

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КАПІЛЯРНОГО ПІДНЯТТЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД НА РОЗПОВСЮДЖЕННЯ НАФТОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ В ҐРУНТАХ

Е.Е. Скиба, Я.М. Семчук

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42196,
e-mail: Elichka_jan@mail.ru

Розглядається теорія формування капілярних явищ у глинах, суглинках, супісках та пісках. Встановлено, що висота і швидкість капілярного підняття підземних вод різні і зростає зі збільшенням дисперсності ґрунтів. Експериментально на фізичній моделі одержано дані щодо висоти капілярного підняття води у ґрунтах і досліджено його вплив на розповсюдження нафтового забруднення. Встановлено, що капілярні сили утримують нафтовий ареал у ґрунтах на певній висоті від рівня ґрунтового потоку.

Ключові слова: капілярне підняття підземних вод, капілярна облямівка, фізична модель, фільтрація та інфільтрація.

Рассматривается теория формирования капиллярных явлений в глинах, суглинках, супесях и песках. Установлено, что высота и скорость капиллярного поднятия подземных вод не одинакова и возрастает с увеличением дисперсности почв. Экспериментально на физической модели получены данные по высоте капиллярного поднятия воды в грунтах и исследовано его влияние на распространение нефтяного загрязнения. Установлено, что капиллярные силы удерживают нефтяной ареал в почвах на определенной высоте от уровня грунтового потока.

Ключевые слова: капиллярное поднятие подземных вод, капиллярная кайма, физическая модель, фильтрация и инфильтрация.

The theory of capillary phenomena formation is considered in clay, loam, sandy loam and sand. It has been determined height and capillary rise rate of underground water differs and grows with increase of soils dispersion. The data of capillary rise of water in soils has been simulated and the effect upon oil pollution spread has been investigated. It has been proved capillary forces hold oil area in soils at the certain height of the soil flux.

Keywords: capillary rise of underground water, capillary fringe, physical model, filtration and infiltration.

Актуальність роботи. Проблема захисту ґрунтів від забруднення в даний час є важливою складовою частиною загальної проблеми охорони навколишнього природного середовища. Ґрунти – це природні утворення, яким властива родючість – здатність забезпечувати рослини речовинами, необхідними для їх життєдіяльності, а також насиченість водою та повітрям. Ґрунт – багатофункціональні системи, що мають важливе екологічне значення. Вони виконують такі основні функції:

- середовище існування;
- акумулятор і джерело речовини та енергії для організмів;
- проміжний ланцюг між біологічним і геологічним кругообігами;
- захисний бар'єр;
- умови для нормального функціонування біосфери загалом. Ці функції ґрунтів утворюють їх екологічний потенціал [1].

В роботах Я.М. Семчука, Р.М. Говдяка, Л.М. Горєва, М.В. Седенка, О.К. Ланге, В.М. Артамонова та інших встановлено, що на масштаби забруднення ґрунтів впливають капілярні явища.

Отже, актуальним залишається проведення дослідження капілярного підняття підземних вод на розповсюдження нафтового забруднення в ґрунтах. Капілярне підняття розчинів зумовлене наявністю у товщі ґрунтів малих пор, тріщин, порожнин, які володіють капілярними властивостями. Капілярні явища є причиною

формування порових вод у породах зони аерації, в тому числі капілярної облямівки [2].

Метою є дослідження впливу капілярного підняття підземних вод на розповсюдження нафтового забруднення в ґрунтах.

Матеріал і результати досліджень. У даній статті досліджено, що висота капілярного підняття, пов'язаного з силами поверхневого натягу води, залежить від розміру пор – капілярів, механічного складу порід, однорідності і форми пор, густини, температури, мінералізації та іонно-сольового складу вод. Зі зменшенням мінералізації і температури поверхневий натяг збільшується, що сприяє вищому капілярному підняттю води; збільшення густини води діє в зворотному напрямі [3].

Для визначення впливу капілярного підняття води на розповсюдження нафтового забруднення в ґрунтах нами проведено експериментальні дослідження: фізичне моделювання процесу просочування крізь проникні ґрунти [4].

