаться из-под фронта фильтрации.

Постановка первой задачи: в начальный момент времени ($t = 0$) выше горизонтальной плоскости ($Z = 0$) находится фильтруемая жидкость, а ниже - воздух, который занимает все свободное поровое пространство грунта. Необходимо определить, каким образом будет происходить процесс проникновения жидкости в грунт во времени и когда этот процесс завершится. Для решения поставленной задачи используем следующие уравнения:

- для совместной фильтрации в вертикальном направлении воздуха и нефти [3];

$$m \frac{\partial S(z,t)}{\partial t} + \frac{k}{\mu_H} (\rho_H - \rho_r) \cdot g \frac{\partial \varphi(s)}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

где $\varphi(s) = \frac{\bar{k}_r(s) \cdot \bar{k}_H(s)}{\bar{k}_r(s) + \mu_0 \bar{k}_H(s)}$ - функция, зависящая от насыщенности s и отношения вязкостей воздуха и

нефти, $\mu_0, \mu_0 = \mu_B / \mu_H$;

- уравнение, описывающее зависимость коэффициента проницаемости от насыщенности:

$$w_B = -k \frac{\bar{k}_B(s)}{\mu_B} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + g \rho_B \right); \quad (5)$$

$$w_H = -k \frac{\bar{k}_H(s)}{\mu_H} \left(\frac{\partial p}{\partial z} + g \rho_H \right), \quad (6)$$

где w_B, w_H - компоненты скорости фильтрации воздуха и нефти в вертикальном направлении; ρ_B, ρ_H - соответственно плотности воздуха и нефти; $\bar{k}_B(s)$ и $\bar{k}_H(s)$ - относительные фазовые проницаемости газа и нефти.

В результате того, что уровень жидкости над поверхностью грунта остается непостоянным, то процесс фильтрации разделяется на несколько этапов. Первый этап - уровень жидкости уменьшается до $h = 0$ на поверхности $z = 0$; второй этап - достижение в смеси насыщенности s_{max} , отличной от 0 и 1. Третий этап - распределение остаточной насыщенности по всей глубине пласта (рис. 2).

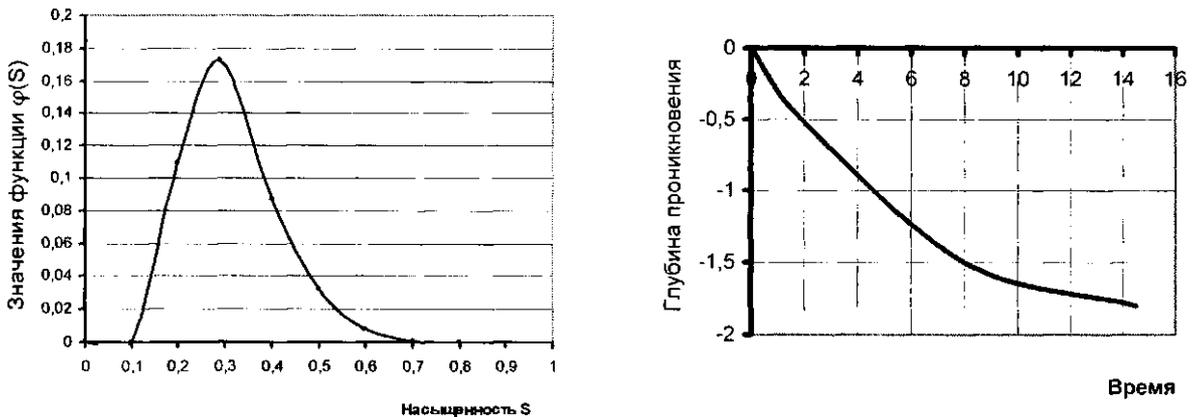


Рис. 2. Распределение насыщенности

Используя уравнения (1) - (6) и график распространения насыщенности, получаем уравнение для определения скорости фильтрации нефти в грунт:

