

УДК556.3: 556.34: 551.49.001.57

к.т.н., доцент Обертас І.А.,

obertas@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0003-2006-2877>,

Київський національний університет будівництва і архітектури

ОСНОВНІ МЕХАНІЗМИ ЗАБРУДНЕННЯ ПІДЗЕМНИХ ВОД ТА МЕТОДИ ЙОГО ПРОГНОЗУВАННЯ

Виконано аналіз основних механізмів забруднення підземних вод та запропоновано методика прогнозування міграції забруднень на основі чисельно-аналітичних моделей масопереносу. Підкреслено важливість вибору обґрунтованих значень вхідних параметрів при розв'язках прогнозних задач в залежності від просторової неоднорідності та розмірів досліджуваної області фільтрації. Приведено результати розв'язку методичної задачі розповсюдження забруднюючої речовини в однорідній водоносній товщі.

Ключові слова: забруднення, підземні води, дисперсія, дифузія, масоперенос, моделювання, прогноз

Існуюча проблема забруднення навколишнього середовища і в тому числі підземної гідросфери потребує в наш час більш поглибленого та всестороннього дослідження. При цьому очевидно, що розуміння процесів забруднення підземних вод неможливе без з'ясування його механізмів.

Дослідженню забруднення підземних вод присвячено багато наукових праць. Так, в роботі Алексеева В.С. та ін. [1] приведені теоретичні основи процесів масопереносу в насиченому водному середовищі. В роботах Беляєва Н.Н. та ін. [2,3] описані математичні моделі процесів переносу та забруднення підземних вод і запропоновано методика моделювання цих процесів. Крім того, приводяться результати досліджень основних закономірностей міграції забруднюючих речовин на основі проведених чисельних експериментів. В роботах [4,5,7] запропоновано методика дослідження процесів міграції забруднюючих речовин та приводяться результати вирішення прикладних задач. Теоретичне обґрунтування ефективної експлуатації водозабірних свердловин в умовах кольматажу та методи підвищення їх продуктивності розглянуті в роботі [8].

Узагальнення та аналіз процесів забруднення підземних вод приведено в монографії Мироненко В.М. і Руминіна В.Г. [6], яку можна вважати найбільш систематизованим науковим виданням у даній області досліджень.

Всі вказані вище роботи в основному досліджують математичні моделі забруднення підземних вод і в меншій мірі висвітлюють самі механізми цього процесу, хоча, на наш погляд, їх розуміння є досить важливим.

В даній роботі приводиться аналіз механізмів забруднення підземних вод та методів його прогнозування на основі чисельно-аналітичних моделей геофільтрації та масопереносу. Розглянуто основні механізми забруднення, чисельно-аналітичні моделі прогнозу розповсюдження забруднюючих речовин у підземних водах і приведено розв'язок методичної задачі забруднення підземних вод.

Можна зазначити, що існуючі методики вивчення забруднень підземних вод свідчать про те, що як фундаментальні, так і методичні аспекти дослідження цього процесу ще недостатньо з'ясовані.

В останні роки до проблеми забруднення підземних вод стали підходити із позицій сучасної методології, яка включає в себе обов'язкове проведення польових досліджень, які потім перевіряються і використовуються для ідентифікації систем, що характеризуються своєю структурою, параметрами і поведінкою.

Ці характеристики вивчаються також на фізичних моделях для визначення поведінки систем для спрощених умов.

Такі експерименти дозволяють розглядати і перевіряти моделі та погоджувати їх з вихідними даними.

Коли модель вже створена, то можливі випадки повторних польових досліджень для визначення нових параметрів, які необхідні при створенні моделі в умовах недостатньої інформації. Після цього модель використовується для прогнозування і для співставлення результатів моделювання з натурними даними.

Відомо, що якість води, що використовується для водозабезпечення та технічних потреб, залежить від типу підземних вод, властивостей водоносних горизонтів та фізико-хімічних процесів, що відбуваються у цьому середовищі [1,6-8].

При забрудненні водоносних горизонтів можна виділити декілька відрізків часу переміщення забруднюючих речовин, кожен з яких має свої особливості. Протягом першого відбувається промивання джерел забруднення за рахунок інфільтрації атмосферних опадів та потоків підземних вод в самих горизонтах.

Потім відбувається переміщення забрудненої води і речовин через ненасичену зону у водоносні горизонти, а потім – процес забруднення у самих горизонтах.