Через різке зменшення в'язкості води з підвищенням температури її поверхневий натяг суттєво зменшується. Висоту капілярного підняття в метрах визначають за формулою (1):

$$h_k = \frac{2\sigma \cdot 10^{-4}}{r \cdot \delta \cdot g}, \quad (1)$$

де: h_k – висота капілярного підняття; σ – поверхневий натяг; r – ефективний радіус капілярів; δ – густина води.

При $g=9,81$ та $\sigma=74 \cdot 10^{-3}$ Н/м формулу (1) спрощують:

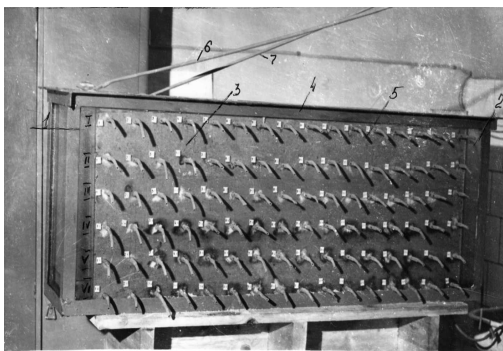
$$h_k = \frac{0,15 \cdot 10^{-5}}{r \cdot \delta} \quad (2)$$

У піщано-глинястих породах висоту капілярного підняття визначають за формулою (3):

$$h_k = 0,446 \frac{1-n}{n} \cdot \frac{10^{-2}}{D} \quad (3)$$

де: n – коефіцієнт пористості, частки одиниці; D – ефективний діючий діаметр капілярів [4].

Лабораторні дослідження процесів формування нафтового забруднення в зоні аерації проводилося на фільтраційному лотку, виготовленому із оргскла [5]. Робоча довжина лотка – 120 см ширина – 25 см висота – 50 см (рис. 1). Рух води в ньому підтримувався шляхом перекачування із камери живлення у камеру розвантаження при встановленому перепаді рівнів між камерами 0,02 м. Вздовж бокових стінок робочої частинки лотка, по сітці 8x8 см розміщені п'езометри, за допомогою яких визначили рівні води. Із них відбирали проби води на хімічний аналіз.



1 – камера живлення; 2 – камера розвантаження; 3 – робоча частина лотка; 4 – металевий каркас; 5 – п'езометр і його координати; 6 – підведення нафти; 7 – підведення води; I – VI – номери горизонтальних рядів п'езометрів

Рисунок 1 – Фізична модель фільтрації сирої нафти

В якості моделі ґрунту використовували відмитий кварцовий пісок із розміром зерен 0,1–0,2 мм. Для усунення пристінного ефекту до внутрішньої стінки робочої камери наклеєний шар піску. З метою одержання оптимальної упаковки зерен лоток у процесі заповнення піддавався вібрації.

Пористість ґрунту визначена за вагою сухого піску, яким заповнювався лоток, і його об'ємною вагою; коефіцієнт фільтрації ґрунту (після заповнення, насичення моделі водою і створення потоку) визначений за витратою фільтраційного потоку, поперечному перерізу лотка і градієнта напору.

При моделюванні руху потоку на моделі необхідним є виконання умов лінійного закону

фільтрації, при якому дійсна швидкість фільтрації на моделі не повинна перевищувати критичну. Рух потоку моделюють за лінійним законом, згідно з яким:

$$V_{кр} = \frac{\varepsilon}{\alpha} \quad (4)$$

де: $V_{кр}$ – критична швидкість фільтрації що визначає верхню границю застосування закону Дарсі, см/с;

ε – допустима похибка у розрахунках;

α – коефіцієнт нелінійної фільтрації.

Згідно даних, що наведені у роботі [6], для пилюватих пісків $\alpha=0,1$. Допустима похибка у розрахунках не повинна перевищувати 10%. При цих значеннях критична швидкість фільтраційного потоку дорівнює 1 см/с, що набагато вище значень дійсної швидкості фільтрації у моделі ($9,4 \cdot 10^{-4}$ – $1,4 \cdot 10^{-3}$ см/с). Ґрунтовий потік (потік – носій) створювався шляхом подавання в камеру живлення води з постійною витратою. Рівень води у камерах регулювався системою кранів, розміщених на шлангах.

