

Практическая работа №14
ОЦЕНКА РАСПРОСТРАНЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ В ГРУНТАХ

Модель миграции и трансформации нефтепродуктов в ландшафтах строилась в соответствии со следующей схемой учитываемых процессов. При порыве нефтепровода или нефтеемкости нефтепродукты быстро выливаются на земную поверхность, растекаясь по площади и заполняя при этом хорошо проницаемый верхний слой почвы. Это может быть лесная подстилка, остатки сельскохозяйственных культур на полях или щебеночная подстилка на промплощадке. Площадь разлива нефтепродуктов тесно связана с рельефом местности, но без наличия хорошо выраженных впадин (ям), на рельефе определяется объемом пролитых нефтепродуктов, мощностью и нефтеемкостью верхнего хорошо проницаемого слоя подстилки. Толщина слоя нефтепродуктов на поверхности связана с шероховатостью ее поверхности (высотой выступов) и вязкостью нефтепродуктов.

После насыщения емкости подстилки нефтепродукты начинают просачиваться в почву, заполняя свободные от воды поры почвогрунта. При высачивании нефтепродуктов из подстилки в почву часть нефтепродуктов остается в пористом пространстве подстилки из-за невозможности перемещения вследствие потери сплошности жидкости при уменьшении ее объемного содержания в пористой среде до некоторой критической величины, называемой остаточной нефтеемкостью среды.

После того как весь объем нефтепродуктов из подстилки (за исключением объема остаточной нефтеемкости) впитается в почву, в ней начинается фаза перераспределения нефтепродуктов по вертикальному профилю. При этом глубина проникновения нефтепродуктов в почву увеличивается при одновременном уменьшении локального объемного содержания нефтепродуктов в почве. Перераспределение продолжается до тех пор, пока объемное содержание нефтепродуктов в почве не уменьшится до значения остаточной нефтеемкости почвы.

В течение всего периода наличия нефтепродуктов в почве осуществляется деградация нефтепродуктов за счет химических и биохимических реакций. Кроме того, часть нефтепродуктов растворяется в почвенной влаге и может выноситься в растворенном виде за пределы зоны проникновения нефтепродуктов в почву при инфильтрационном питании грунтовых вод.

Интенсивность впитывания нефтепродуктов в почву определяется выражением:

$$q_0 = K_0 \frac{\mu_B}{\mu_H} \left(\frac{\theta_H - \theta_G}{P - \theta_G} \right)^2, \quad (10.1)$$

где K_0 – коэффициент фильтрации почвы, м/сут;
 μ_B и μ_H – вязкость воды и нефтепродуктов, Па·с;

P – пористость почвы;

θ_H – начальное объемное содержание нефтепродуктов в единице объема почвы;

θ_{Γ} – остаточная объемная нефтеемкость почвы.

Начальный объем нефтепродуктов в подстилке после аварии:

$$V_{A0} = H_{AH} \cdot \theta_A = H_A \cdot (P_A - W_A), \quad (10.2)$$

где H_A – толщина подстилки, м;

θ_A – начальное объемное содержание нефтепродуктов в подстилке;

P_A – пористость подстилки;

W_A – объемное содержание воды (влажность) в подстилке.

Остаточная нефтеемкость подстилки:

$$V_{A\Gamma} = \theta_{A\Gamma} \cdot H_A, \quad (10.3)$$

$\theta_{A\Gamma}$ – остаточная объемная нефтеемкость подстилки,

Время впитывания нефтепродуктов из подстилки в почву, то есть время, за которое содержание нефтепродуктов в подстилке уменьшится до величины остаточной нефтеемкости:

$$t_{VR} = (V_{A0} - V_{A\Gamma}) / q_0. \quad (10.4)$$

Объем нефтепродуктов, впитавшихся в почву, можно оценить по формуле:

$$V(t_{VR}) = V_{A0} - V_{A\Gamma} = H_A(\theta_{AH} - \theta_{A\Gamma}). \quad (10.5)$$

Время, необходимое для очищения подстилки от нефтепродуктов за счет деградации и вымывания осадками в растворенном виде:

$$t_0 = -\frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{J}{\lambda V_{A\Gamma} + J} \right), \quad (10.6)$$

где λ — коэффициент деградации нефтепродуктов в подстилке и почве, сут⁻¹;

J — интенсивность растворения нефтепродуктов проникающими в подстилку дождевыми осадками, м/сут.

Интенсивность растворения нефтепродуктов проникающими в подстилку дождевыми осадками рассчитывается по формуле:

$$J = h \cdot C_H / \rho, \quad (10.7)$$

$C_H = 122 \text{ г/м}^3$ - концентрация насыщения воды растворенной нефтью,

h - суточная норма осадков, мм;

ρ - плотность нефтепродуктов, кг/м³.