Як правило, переміщення забруднюючих речовин відбувається по схемі конвективної дисперсії, яка, в свою чергу, залежить від інтенсивності перемішування забруднюючих речовин з водою та масштабів забруднення. Процеси перемішування та розсіяння забруднюючих речовин у великій мірі залежать від ступені неоднорідності водоносної товщі.

Розповсюдження забруднення не можна вважати чисто механічним процесом, так як водоносні породи не є хімічно інертними і тому потрібно враховувати фізико-хімічні та біологічні механізми, які характеризують обмінні процеси між породою та водою, між зв'язаною і незв'язаною водою та явищем самоочистки підземних вод.

На забруднення підземних вод впливають наступні фактори: механічні (швидкість фільтрації, густина та в'язкість забруднюючих речовин), форма джерел забруднення, тривалість взаємодії та ступінь контакту джерел забруднення і води, процес розбавлення та умови експлуатації горизонтів; геологічні та гідрографічні фактори (властивості порід горизонтів, типи горизонтів, кліматичні і гідрологічні умови); хімічні та біохімічні фактори (хімічні властивості порід і забруднюючих речовин, процеси самоочистки такі, як бактеріологічний розпад, хімічний осад, сорбція, газовий обмін, вплив мікроорганізмів).

Забруднення може бути: мінеральним, хімічним, біологічним, радіоактивним, за рахунок пестицидів та органічних речовин, а за походженням – природне і техногенне (стічні води різного походження).

Як показує досвід, при оцінці забруднень необхідно створювати такі моделі, які найбільш адекватно відображають процес забруднення водного середовища. Використання простих диференціальних рівнянь дифузійного стану є справедливим лише для асимптотичних режимів, які залежать від ступені неоднорідності середовища. При досягненні асимптотичного режиму неоднорідність можна вважати за деяке еквівалентне суцільне гомогенне середовище. Тому проблема масштабу досліджуваного явища є однією із основних при оцінці забруднення. Слід відмітити, що навіть при значних кількостях локальних параметрів, що характеризують середовище на макроскопічному рівні, на мікроскопічному рівні описати його майже не вдається.

Для цього вводять поняття масштабних рівнів досліджень, які змінюються в залежності від ступеня гетерогенності середовища. Як показали численні дослідження, явище забруднення має одну і ту ж природу на кожному рівні, тобто, його можна описувати тими ж самими параметрами, а їх значення несуть у собі важливий зміст, наприклад: в лабораторних умовах значення коефіцієнту розсіювання змінюється від декількох міліметрів до перших сантиметрів, тоді як для масштабу у декілька метрів (наприклад, в зоні дії свердловини) воно може мати значення декількох дециметрів, а в масштабі декількох кілометрів – до кількох десятків метрів.

Адекватність моделі процесу забруднення є необхідною умовою для аналізу та прогнозування його розповсюдження. При цьому повинні бути з'ясовані

проблеми формування джерел забруднення, їх змішування з водоносною товщею, з'ясування вірогідного напрямку розповсюдження та можливість визначення коефіцієнтів розсіювання в польових умовах.

Масоперенос забруднюючої речовини при змішуванні може бути нестійким і замість простого профілю розсіювання можуть розвиватись язики розсіювання внаслідок різниці у густині, швидкостях та величинах в'язкості рідкої фази. Формування язиків можна пояснити тим, що ефект молекулярної дифузії і власне розсіювання за час їх формування проявляється неповністю. З іншої сторони, дослідження цього механізму дозволяє удосконалювати самі моделі процесу забруднення.

Процес розповсюдження забруднення пов'язаний з неоднорідністю порід і з напрямками основного його руху, що залежить від їх локальних неоднорідностей, що впливають таким чином на локальні швидкості переносу забруднень. Визначення і опис напрямків переважного розповсюдження забруднень має велике значення при моделюванні локальних ділянок таких, як, наприклад, зони впливу водозабірних свердловин, де відбувається перерозподіл механічного складу порід, що складають ці зони [8].

У цьому відношенні потік у тріщинуватих породах може розглядатись як масштабна проблема, так як для дослідження забруднення у цих породах при великих масштабах можна перейти до розгляду еквівалентного однорідного середовища. При менших масштабах потік у тріщинуватих породах можна розглядати як такий, що відбувається переважно по основним напрямкам тріщинуватості. При цьому для оцінки масо переносу використовуються різні рівняння відносно їх швидкості перерозподілу в породах..

При забрудненні підземних вод особливе значення має ненасичена зона, яка є проміжною зоною переміщення забруднень, що проникають з поверхні землі у ґрунт і є також місцем проходження різних хімічних реакцій[1,6].