Моделювання глибини забруднення сировою нафтою проникних однорідних ґрунтів (пісків із розміром зерен 0,1–0,2 мм), що перекривають водний потік, проводилося на фільтраційному лотку. При цьому рівень води співпадав із лінією п'езометрів IV ряду (30 см. від дна лотка). На поверхні моделі була створена заглибина у вигляді сферичного сегмента об'ємом 100 см³, що заповнювалася сировою нафтою.

При такому моделюванні на фізичній моделі припускаємо, що витікання сирої нафти та нафтопродуктів відбувається у межах природної котловини з геометричним наближенням, наприклад, у вигляді сферичного сегмента. Тоді поточний об'єм розливання (V) дорівнюватиме:

$$V = \frac{\pi}{6} h_\lambda (3R_s^2 + h_\lambda^2) \quad (5)$$

а площа змоченої нафтою поверхні ґрунту:

$$S = 2\pi \cdot R_k \cdot h_\lambda \quad (6)$$

де: h_λ – глибина заповнення котловини;

R_s – радіус “дзеркала” нафти;

R_k – радіус сферичного сегмента.

Таким чином, поточний матеріальний баланс (витік нафти та її випаровування) пов'язаний з геометричними характеристиками поверхні.

Дослідженням встановлено, що об'єму інфільтрованої у ґрунт нафти недостатньо для досягнення водоносного горизонту: у ґрунті утворилося об'ємне, всяче “тіло” насичення, яке протягом 50 днів не збільшилось у розмірі.

Утримування тіла насичення, мабуть, досягається за рахунок сил поверхневого натягу. Сили гравітації у цьому випадку незначні і ролі не відіграють.

При досягненні нафтопродуктами водоносного “горизонту” встановлено, що забрудненню нафтопродуктами піддається тільки його верхня частина. У випадку коливання рівня водного потоку нафтове забруднення може охопити весь об'єм водоносної зони.

Таблиця 1 – Висота капілярного підняття над водоносним ґрунтом згідно з даними моделювання (масштаб моделювання 30:1)

Коефіцієнт пористості пісків, n	Висота капілярного підняття, см	
	у моделі	у природі, при $\alpha_z = 30$
0,65	0,6	18,0
0,55	0,65	19,5
0,45	0,7	21,0
Коефіцієнт пористості супісків, n	Висота капілярного підняття, см	
	у моделі	у природі, при $\alpha_z = 30$
0,75	3,5	105
0,65	4,0	120
0,55	4,8	144
Коефіцієнт пористості суглинків, n	Висота капілярного підняття, см	
	у моделі	у природі, при $\alpha_z = 30$
0,85	5,1	153
0,75	8,3	249
0,65	9,9	297
Коефіцієнт пористості глин, n	Висота капілярного підняття, см	
	у моделі	у природі, при $\alpha_z = 30$
0,85	20,4	612
0,75	25,5	765
0,65	32,2	966

Наступним етапом лабораторних робіт було дослідження формування нафтового забруднення у неоднорідних ґрунтах. Для цього у фільтраційний лоток вище водного потоку окремо розміщували шар пісків з меншим коефіцієнтом пористості, ніж пористість водоносних ґрунтів. Так, у дослідах коефіцієнт пористості пісків водного потоку впродовж проведення експериментів був постійним і становив 0,75.

Шари піску, яким заповнювали лоток вище водного потоку, у кожній серії дослідів мали коефіцієнт пористості відповідно: 0,65, 0,55, 0,45.

Аналогічно проводяться досліди з супісками, суглинками та глинами (табл. 1).

За даними роботи [7] в районах, де над водоносним горизонтом залягають малопроникні ґрунти, створюються умови для формування у них капілярної облямівки, яка утримується силами поверхневого натягу. Крім цього, капілярні явища зумовлюються виникненням капілярного тиску P , який зв'язаний з поверхневим натягом σ формулою Лапласа:

$$P = 2\sigma / r, \quad (7)$$

де r – радіус кривизни поверхні рідини.