Время полного очищения подстилки от нефтепродуктов с момента аварии:

$$t_A = t_{VR} + t_0. \quad (10.8)$$

Объем нефтепродуктов в почве на момент t_0 :

$$V(t_0) = V(t_{VR}) \cdot \exp(-\lambda t_0). \quad (10.9)$$

Время полного очищения почвы от нефтепродуктов за счет деградации и вымывания осадками в растворенном виде:

$$t^0 = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{J}{\lambda V(t_0) + J}. \quad (10.10)$$

Суммарное время, необходимое для полного очищения почвы после аварии:

$$t_{\text{полн}} = t_{\text{VR}} + t_0 + t^0. \quad (10.11)$$

Площадь загрязнения земной поверхности:

$$F = V_{\text{НП}} / V_{\text{А0}}. \quad (10.12)$$

Радиус пятна разлива:

$$r = \sqrt{(F/\pi)}. \quad (10.13)$$

Максимальная глубина промачивания грунта:

$$L_{\text{max}} = V(t_{\text{VR}}) / \theta_{\text{Г}}. \quad (10.14)$$

Объем нефтепродуктов, вымываемых осадками при инфильтрационном питании грунтовых вод:

$$V_{\text{р}} = F \cdot J \cdot t_{\text{полн}}. \quad (10.15)$$

Экологический ущерб водной среде при грунтовом питании водой, содержащей растворенные нефтепродукты, определяется по формуле:

$$U_{\text{В}} = 5 \cdot K_{\text{ЭВ}} \cdot K_{\text{И}} \cdot H_{\text{БВ}} \cdot M_{\text{Р}}, \quad (10.16)$$

где $K_{\text{ЭВ}}$ – региональный коэффициент экологической значимости состояния водных объектов, $H_{\text{БВ}}$ – базовый норматив платы за сброс нефтепродуктов в поверхностные и подземные воды, $K_{\text{И}}$ – коэффициент инфляции, $M_{\text{Р}}$ – масса растворившихся нефтепродуктов.

Значение остаточной нефтеемкости грунтов вычисляется по данным таблицы 10.1 [17].

Таблица 10.1.

Удерживающая способность грунта

Жидкость	Грунт	Удерживающая способность (R в 1м^{-3})
Бензины	Крупный гравий	2,5
	Крупный песок и гравий	4,0
	Песок средний и крупный	7,5
	Песок мелкий и средний	12,5
	Песок мелкий и пылеватый	20
Средние дистилляты	Крупный гравий	5,0
	Крупный песок и гравий	8,0
	Песок средний и крупный	15
	Песок мелкий и средний	25
	Песок мелкий и пылеватый	40
Мазуты	Крупный гравий	10
	Крупный песок и гравий	16
	Песок средний и крупный	30

	Песок мелкий и средний	50
	Песок мелкий и пылеватый	80

Удерживающая способность R и остаточное насыщение θ_r связаны соотношением:

$$\theta_r = R/(1000 \cdot P), \text{ где } P - \text{пористость грунта.}$$

Пример 10.1. На промплощадке происходит разрыв трубопровода, перекачивающего дизельное топливо. Уклон земной поверхности равен нулю. Грунт на промплощадке – насыпной. Верхний слой (поверхностная подстилка) толщиной 20 см – гравий с примесью крупного песка. Подстилающий его грунт состоит из средних и мелких фракций песка. Дизельное топливо разливается круговым пятном и заполняет хорошо проницаемые свободные поры поверхностной подстилки. В дальнейшем осуществляется миграция нефтепродуктов в подстилающие более плотные слои почвы.

Рассчитать время полного очищения почвы от нефтепродуктов за счет деградации и растворения осадками.

Исходные данные. Объем разлитого дизельного топлива: $V_{\text{НП}} = 15 \text{ м}^3$.

Плотность дизельного топлива: $\rho_{\text{Н}} = 900 \text{ кг/м}^3$.

Отношение вязкостей дизельного топлива и воды – $\mu_{\text{Н}}/\mu_{\text{В}} = 4$.

Толщина поверхностной подстилки на промплощадке:

$H_{\text{А}} = 20 \text{ см} = 0,2 \text{ м}$.

Пористость подстилки – $P_{\text{А}} = 0,4$.

Влажность подстилки – $W_{\text{А}} = 0,05$.

Пористость почвы – $P = 0,4$.

Влажность почвы – $W = 0,07$.

Коэффициент фильтрации почвы – $K_0 = 1 \text{ м/сут}$.

Температура воздуха и нефти в момент аварии – $20 \text{ }^\circ\text{С}$.

Годовая норма осадков – $h = 466 \text{ мм}$.

Коэффициент деградации нефтепродуктов в подстилке и почве $\lambda = 0,01 \text{ сут}^{-1}$.

Решение.

Вычисляем нефтеемкость почвы:

$$\theta_{\text{Н}} = P - W = 0,4 - 0,07 = 0,33.$$

Вычисляем нефтеемкость подстилки:

$$\theta_{\text{АН}} = P_{\text{А}} - W_{\text{А}} = 0,4 - 0,05 = 0,35.$$

Примем по таблице 10.1 удерживающую способность для почвы

$R = 25$ и для подстилки $R_{\text{А}} = 8$.