Якість води, яка надходить на поверхню ґрунтових вод залежить від часу її переміщення в ненасиченій зоні і цей час залежить від гідродинамічних особливостей потоку, процесу розсіювання і наявності застійних, нерухомих рідких утворень, які не є частиною основного потоку, але гідравлічно зв'язані з ним і обмінюються з ним забруднюючими речовинами за рахунок молекулярної дифузії. Ці механізми затримують переміщення фронту забруднення по відношенню до потоку води. До проблем, пов'язаних з надходженням забруднень в ненасичену зону, відносяться обмінні процеси між потоком забруднень і водоносним горизонтом.

В насичено-ненасиченому середовищі дуже важливими є обмінні процеси між фазами з участю забруднюючих речовин. Це явище залежить від характеру

забруднюючих речовин, швидкості потоку, фізико-хімічних властивостей і структури пористого середовища.

Важливим моментом при оцінці адсорбційних процесів є експериментальне отримання ізотерм адсорбції, особливо у випадках сповільненої кінетики обмінних процесів в неоднорідному середовищі, наприклад, при збільшенні щільності ґрунту зменшуються його властивості утримувати йод, зменшується також доступ кисню, що створює сприятливі умови для анаеробної обробки забруднюючих речовин.

При визначенні захисних зон та критеріїв захисту від забруднень потрібно досліджувати всі механізми забруднення, описані вище. Взагалі, вони залежать від масштабів досліджуваного процесу, а саме: в зоні впливу водозабірних свердловин вони характеризуються часом перебування забруднюючих речовин і радіусом зони впливу; в масштабі району експлуатації водоносного горизонту і для управління джерелами забруднення необхідно використовувати матеріальний баланс фізико-хімічних обмінних процесів. Для всіх проміжних масштабів необхідно використовувати моделювання, аналітичні залежності та результати експериментальних досліджень [4,5,7].

Як було сказано вище, перенос забруднюючих речовин у водоносних горизонтах обумовлений конвекцією (адвекцією), молекулярною дифузією, адсорбцією і біохімічними процесами. Серед цих механізмів процеси конвекції і дисперсії притаманні усім забруднюючим речовинам. Дисперсію можна визначити як механічне змішування забруднюючих речовин у взаємозв'язаному полі потоку.

Процес дисперсії легко описується математично за допомогою рівняння збереження маси для дисперсійного потоку. На основі принципу збереження маси для елемента потоку можна отримати диференціальне рівняння в часткових похідних для нестационарного двовимірного масопереносу в однорідному ізотропному середовищі типу:

$$D_{ij} \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \right) - V_i \left(\frac{\partial C}{\partial x_i} \right) - \lambda CR = R \frac{\partial C}{\partial t}, i, j = 1, 2 \quad (1)$$

де x_i – декартова координата в i -му напрямку; D_{ij} – тензор коефіцієнту дисперсії; C – концентрація забруднюючої речовини в джерелі забруднення; V_i – середня швидкість води в порах в i -ому напрямку; λ – константа розпаду забруднюючої речовини; R – коефіцієнт ретардації (=1) для консервативного забруднювача, t – час.

Для стаціонарних умов фільтрації двовимірне рівняння записується як

$$D_x \left(\frac{\partial^2 \tilde{N}}{\partial x^2} \right) + D_y \left(\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) - V_x \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) - \lambda CR = R \frac{\partial C}{\partial t} \quad (2)$$

де D_x і D_y – коефіцієнти дисперсії відповідно у повздовжному і поперечному напрямках. Для одновимірної стаціонарної фільтрації без поперечної дисперсії (1) переходить у

$$D_x \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) - V_x \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) - \lambda CR = R \frac{\partial C}{\partial t} \quad (3)$$

$$\text{де, } V_x = \frac{k \partial h}{n_c \partial x}, \text{ а} \quad (4)$$

K – коефіцієнт фільтрації, n_c – пористість,
 h – гідравлічний напір.