Метою чотирьох дослідів (по три серії лабораторних робіт) було виявлення впливу капілярної облямівки на процес формування нафтового забруднення над водоносним горизонтом.

Дослідженнями встановлено, що сформоване нафтове забруднення досягає модельного водоносного горизонту, забруднюючи його (рис. 2).

Формування капілярної облямівки у лотку відбувалося за дійсної швидкості фільтраційного потоку – 1,50 м/добу протягом 20–30 днів.

Висота капілярного підняття у моделі залежить від коефіцієнта пористості ґрунтів, причому чим менший коефіцієнт пористості, тим більша висота капілярного підняття (табл. 1). Висота змінювалася від 0,6 до 0,7 см для пісків, від 3,5 до 4,8 см для супісків, 5,1–9,9 см – для суглинків, 20,4–32,2 см – для глин, що відповідає натурним умовам відповідно 18–21 см, 105–144 см, 153–297 см, 612–966 см.

Після формування капілярної облямівки у заглибину на поверхні ґрунту (у вигляді сферичного сегмента) подавалася сира нафта з витратою 0,0005 м³/добу.

Дослідженням встановлено, що сформована капілярна облямівка по всій довжині моделі є прошарком який розділяє ґрунти з різною проникністю. В усіх серіях дослідів встановлено, що нафтове “тіло” насичення розміщується вище капілярної облямівки і безпосередньо не контактує з водним потоком, тобто капілярна облямівка є буфером (екраном), що не допускає забруднення водоносного горизонту (рис. 3).

Для пояснення результатів дослідів на фізичній моделі необхідно застосувати критерії подібностей, за якими за результатами на основі яких із лабораторних спостережень можна зробити достовірні висновки про хід процесів у реальних умовах. Загалом для проведення фізичного моделювання процесів, схожих природі, необхідно, щоби:

а) процеси в моделі і в природі описувалися математично тотожно;

б) досягались тотожні перетворення масштабів початкових і граничних умов;

в) в результаті масштабних перетворень модель була б геометрично схожа природній.



■ – нафтове “тіло” насичення

Рисунок 2 – Схема розповсюдження у моделі нафтопродуктів у однорідному ґрунті. Об’єм нафтопродуктів, що вилився до формування капілярної облямівки ($P_{в}$) – рівень води у лотку



■ – нафтове “тіло” насичення

Рисунок 3 – Схема розповсюдження у моделі нафтопродуктів у неоднорідному ґрунті (суглинок). Об’єм нафтопродуктів, що вилився після сформування капілярної облямівки ($P_{в}$) – рівень води у лотку

З’ясовано закономірні та розроблено залежність висоти від швидкості капілярного підняття підземних вод у різних видах ґрунтів (рис. 4). Як бачимо.

1. Швидкість капілярного підняття води в суглинках більша ніж в пісках, але висота підняття тим значніша чим дрібнішою є порода.

2. При діаметрі зерен 2-2.5 мм капілярне підняття води майже непомітне.

3. При грудкуватій структурі ґрунту швидкість і висота підняття знижуються у порівнянні з зернами породи.

4. Висота підйому води збільшується у міру ущільнення ґрунту.

5. Камені, що знаходяться в породі або ґрунті, уповільнюють капілярне підняття.

6. При чергуванні різних за механічним складом горизонтів швидкість капілярного під-

няття набагато більша з шару крупнозернистого в дрібнозернистий, ніж у зворотному напрямку.

7. На капілярне підняття води в породі впливають також вологість і температура останньої. Так, підняття води по капілярах із вологої породи в суху може мати місце лише в тому випадку, якщо вологість перших порід вище 50% її повного насичення [8].