Остаточная нефтеемкость почвы:

$$\theta_{\text{Г}} = R/(1000 P) = 25/(1000 \cdot 0,4) = 0,063.$$

Остаточная нефтеемкость подстилки:

$$\theta_{\text{АГ}} = 8/(1000 \cdot 0,4) = 0,02.$$

Вычисляем интенсивность впитывания нефтепродуктов в почву из подстилки:

$$q_0 = K_0 \cdot \mu_B / \mu_H ((\theta_H - \theta_G) / (P - \theta_G))^2 = 1 \cdot 0,25 ((0,33 - 0,063) / (0,4 - 0,063))^2 = 0,157 \text{ м/сут.}$$

Начальный объем нефтепродуктов (нефтеемкость) в подстилке после аварии:

$$V_{A0} = H_A \theta_{AH} = H_A (P_A - W_A) = 0,35 \cdot 0,2 = 0,07 \text{ м.}$$

Остаточная нефтеемкость подстилки:

$$V_{AG} = \theta_{AG} H_A = 0,02 \cdot 0,2 = 0,004 \text{ м.}$$

Определяем время впитывания нефтепродуктов из подстилки в почву, то есть время, за которое содержание дизельного топлива в подстилке уменьшится до величины остаточной нефтеемкости:

$$t_{VR} = (V_{A0} - V_{AG}) / q_0 = (0,07 - 0,004) / 0,157 = 0,42 \text{ сут.}$$

Объем нефтепродуктов, впитавшихся в почву, можно оценить по формуле:

$$V(t_{VR}) = V_{A0} - V_{AG} = H_A (\theta_{AH} - \theta_{AG}) = 0,2 \cdot (0,35 - 0,02) = 0,066 \text{ м.}$$

Средняя интенсивность растворения нефтепродуктов проникающими в подстилку дождевыми осадками:

$$J = \frac{0,466}{365} \cdot \frac{0,122}{900} = 1,73 \cdot 10^{-7} \text{ м/сут.}$$

Вычисляем время, необходимое для очищения подстилки от нефтепродуктов за счет деградации и вымывания осадками в растворенном виде

$$t_0 = -\frac{1}{0,01} \ln \left(\frac{1,73 \cdot 10^{-7}}{0,01 \cdot 0,004 + 1,73 \cdot 10^{-7}} \right) = -100 \ln \frac{0,0173}{4,0173} = 544,7 \text{ сут.}$$

Время полного очищения подстилки от дизельного топлива с момента аварии:

$$t_A = t_{VR} + t_0 = 0,42 + 544,7 = 545 \text{ сут.}$$

Объем нефтепродуктов в почве на момент t_0 :

$$V(t_0) = 0,066 \exp(-0,01 \cdot 544,7) = 2,84 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Вычисляем время полного очищения почвы от нефтепродуктов:

$$t^0 = -\frac{1}{0,01} \ln \left(\frac{1,73 \cdot 10^{-7}}{0,01 \cdot 2,84 \cdot 10^{-4} + 1,73 \cdot 10^{-7}} \right) = -100 \ln \frac{1,73 \cdot 10^{-7}}{3,013 \cdot 10^{-6}} = 286 \text{ сут.}$$

Суммарное время, необходимое для полного очищения почвы после аварии, определяется по формуле:

$$t_{\text{полн}} = t_{VR} + t_0 + t^0 = 0,4 + 544,7 + 286 = 831 \text{ сут.}$$

Площадь загрязнения земной поверхности:

$$F = 15 / 0,07 = 214 \text{ м}^2.$$

Радиус пятна разлива:

$$r = \sqrt{(214 / 3,14)} = 8,3 \text{ м.}$$

Максимальная глубина промачивания почвы:

$$L_{\text{max}} = 0,066 / 0,063 = 1,05 \text{ м.}$$

Пример 10.2. Определить экологический ущерб, вызванный вымыванием нефтепродуктов из почвы осадками при инфильтрационном питании грунтовых вод.

Региональный коэффициент экологической значимости состояния водных объектов $K_{ЭВ} = 1,04$, базовый норматив платы за сброс нефтепродуктов в поверхностные и подземные воды $H_{БВ} = 22750$ руб/тонн [18], коэффициент инфляции в 2015 году $K_{И} = 1,98$, в 2016 году – 2,07, в 2017 – 2,16 [19]. Массу растворившихся нефтепродуктов вычислить по данным предыдущей задачи.

Решение.

Объем растворившихся нефтепродуктов:

$$V_p = F \cdot J \cdot t_{\text{полн}} = 214 \cdot 1,73 \cdot 10^{-7} \cdot 831 = 0,031 \text{ м}^3.$$

Масса растворившихся нефтепродуктов:

$$M_p = \rho \cdot V_p = 900 \cdot 0,031 = 27,7 \text{ кг} = 0,028 \text{ т}.$$

Экологический ущерб водной среде:

$$U_B = 5 \cdot 1,04 \cdot 22750 \cdot 1,98 \cdot 0,028 = 6559 \text{ руб}.$$