$$w_H = \frac{k}{\mu_H} \cdot \rho_H \cdot g \cdot \varphi(s_{max}) \quad (7)$$

или

$$w_H = 0,187 \frac{k}{\mu_H} \cdot \rho_H \cdot g.$$

Постановка второй задачи: нефтепродукт проникает в первоначально сухой грунт. Давление в области, в которую проникла нефть или нефтепродукт, можно считать постоянным, т.е. вертикальным градиентом давления dp/dz пренебрегаем, а фильтрацию считаем происходящей только под действием силы тяжести (проникновение - «безнапорное»). Рассматриваемый процесс проникновения осуществляется тогда, когда противодействие на фронте вытеснения газа жидкостью (нефтью или нефтепродуктом) практически отсутствует, и воздух имеет возможность легко уходить в сторону (иметь латеральное движение) из-под фронта вытесняющей жидкости. Необходимо определить, каким образом будет происходить процесс проникновения жидкости в грунт во времени и когда этот процесс завершится. Для решения данной задачи используем уравнения:

$$w_r = -k \frac{\bar{k}_r(s)}{\mu_r} \rho_r \cdot g = -k \frac{\bar{k}_r(s)}{\nu_r} g; \quad (8)$$

$$w_H = -k \frac{\bar{k}_H(s)}{\mu_H} \rho_H \cdot g = -k \frac{\bar{k}_H(s)}{\nu_H} g, \quad (9)$$

причем суммарная скорость жидкости и газа (воздуха) определяется по формуле:

$$w(t) = -k \left(\frac{\bar{k}_r(s)}{\nu_r} + \frac{\bar{k}_H(s)}{\nu_H} \right) \cdot g \quad (10)$$

и не равна нулю. Именно эта скорость и определяет скорость проникновения жидкости с поверхности земли в грунт.

Используя уравнения (8) – (10), а также уравнение для фильтрации воздуха

$$m \frac{\partial S}{\partial t} - \frac{k g}{\nu_r} \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{k}_r(s) \right) = 0, \quad (11)$$

получаем уравнение для определения скорости проникновения жидкости в грунт:

$$w_H = -k \frac{\bar{k}_H(s)}{\mu_H} \rho_H \cdot g = -0,6 \frac{k g}{m \nu_H}. \quad (12)$$

В результате аналитических исследований также было определено время, за которое слой жидкости мощностью H полностью проникает в грунт:

$$T = \frac{H}{0,6 k g / \nu_H} = \frac{3 H \cdot \nu_H}{5 k g}. \quad (13)$$

Экспериментальные исследования. Для изучения различных видов фильтрации в пористые среды были проведены экспериментальные исследования.

Процесс проникновения загрязняющей жидкости по периметру загрязнения не однороден и подчиняется разным уравнениям для описания фильтрации. Так, в центральной части очага загрязнения происходит фильтрация, суммарная скорость которой равна нулю (случай противодействия). На краях зоны загрязнения суммарная скорость фильтрации двух фаз отличается от уравнения для скорости в случае противодействия. Поэтому для изучения процесса фильтрации нефти и нефтепродуктов в почвах при аварийных разливах проводились два типа экспериментальных исследований, имеющих различные условия: моделировался пласт неограниченной и ограниченной глубины. При фильтрации в пласт неограниченной глубины делалось предположение о том, что замещение воздуха, занимающего поры грунта, жидкостью происходит в случае, когда суммарная скорость фильтрации равна нулю, т.е. жидкость движется вниз, а воздух - вверх. При моделировании пласта ограниченной глубины предполагалось, что суммарная скорость фильтрации не равна нулю и воздух из-под фронта фильтрации перемещается в боковом (латеральном) направлении.

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях, в качестве пористой среды использовался песчаный грунт (с различным диаметром частиц), а также были проведены натурные эксперименты на грунтах, характерных для территории Витебской области. В качестве фильтруемой жидкости использовались вода, светлые нефтепродукты (дизельное топливо, бензин) и темные нефтепродукты (нефть).

Экспериментальная установка представляет собой трубку диаметром 50 мм, длиной 500 мм. Установка заполняется образцом грунта на высоту 200 мм и полностью насыщается фильтрующей жидкостью.

При лабораторных исследованиях для закрепления экспериментальной установки в вертикальном положении используется штатив,

Общая идея проведения экспериментов заключается в измерении времени проникновения определенного объема жидкости в пористую среду до тех пор, пока ее уровень не станет равным нулю.

В комплект для проведения экспериментов помимо экспериментальной установки входят также линейка со шкалой деления 1 см, секундомер, мерная емкость для сбора профильтровавшейся жидкости.