Висновки та напрямки подальших наукових досліджень. При капілярному піднятті підземних вод утворюється капілярна облямівка, яка є захисним бар’єром і не допускає забруднення ґрунтів та водоносного горизонту. Внаслідок цього в місцях, де нема капілярного підняття води, утворюються більш-менш великі ареали забруднень, які з часом збільшуються в

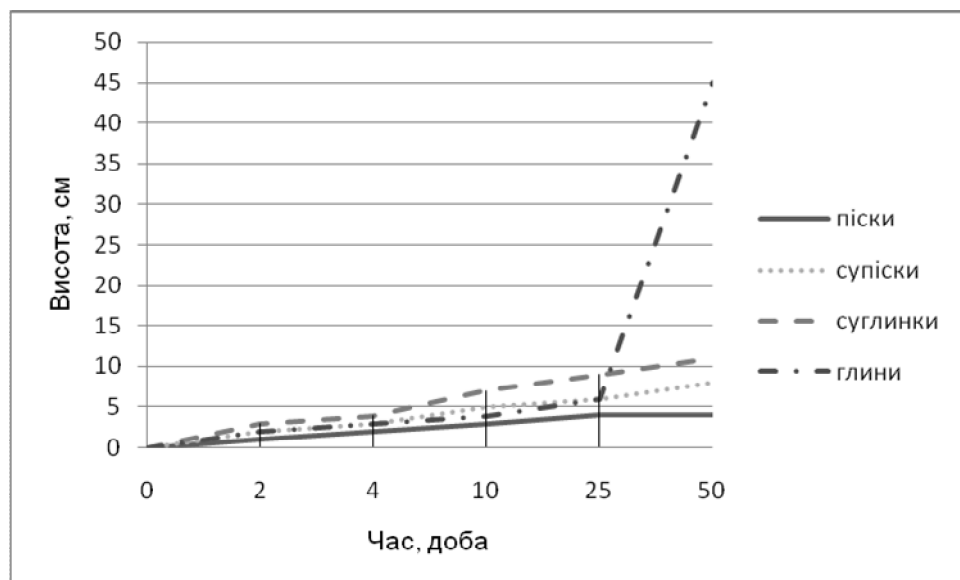


Рисунок 4 – Залежність висоти від швидкості капілярного підняття води в ґрунтах

розмірах і захоплюють великі ділянки. Повна ліквідація утворених ареалів забруднень і відновлення якості ґрунтів є вкрай важким або нездійсненним завданням. Тому часто доводиться обмежуватися заходами, спрямованими лише на локалізацію забруднень і створення умов, що перешкоджають їх подальшому поширенню у ґрунтах і водоносних пластах. Подальші наукові розробки полягатимуть у створенні прогнозної математичної моделі стану підземних вод конкретних родовищ.

Література

- 1 Гавриленко О.Л. Геоекологічне обґрунтування проектів природокористування: навч. посіб. [Текст] / О.Л. Гавриленко. – К.: Ніка-Центр, 2003. – 332 с.
- 2 Кесельман Г.С. Защита окружающей среды при добыче, транспорте и хранении нефти и газа [Текст] / Г.С. Кесельман, Э.А. Махмудбеков. – М.: Недра, 1981. – 256 с.
- 3 Седенко М.В. Основы гидрогеологии и инженерной геологии [Текст] / М.В. Седенко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1979. – 200 с.
- 4 Горев Л.М. Основы моделирования в гидроэкологии: учебник [Текст] / Л.М. Горев. – К.: Либідь, 1996. – 336 с.
- 5 Семчук Я.М. Изучение миграции высокоминерализованных рассолов в районе хвостохранилища Калушского производственного объединения "Ориана" // Совершенствование технологий добычи и переработки калийных руд Прикарпатья. – Черкасы. : ОНИИТЭХИМ. – 1984. – С. 86–95.
- 6 Мироненко В.А. Основы гидрогеомеханики [Текст] / В.А. Мироненко, В.Н. Шестаков. – М.: Недра, 1974. – 296 с.

7 Семчук Я.М. Дослідження особливості формування нафтового забруднення зони аерації на фізичній моделі / Я.М. Семчук, Р.М. Говдяк // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 2001. – Вип.38, Т.2. – С. 151–157. – Сер: Буріння нафтових і газових свердловин.

8 Ланге О.К. Гидрогеология [Текст] / О.К. Ланге. – М.: Высшая школа, 1969. – 367 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
08.11.11

Рекомендована до друку Оргкомітетом
науково-технічної конференції
"Нафтогазова енергетика – 2011",
яка відбулася в ІФНТУНГ
10-14 жовтня 2011 р.