

УДК 504.054:(665.7:556.322.013)](477)

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЗАЛИШКОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ ЗОНИ АЕРАЦІЇ НАФТОПРОДУКТАМИ НА ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТОВИХ ВОД

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF UNSATURATED ZONE CONTAMINATION WITH RESIDUAL PETROLEUM PRODUCTS ON GROUNDWATER

О.М. Шпак
Olena M. Shpak

Institute of Geological Sciences, NAS of Ukraine, 55-b O. Honchara Str., Kyiv, Ukraine, 01601 (shpak_lena@yahoo.com)

Залишкові нафтопродукти в зоні аерації є джерелом довгострокового забруднення ґрунтів і підземних вод. Використовуючи математичне моделювання, серією модельних експериментів оцінено винос розчинених нафтопродуктів із забрудненої зони аерації, складеної суглинистими та піщаними відкладами, з інфільтраційним потоком у ґрунтові води на трьох ділянках забруднення. Результати моделювання підтвердили, що навіть через сотні років не відбудеться повного виносу залишкового гасу із забрудненої зони аерації, і концентрації гасу у ґрунтових водах перевищуватимуть гранично-допустимі значення.

Ключові слова: зона аерації, ґрунтові води, нафтопродукти, залишкове забруднення, математичне моделювання.

Residual petroleum products in the unsaturated zone represent a long-term source of soil and groundwater contamination. Using mathematical modeling, downward movement of dissolved petroleum products with infiltrating flow from the unsaturated zone consisting of loam and sand into groundwater was assessed at three contaminated sites by the series of modeling experiments. The results of modeling confirmed that even over hundreds of years residual kerosene will not be completely removed from the unsaturated zone, and kerosene concentrations in groundwater will exceed a maximum permissible level.

Key words: unsaturated zone, groundwater, residual contamination, petroleum products, mathematical modeling.

ВСТУП

На ділянках забруднення нафтопродукти (НП) мігрують крізь зону аерації (ЗА), яка на територіях колишніх військових аеродромів, що досліджувались у відділі охорони підземних вод Інституту геологічних наук НАН України, складена переважно еолово-делювіальними суглинистими та піщаними відкладами (Еколого..., 2013). Після відкачки лінз мобільних НП – найбільш небезпечної частини осередку забруднення, частина НП у вигляді залишкової насиченості утримується у ґрунті капілярними силами (Hunt, et al., 1988). Залишкові НП в ЗА можуть стати джерелом довгострокового забруднення ґрунтів і підземних вод, через те, що окремі компоненти, які характеризуються високою розчинністю, здатні вимиватися інфільтраційними водами і потрапляти з ними у водоносний горизонт (Галецкая, Позднякова, 2011; Лукьянчиков, 1984).

Для оцінки ролі ЗА як вторинного джерела забруднення ґрунтових вод виконано математичне моделювання виносу розчинених НП із забрудненої ЗА, складеної суглинистими та піщаними відкладами, з інфільтраційним живленням у перший від поверхні землі водоносний горизонт.

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Зміни у просторі і часі концентрацій забруднювача у сорбованій, рідинній та газовій фазах, що по-

значаються як $C_s(z,t)$, $C_l(z,t)$ та $C_g(z,t)$. Початкова маса забруднювача у ґрунті, розчинена у рідинній фазі, має вигляд:

$$C_l(z,0) = M(z,0) \frac{\rho_b}{\theta},$$

де $C_l(z,0)$ – початкова концентрація забруднювача у рідинній фазі (г/мл); $M(z,0)$ – початкова маса забруднювача на одиницю маси ґрунту в точці z (г/г ґрунту); θ – об'ємний вміст вологи; ρ_b – щільність скелету ґрунту (г/см³).

Концентрація забруднювача у рідинній фазі описується рівнянням адвекції:

$$\frac{\partial C_l}{\partial t} = - \frac{q}{\theta} \frac{\partial C_l}{\partial z},$$

де q – швидкість інфільтраційного потоку.

Загальна маса забруднювача в ґрунті розраховується наступним чином:

$$M_T(z,t) = [\theta C_l + (\phi - \theta) C_g + \rho_b C_s],$$

де ϕ – пористість ґрунту.