При відсутності радіоактивного розпаду, постійній величині концентрації ($C=C_0$) і консервативного забруднювача ($R=1$) рівняння (3) можна записати як:

$$D_x \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) - V_x \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (5)$$

Розв'язок (5) має наступний вигляд:

$$\frac{C(x,t)}{C_0} = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{erfc} \left(\frac{(x - V_x t)}{2\sqrt{D_x t}} \right) + \exp \left(\frac{V_x}{D_x} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{(x + V_x t)}{2\sqrt{D_x t}} \right) \right\} \quad (6)$$

$$\operatorname{erfc}(u) = 1 - \operatorname{erf}(u)$$

У випадку двовимірної стаціонарної фільтрації рівняння (5) можна записати як:

$$D_x \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) + D_y \left(\frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) - V_x \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (7)$$

$(R=1)$

де D_x і D_y – відповідно коефіцієнти дисперсії у напрямках x і y . Для раптової ін'єкції забруднюючої речовини при $t=0$ розв'язок (7), буде:

$$\frac{C(x,y,t)}{C_0} = \left\{ \frac{q}{4\pi n_c D_x D_y t} \right\} \times \left\{ \exp - \left\{ \frac{(x - V_x t)^2}{4D_x t} + \frac{y^2}{4D_y t} \right\} \right\} \quad (8)$$

де q – потік забруднюючої речовини, поданий в водоносний горизонт на одиницю його потужності.

Для розв'язку прогностичних задач масо переносу необхідно досить багато вхідних даних. Їх відсутність є, мабуть, найбільш важливим обмеженням при виборі типу моделі переносу. При цьому доцільно виділити дві основні групи даних. Перша – дані про граничні умови, а саме: геометрію водоносної системи, фільтраційний режим потоку, концентрації забруднюючих речовин, величини водовідбору і т.і. В регіональних моделях всі ці дані складають великі

масиви вхідної інформації, особливо, якщо розглядається сукупність забруднюючих речовин. Внутрішні граничні умови потребують уточнення концентрацій джерел забруднень різного походження, які часто бувають невідомими, хоча може бути відомою загальна маса за бруднення. У таких випадках є можливим використання лінійних рівнянь масопереносу. Зовнішні граничні умови ідентифікуються важче, так як при цьому необхідно мати дані про концентрації забруднюючих речовин по периметру області фільтрації. В цілому вибір граничних умов залежить від характеру фільтраційного потоку на границях моделі. Коли існує елемент невизначеності при виборі граничних умов, то доцільно виконати попередній аналіз чутливості моделі до змін вхідних даних.

Другу групу даних складають параметри, що характеризують водоносну систему і ті процеси, що проходять в ній. Сюди входять дані про коефіцієнти водовіддачі, водопровідності, дисперсії, пористості, про константи швидкостей проходження хімічних реакцій адсорбції, дифузії і т.і. Ці параметри визначаються в результаті проведення дослідно-міграційних та лабораторних досліджень і в процесі верифікації створеної моделі. Аналіз моделей переносу свідчить про те, що вони є досить чутливими до параметрів пористості та водопровідності, так як вони визначають швидкість руху води в порах. Це стосується також і коефіцієнту дисперсії, який залежить від масштабу вибраної моделі [4,6,7].

Заключна перевірка моделі полягає у порівнянні даних моделювання з даними режимних спостережень, якщо вони є. В іншому випадку доцільно проведення багатоваріантних досліджень з використанням аналізу чутливості системи.

На рис.1 приведені криві відносної концентрації забруднюючих речовин, розраховані в результаті вирішення методичної задачі згідно рівняння (6):

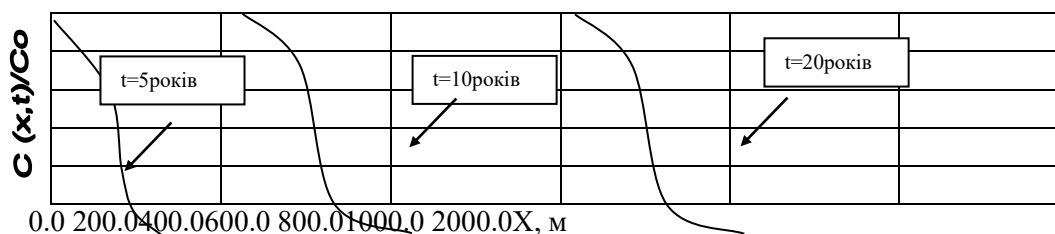


Рис.1.Графіки відносної концентрації $C(x,t)/C_0$ в залежності від відстані X .

До джерела забруднення по результатам вирішення методичної задачі при наступних вхідних даних:

$$V_x=0.1\text{м/добу}, R=1.0, D_x=5\text{м}^2/\text{добу}$$

Як видно з рисунку, на період до 20 років забруднення підземних вод розповсюджується майже на 2000м від джерела забруднення.