Для исследований на первом этапе необходимо было осуществить отбор образцов почв. Для этого цилиндрическая установка устанавливается вертикально на грунт и медленным нажатием на верхнюю часть заглубляется на определенную глубину. Главное условие при отборе образца - ненарушение первоначальной структуры почвы.

После отбора образца грунт помещается в установку от уровня градации, равного нулю, вниз до отметки 200 мм. В зависимости от группы опытов создаются определенные условия для процесса фильтрации,

Первый тип экспериментальных исследований. Моделируется пласт конечной глубины. Нижний край установки остается открытым и свободным для доступа, т.е. давление внизу атмосферное P_{ATM} .

Затем отмеряется порция фильтрующей жидкости, равная объему, занимаемому в установке, и заливается в экспериментальную установку через верхнюю часть. Измеряются интервалы времени изменения жидкости на один сантиметр до тех пор, пока уровень жидкости не станет равным нулю (табл. 1, опыт 1.0).

После того как фильтрация жидкости окончательно завершается, измеряется объем оставшейся жидкости в сборной емкости, и по этим данным определяется коэффициент пористости грунта.

Далее, после этапа проникновения фильтрующей жидкости в первоначально сухой грунт, переходим к следующему этапу проведения эксперимента - фильтрация в грунт, насыщенный фильтрующей жидкостью. Для этого отмеряется порция жидкости, равная объему, занимаемому в установке, и заливается через верхнюю часть в установку. Замеряется время фильтрации жидкости в заранее пропитанный грунт. Для уменьшения погрешности измерений экспериментальные исследования проводятся не менее 3-х раз (табл. 1, опыт 1.1 - 1.3). По полученным экспериментальным данным определяется коэффициент проницаемости.

Второй тип экспериментальных исследований. Моделируется пласт пористой среды бесконечной глубины. Для достижения результата необходимо после отбора образца грунта в экспериментальную установку ее нижний край сделать непроницаемым, т.е. полностью ограничить доступ воздуха. В данных условиях при фильтрации жидкости воздух, занимающий все поровое пространство грунта, имеет возможность двигаться только вертикально вверх.

Результаты экспериментальных исследований сводятся в таблицы, с учетом вида фильтрующей жидкости и типа грунтов.

В табл. 1 приводится время проникновения каждого сантиметра уровня жидкости (20 сантиметров) над поверхностью образца грунта. Значения, приведенные в столбце с нумерацией «0», соответствуют времени проникновения жидкости в первоначально сухой грунт. Для определения коэффициента проницаемости грунта жидкость фильтруется в объеме, занимаемом в экспериментальной установке (высотой 20 см), через образец грунта полностью насыщенного фильтруемой жидкостью.

Результаты экспериментального исследования приведены для случая, когда в качестве образца грунта использовался песок с диаметром частиц 0,14 мм, фильтрующаяся жидкость - вода.

В табл. 2 приведены значения общего времени проникновения жидкости в грунт.

По результатам экспериментов строятся графики времени фильтрации жидкости и изменения уровня жидкости во времени (рис. 3, 4).

Таблица 1

Время фильтрации жидкости

| Уровень, см | Время фильтрации, с | | | |
|-------------|---------------------|----------|----------|----------|
| | Опыт 1.0 | Опыт 1.1 | Опыт 1.2 | Опыт 1.3 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 77 | 376 | 420 | 369 |
| 8 | 378 | 524 | 621 | 493 |
| 12 | 820 | 783 | 794 | 687 |
| 16 | 1165 | 947 | 1006 | 872 |
| 20 | 1415 | 1317 | 1384 | 1137 |

Таблица 2

Изменение уровня жидкости во времени

| Уровень, см | Время фильтрации, с | | | |
|-------------|---------------------|----------|----------|----------|
| | Опыт 1.0 | Опыт 1.1 | Опыт 1.2 | Опыт 1.3 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 77 | 376 | 420 | 369 |
| 8 | 455 | 900 | 1041 | 862 |
| 12 | 1275 | 1683 | 1835 | 1549 |
| 16 | 2440 | 2630 | 2841 | 2421 |
| 20 | 3855 | 3947 | 4225 | 3558 |