Далі оцінюються фазові концентрації забруднювача:

$$C_g(z,t) = \frac{K_H M_T(z,t)}{[\theta + (\phi - \theta) K_H + K_d \rho_b]};$$

$$C_1(z, t) = \frac{M_T(z, t)}{[\theta + (\phi - \theta)K_H + K_d\rho_b]};$$

$$C_s = \frac{K_d M_T(z, t)}{[\theta + (\phi - \theta)K_H + K_d\rho_b]},$$

де $K_d = K_{oc} f_{oc}$ – коефіцієнт розподілу (мл/г): K_{oc} – коефіцієнт розподілу органічного вуглецю забруднювача; f_{oc} – вміст органічного вуглецю у ґрунті.

ПОСТАНОВКА ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Постановка обчислювальних експериментів полягає у розв’язанні серії одномірних вертикальних задач виносу розчинених НП із ЗА, складеної суглинистими та піщаними відкладами з різними фільтраційними властивостями. Для розрахунків використана програма VLEACH – одномірна кінцево-різницева модель переносу забруднювачів зі стаціонарним потоком вологи у ненасиченій зоні ([<http://www.epa.gov/ada/csmos/models/vleach.html>]).

В першому модельному експерименті розглянуто забруднення залишковим авіаційним гасом ЗА, складеної лесовидними легкими та середніми суглинками, яке спостерігається в районі військової авіабази поблизу м. Умань. В результаті багаторічних втрат авіаційного гасу за час експлуатації складу паливно-мастильних матеріалів на поверхні водоносного горизонту в лесовидних суглинках сформувалась лінза мобільного гасу, максимальною потужністю 1,77 м. Після відкачки шару мобільного гасу зона аерації забруднена залишковим гасом. Потужність ЗА становить 6 м, потужність забрудненої зони над рівнем ґрунтових вод (РГВ) – близько 1 м.

Область моделювання була розбита на два полігони, розміром 20х20 м кожний, з фільтраційними параметрами, що відповідають легким та середнім суглинкам. Для кожного полігону була розв’язана одномірна вертикальна задача. Па-

раметри суглинистих відкладів використані за даними досліджень в районі військової авіабази м. Умань (Результати ..., 2008) і становлять для легких і середніх суглинків, відповідно: залишковий вміст гасу – 0,07, вміст води – 0,32 та 0,36, пористість – 0,52 та 0,53, щільність скелету ґрунту – 1,47, вміст органічного вуглецю – 0,0052. Фізико-хімічні властивості авіаційного гасу (розчинність, коефіцієнт дифузії, константа Генрі, коефіцієнт розподілу вуглецю) запозичені з бази даних програми. Концентрації гасу у ґрунті з глибиною задавались як початкові умови. Найбільші концентрації гасу – 37380 мг/кг породи, що відповідає залишковому вмісту гасу 0,07, задані в блоках, де знаходилась лінза мобільного гасу до відкачки.

На виході отримували значення масопотоку гасу у ґрунтові води (Q). Концентрації гасу, що потрапляють з інфільтрацією у водоносний горизонт, розраховані наступним чином: $C = Q / (W \cdot S)$, де $W=0,02$ м/рік – середньобагаторічна інтенсивність інфільтраційного живлення для території досліджень; S – площа полігону (табл. 1).

Згідно з результатами моделювання, навіть через 500 років не відбудеться повного виносу залишкового гасу із забрудненої ЗА. Концентрації авіаційного гасу у ґрунтових водах становлять для легких та середніх суглинків – відповідно 0,5 мг/л та 0,45 мг/л, що перевищує гранично-допустиму концентрацію (ГДК) авіаційного гасу (0,1 мг/л).

В другому модельному експерименті розглянуто забруднення ЗА, складеної лесовидними суглинками в районі військового аеродрому Кульбакіне (м. Миколаїв). Лінза авіаційного гасу сформувалась в товщі важких суглинків. Потужність забрудненої зони змінюється від 1 до 5 м. Проведена відкачка дозволила видалити лише 20% мобільного гасу.