Проведений аналіз основних механізмів забруднення підземних вод та методів його прогнозування дозволяє зробити наступні висновки :

1. Процес забруднення підземних вод доцільно розглядати як багатоступіньчастий, що розділяється на декілька періодів часу, кожен з яких має свої особливості. Протягом першого відбувається промивання джерел забруднення за рахунок інфільтрації атмосферних опадів та фільтрації в самих водоносних горизонтах. Потім відбувається переміщення забрудненої води і речовин через ненасичену зону у водоносні горизонти, а потім відбувається забруднення самих горизонтів;

2. Розповсюдження забруднення не можна вважати чисто механічним, так як водоносні породи не є хімічно інертними і при цьому необхідно враховувати фізико-хімічні і біологічні механізми, які характеризують обмінні процеси між породою і водою, між зв'язаною і незв'язаною водою та явищем самоочистки підземних вод;

3. Забруднення підземних вод є багатофакторним процесом, на який впливають механічні, геолого-гідрогеологічні, хімічні, біохімічні фактори, а також процеси самоочистки підземних вод;

4. При прогнозуванні процесів забруднень необхідно створювати такі моделі, що більш адекватно відображають забруднення водного середовища. Використання простих моделей дифузійного типу є справедливим лише для асимптотичних режимів масопереносу.

5. При дослідженні практичних проблем локального характеру, коли необхідно отримати конкретні дані про перенос забруднень на окремих ділянках, доцільно використовувати дво- і трьохвимірні моделі.

6. Незважаючи на те, що за останні роки отримані нові результати в дослідженні забруднення підземних вод, багато питань як, наприклад, питання масштабу досліджуваного явища у кожному конкретному випадку залишаються ще нез'ясованими;

6. Необхідно удосконалювати методи прогнозування процесів забруднення підземних вод. Перспективними можна вважати стохастичні моделі масо переносу і т.і.

Список літератури

1. Алексеев В.С., Коммунар Г.М., Шержуков Б.С. Массоперенос в водонасыщенных горных породах. - М., Наука, 1989. – 144 с.
2. Беляев Н.Н., Коренюк Е.Д., Хрущ В.К. Компьютерное моделирование динамики движения и загрязнения подземных вод. - Днепропетровск, Наука и обр., 2001.- 156 с.
3. Згуровский М.З., Скопецкий В.В., Хрущ В.К., Беляев Н.Н. Численное моделирование распространения загрязнений в окружающей среде. - К.: Наукова думка, 1997. – 368 с.

4. Кремез В.С., Телима С.В. Обгрунтування схем розміщення і параметрів сорбційних бар'єрів для захисту ґрунтових вод від забруднення методами математичного моделювання. Наук. техн. зб. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. - К.: КНУБА, 2016, вип..27. – С. 214-220.

5. Кремез В.С., Телима С.В. Моделювання розповсюдження гомогенних забруднень в потоках ґрунтових вод. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції “Природа для води”. - К.: ІВПМ НААНУ, 2018.-С.47-48.

6. Мироненко В.М., Румынин В.Г. Проблемы гидроэкологии. Том 1. Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов. М., МГУ, 1998. – 610с.

7. Решение задач охраны подземных вод на численны хмоделях. М., Недра, 1992. – 240с.

8. Тугай А.М., Олійник О.Я., Тугай Я.А. Продуктивність водозабірних свердловин в умовах кольматажу. Харків, 2004.- 240с.

к.т.н., доцент Обертас И.А.,

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

ОСНОВНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД И МЕТОДЫ ЕГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ

В работе выполнен анализ механизмов загрязнения подземных вод и предложена методика прогнозирования миграции загрязнений на основе численно-аналитических моделей массопереноса. Показано важность выбора обоснованных значений входных параметров при решении прогнозных задач в зависимости от пространственной неоднородности и размеров исследуемой области фильтрации. Приведены результаты решения методической задачи распространения загрязняющего вещества в однородной водоносной толще.

Ключевые слова: загрязнение, подземные воды, дисперсия, диффузия, массоперенос, уравнение, прогноз.

PHD Obertas I.A.,

Kiev National University construction and architecture

THE MAIN MECHANISMS OF THE GROUND WATERS POLLUTION

In the work the analysis of the mechanisms of the pollution of the groundwaters and the methodic of forecasting of pollution migration on the base of the numerical-analitic masstransfer models are carried out and proposed. The significance of selection of the valid values of the input parameters at solution of the forecasting problems in dependence on spatial heterogeneity and flow domain dimensions is pointed out. The results of the methodic problem solution of pollution materials preading in hogeneous water bearing bed are presented.

Key words: pollution,grounwaters, dispersion, diffusion, masstransfer,equation, forecasting