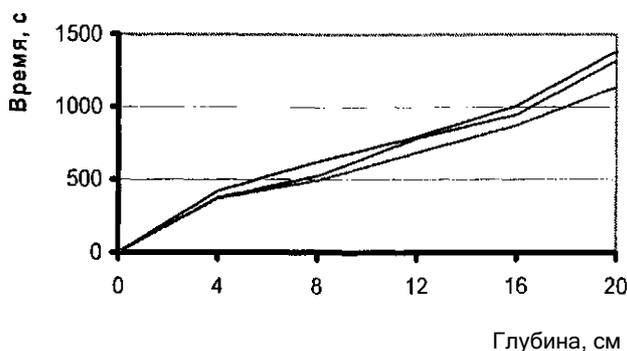


Рис. 3. График времени фильтрации жидкости

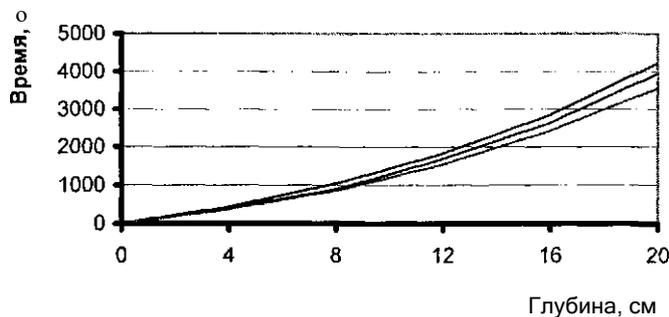


Рис. 4. График изменения уровня жидкости во времени

По результатам экспериментальных исследований определяем значения коэффициента пористости и проницаемости испытуемых грунтов, а также скорости проникновения жидкости в грунты.

Определение пористости

Пористость определяем по формуле:

$$m = \frac{V_{\text{п}}}{V} = \frac{V_{\text{ж}} - V_{\text{ост}}}{V}, \quad (14)$$

где $V_{\text{ж}}$ – суммарный объем жидкости, используемый для фильтрации, $V_{\text{ж}} = \frac{\pi d_{\text{вн}}^2 h_{\text{ж}}}{4}$; $V_{\text{ост}}$ – остаточный

объем жидкости после завершения фильтрации, $V_{\text{ост}} = \frac{\pi d_{\text{вн}}^2 h_{\text{ост}}}{4}$; V – объем грунта.

$$\text{Таким образом, } m = \frac{0,0393 - 0,0265}{0,0393} = 0,32.$$

Определение коэффициента проницаемости

Коэффициент проницаемости:

$$K = \frac{\mu(L/t)}{\rho g} \ln\left(1 + \frac{H}{L}\right), \quad (15)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости жидкости; L – высота испытуемого грунта; t – время фильтрации; H – уровень жидкости; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения.

$$K = \frac{0,00131 \cdot (0,2 / (3947 + 4225 + 3558) / 3)}{1000 \cdot 9,81} \ln\left(1 + \frac{0,2}{0,2}\right) = 4,73 \cdot 10^{-12}, \text{ м}^2.$$

Скорость проникновения фильтрующейся жидкости в грунт:

Скорость проникновения фильтрующейся жидкости в грунт определяем по формуле:

$$w_H = -0,6 \frac{k g}{m v_H}.$$

$$w_H = 0,6 \frac{4,73 \cdot 10^{-12} \cdot 9,81}{0,32 \cdot 1,31 \cdot 10^{-6}} = 6,6 \cdot 10^{-5} \text{ (м/с)} = 23,8 \text{ см/ч.}$$

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что фильтрация бензина в грунт происходит быстрее по сравнению с другими фильтрующимися жидкостями (вода, нефть).

Таким образом, полученные аналитические зависимости и проведенные экспериментальные исследования позволяют более обосновано прогнозировать экологические последствия при загрязнении почв нефтью или нефтепродуктами и разрабатывать эффективные способы минимизации ущерба.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бариев Э.Р. Чрезвычайные ситуации с утечкой нефти и нефтепродуктов в Республике Беларусь в 2000 - 2003 годах // Технологии ликвидации последствий аварийных разливов нефти и нефтепродуктов: Тез. докл. белорусско-российского науч.-практ. семинара. - Мн., 2004.
2. Пиковский Ю.И. Природные и техногенные потоки углеводородов в окружающей среде. - М.: Изд-во Московского ун-та, 1993.
3. Лурье М.В. Механика подземного хранения газа в водоносных пластах. - М.: Нефть и газ, 2001.