В процесі моделювання розглянуті два варіанти забруднення:

полігон 1 – потужність забрудненої ЗА над РГВ становить близько 5 м: чотириметрову товщу займає зона із залишковим вмістом гасу 0,068, що відповідає розташуванню лінзи мобільного гасу до відкачки, та 90 см із залишковим вмістом гасу 0,016 у капілярній каймі;

Таблиця 1. Концентрації авіаційного гасу, що потрапляють з інфільтраційним потоком із забрудненої ЗА, складеної легкими та середніми суглинками, у ґрунтові води
Table 1. Aviation kerosene concentrations entering with an infiltration flow from contaminated unsaturated zone consisting of light and medium loam into groundwater

Склад порід	Концентрації авіаційного гасу (мг/л)									
	Час (роки)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Легкі суглинки	20	17,45	15,18	13,17	11,4	9,83	8,47	7,28	6,24	5,35
Середні суглинки	19,6	17,23	15,06	13,13	11,4	9,88	8,53	7,35	6,32	5,43

полігон 2 – потужність забрудненої ЗА сягає приблизно 1,3 м: зона із залишковим вмістом гасу 0,05 відповідає лінії мобільного гасу, потужністю 1 м, та зона із залишковим вмістом гасу 0,02 у капілярній каймі, яка дорівнює 30 см.

Параметри важких суглинків (залишковий вміст гасу, вміст води – 0,34, ефективна пористість – 0,48) взяті за даними досліджень в районі військового аеродрому Кульбакіне, м. Миколаїв (Еколого..., 2013). Розміри полігонів, часова та просторова розбивка залишилися такими, як і в першому модельному експерименті.

У табл. 2 показані розраховані концентрації авіаційного гасу, що потрапляють у ґрунтові води.

В третьому модельному експерименті розглядається винос залишкового авіаційного гасу із ЗА, складеної піщаними відкладами, після відкачки мобільного гасу в районі авіаремонтного заводу м. Біла Церква (Виконання ..., 2008). ЗА, складена середньозернистими та дрібнозернистими пісками, забруднена залишковим гасом, вміст якого становить 0,032, що відповідає концентрації гасу – 18690 мг/кг породи. Потужність забрудненої ЗА над РГВ сягає близько 1 м. Ефективна пористість середньо- та дрібнозернистих пісків становить 0,38 та 0,43, об’ємний вміст води – 0,057

та 0,065, відповідно. Для порівняння розглянуті піски Обухівського кар’єру, фільтраційні параметри яких відрізняються від білоцерківських: ефективна пористість – 0,29, об’ємний вміст води – 0,032 та залишковий вміст гасу – 0,035.

Область моделювання була розбита на три полігони, розміром 20х20 м кожний. Розраховані концентрації авіаційного гасу, які потрапляють з інфільтраційним живленням в ґрунтові води протягом 100 років, наведені в табл. 3. Через 500 років концентрації авіаційного гасу у ґрунтових водах становитимуть 0,36 мг/л для середньозернистих пісків, 0,25 мг/л для дрібнозернистих пісків та 0,52 мг/л для пісків Обухівського кар’єру.

ВИСНОВКИ

Отримані результати моделювання свідчать про те, що винос розчинених НП з інфільтраційним потоком із забрудненої ЗА, складеної суглинками та піщаними відкладами, буде відбуватись протягом тривалого часу і становить небезпеку для першого від поверхні землі ґрунтового водоносного горизонту. Навіть через 500 років не відбудеться повного виносу залишкового гасу із забрудненої ЗА, і концентрації гасу у водоносному горизонті перевищуватимуть ГДК.

Таблиця 2. Концентрації авіаційного гасу, що потрапляють з інфільтраційним потоком із забрудненої ЗА, складеної важкими суглинками, у ґрунтові води

Table 2. Aviation kerosene concentrations entering with an infiltration flow from contaminated unsaturated zone consisting of heavy loam into groundwater

Потужність забрудненої зони, м	Концентрації авіаційного гасу (мг/л)									
	Час (роки)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
5,0	86,9	80	73,5	67,1	61,0	54,88	48,75	42,88	37,13	31,6
1,3	48,6	40,38	31,7	23,6	16,8	11,5	7,7	4,96	3,15	1,98

Таблиця 3. Концентрації авіаційного гасу, що потрапляють з інфільтраційним потоком із забрудненої ЗА, складеної піщаними відкладами, у ґрунтові води

Table 3. Aviation kerosene concentrations entering with an infiltration flow from contaminated unsaturated zone consisting of sand into groundwater

Склад порід	Концентрації авіаційного гасу (мг/л)									
	Час (роки)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Середньозернисті піски (Біла Церква)	6,61	6,05	5,53	5,06	4,63	4,24	3,87	3,54	3,24	2,96
Дрібнозернисті піски (Біла Церква)	6,04	5,47	4,95	4,5	4,06	3,68	3,33	3,02	2,73	2,47
Піски Обухівського кар’єру	4,63	4,35	4,1	3,85	3,62	3,4	3,2	3,0	2,82	2,65

REFERENCES:

Galetskaia I.V., Pozdnyakova I.A., 2011. About the problem of groundwater and unsaturated soil contamination with petroleum products and surface-active substances within urban areas. Geoeology (Geoeekologija), № 4, pp. 337-343. (In Russian).

Галецкая И.В. К проблеме загрязнения подземных вод и пород зоны аэрации нефтепродуктами и ПАУ на городских территориях / Галецкая И.В., Позднякова И.А. // Геоэкология. – 2011. № 4. – С. 337-343.

Lukianchikov V.M., 1984. Sources of groundwater contamination with hydrocarbons and methods of studying. In: Study and prediction of regional hydrogeological and engineering geological conditions under the influence of anthropogenic factors. Moscow, VSEGINGEO, pp. 48-52. (In Russian).

Ognianik M.S., 2008. Carrying out of geoecological works on survey of the territory of A 2791 military base (Bila Tserkva, Kiev region): Report on scientific research. Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine; Kyiv, No ДР0108U010502. 41 p. (In Ukrainian).

Ognianik M.S. (the head), 2008. The results of geoecological survey of the territory of the former military airfield (Uman town): Report on scientific research. Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Closed corporation «Hydroecofactor». Kyiv, No ДР0108U010502, 39 p. (In Ukrainian).

Ognianik N.S., Paramonova N.K., Bricks A. L., 2013. Environmental and hydrogeological monitoring of sites contaminated with light petroleum products, Kiev, LAT & K, 254 p. (In Russian).

Hunt J.R., Sitar N., Udell K.S., 1988. Nonaqueous phase liquid transport and clean up. Water resources research. Vol. 24, No. 8, pp. 1247-1258. (In English).

<http://www.epa.gov/ada/csmos/models/vleach.html>

Лукьянчиков В.М. Источники углеводородного загрязнения подземных вод и методы его изучения / Лукьянчиков В.М. // Изучение и прогноз региональных гидрогеологических и инженерно-геологических условий под влиянием техногенных факторов. – М.: ВСЕГИНГЕО, 1984. – С. 48-52.

Виконання геоекологічних робіт з обстеження території військової частини А 2791, м. Біла Церква, Київської обл.: Звіт про НДР / Ін-т геол. наук НАН України; кер. М.С. Огняник. – К., 2008. – № ДР0108U010502. – 41 с.

Результати еколого-геологічного обстеження району розташування колишнього військового аеродрому м. Умань: Звіт про НДР / Ін-т геол. наук НАН України, ЗАТ «Гідроекофактор»; кер. М.С. Огняник. – К., 2008. – 39 с.

Эколого-гидрогеологический мониторинг территорий загрязнения геологической среды легкими нефтепродуктами / Н.С. Огняник, Н.К. Парамонова, А.Л. Брикс и др. – К: LAT & K, 2013. – 254 с.

Hunt J.R. Nonaqueous phase liquid transport and clean up / Hunt J.R., Sitar N., Udell K.S. // Water resources research. – 1988. – Vol. 24, No. 8. – P. 1247-1258.

<http://www.epa.gov/ada/csmos/models/vleach.html>

Manuscript resived 23 November 2015; revision accepted 12 April 2016

Інститут геологічних наук НАН України,
Київ, Україна

Е.Н. Шпак

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЗОНЫ АЭРАЦИИ НЕФТЕПРОДУКТАМИ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ГРУНТОВЫХ ВОД

Остаточные нефтепродукты в зоне аэрации являются источником длительного загрязнения грунтов и подземных вод. Используя математическое моделирование, с помощью серии модельных экспериментов выполнена оценка выноса растворенных нефтепродуктов из загрязненной зоны аэрации, сложенной суглинистыми и песчаными отложениями, с инфильтрационным потоком в грунтовые воды на трех загрязненных участках. Результаты моделирования подтвердили, что даже через сотни лет не произойдет полный вынос остаточного керосина из загрязненной зоны аэрации, и концентрации керосина в грунтовых водах будут превышать гранично-допустимые значения.

Ключевые слова: зона аэрации, грунтовые воды, остаточное загрязнение, нефтепродукты, математическое моделирование.