

УДК 631.03:631.67

СИСТЕМНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ПОШИРЕННЯ ЗАБРУДНЕНЬ В РІЧКАХ ПРИ ВИНИКНЕННІ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ

П.І. Ковальчук, А.В. Герус

Інститут водних проблем і меліорації НААН України

msya220189@rambler.ru

Розглядається математична модель, яка дозволяє описати процес поширення забруднюючих речовин в річках та водосховищах в умовах виникнення аварійних ситуацій.

Ключові слова: пляма забруднень, різницєва схема, математична модель, самоочищення, якість води.

In this work a mathematical model to describe the spread of pollutants in rivers and reservoirs under emergency situations.

Keywords: spot pollution, difference scheme, mathematical model, self-cleaning, water quality.

Рассматривается математическая модель, которая позволяет описать процесс распространения загрязняющих веществ в реках и водохранилищах в условиях возникновения аварийных ситуаций.

Ключевые слова: пятно загрязнений, разностная схема, математическая модель, самоочищение, качество воды.

Постановка задачі. Прогнозування наслідків аварійного скиду забруднюючих речовин у водні об'єкти є одним з найважливіших факторів при оцінці якості води та антропогенного впливу на водне середовище.

В процесі розвитку промисловості створено ряд техногенних водойм, які використовуються для зберігання рідких відходів та відпрацьованих шахтних вод. Значний антропогенний вплив на якість водних ресурсів в басейні р. Інгулець, де було споруджено ряд спеціальних акумулюючих водойм, які накопичують в собі високомінералізовані води із загальною мінералізацією 30-95 г/дм³ [1]. Особливу небезпеку несуть відстійники відпрацьованих вод, утворених в процесі видобутку та переробки урановмісної гірничої маси методом вилуговування сірчаною кислотою.

Одним з найбільших небезпечних є хвостосховище з радіоактивними відходами в балці Щербаківська, яке належить ДП «Східний гірничо-збагачувальний комбінат». Розташоване сховище в Петрівському районі Кіровоградської області на південь від м. Жовті Води за 5 км від житлової зони міста (рис.1).



Рис. 1. Схема розташування об'єктів досліджень

Площа поверхні техногенного відстійника становить 614,94 га, а об'єм 40,7 млн.м³. з абсолютною відміткою рівня води 138,3м. Основними елементами наповнення хвостосховища є залишки збагачення уранових та торієвих руд, а також небезпечні відходи шламу гідроксидів. Спектр радіоактивних речовин у твердій фазі хвостів, які наповнюють хвостосховище, має такий вигляд: Ra²²⁶, To²³⁰, Рb²¹⁰, Ро²¹⁰, U²³⁸ [1].

Накопичення шахтних вод не вирішує питання їх утилізації, тому державою дозволено щорічні спуски в р. Інгулець у зимовий період. При цьому, у зв'язку із зносом основних фондів за досить тривалий час експлуатації, не можна виключати ситуацію із руйнуванням дамби та попадання забруднень до р. Жовтої, р. Інгульця та Карачунівського водосховища, як це було у 1987р., коли з хвостосховища у балці Свистунова до Інгульця потрапило біля 30 млн.м³ шахтних вод [2]. За значний період експлуатації ставків-накопичувачів, вміст яких відносяться до 1 класу небезпеки, існує реальна загроза виникнення аварійних ситуацій з небезпекою забруднення питного водозабору м. Кривий Ріг (рис. 1).

Враховуючи ситуацію, що склалася, ставиться задача розробити адекватну систему математичних моделей, які б описували процес поширення забруднюючих речовин та дозволили на основі розрахунків приймати управлінські рішення з метою прийняття запобіжних заходів при виникненні аварійних ситуацій.

Розробка системної математичної моделі. В процесі дослідження вже існуючих математичних моделей відомі камерна модель масоперенесення [3], розв'язування дифузійних задач методом Монте-Карло [4] та диференціальних рівнянь поширення забруднень [5].

Як найбільш адекватну, пропонуємо тривимірну по глибині модель поширення забруднень у водотоці з процесами сорбції і десорбції в системі «вода-завислі наноси» та випадіння (сорбції) в системі «завислі наноси-донні

випадіння». Математична модель поширення консервативних речовин базується на системі трьох диференціальних рівнянь переносу та дифузії у водному потоці, взаємодії забруднень потоку з завислими наносами та донними відкладеннями:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} a(x) \frac{\partial U}{\partial x} - V(x) \frac{\partial U}{\partial x} - \lambda(x)U + \mu_2(x)S + f(x, t); \\ \frac{\partial S}{\partial t} = \lambda(x)U - (\mu_1(x) + \mu_2(x))S; \\ \frac{\partial R}{\partial t} = \mu_1(x)S. \end{cases} \quad (1)$$

де $U(x, t)$ – концентрація забруднюючої речовини у водотоці (в частках від $U_{ГДК}$, об'ємної гранично допустимої концентрації забруднюючих речовин); $S(x, t)$ – концентрація забруднюючої речовини в завислих наносах (в частках від $U_{ГДК}$); $V(x)$ – швидкість течії потоку, м/с; $a(x)$ – коефіцієнт молекулярної або турбулентної дифузії; $f(x, t)$ – функція джерела надходження забруднень в у водний потік; $R(x)$ – функція накопичення забруднюючих речовин в донних відкладах; $\lambda(x)$ – коефіцієнт сорбції речовини, що знаходиться в потоці, у завислі наноси; $\mu_1(x)$ – коефіцієнт сорбції в донні відклади; $\mu_2(x)$ – коефіцієнт сорбції-десорбції в системі «вода-завислі наноси»; t – час; x – координата в напрямку руху. Функція джерела являється точковим джерелом викиду забруднюючих речовин за таких умов:

$$f(x, t) = \begin{cases} f(t), \text{ при } x = 0; \\ 0, \text{ при } x \neq 0. \end{cases} \quad (2)$$

В системі «р.Жовта-р.Інгулець-Карачунівське водосховище», рівняння (1) доцільно використовувати для опису процесу переносу в руслі річок Жовта та Інгулець. Для розв'язання задачі проходження забруднень по руслу, акваторія ріки розбивається на множину ділянок, кількість яких повинна в достатній мірі відображати конфігурацію русла разом з основними гідрографічними характеристиками.

Систему диференціальних рівнянь (1) розв'язуємо за допомогою скінченно-різницевої апроксимації. Інтегро – інтерполяційний метод [6] дозволяє найбільш точно визначити значення балансу концентрацій та побудувати різницеву схему. Система одномірних різницевого рівнянь апроксимує неперервну задачу (1) з точністю $O(|\Delta x|^2 + \tau)$ і має вигляд:

$$\begin{cases} U_i^{n+1} = U_i^n + \frac{\tau}{\Delta x} \left[\left(a^2(x) \frac{U_{i-1}^n - U_i^n}{\Delta x} + V U_i^n \right) - \left(a^2(x) \frac{U_i^n - U_{i-1}^n}{\Delta x} - V U_{i-1}^n \right) \right] - \\ - \tau \lambda U_i^n + \tau \mu_2 S_i^n \pm \tau f(x_i, t_n); \\ S_i^{n+1} = S_i^n + \tau \lambda U_i^n - \tau \mu_1(x) S_i^n + \tau \mu_2(x) S_i^n; \\ R_i^{n+1} = R_i^n + \tau \mu_1(x) S_i^n; \\ i = 0.1, \dots, m; \quad n = 0.1, \dots, N, \end{cases} \quad (3)$$

Крайові умови в річках: при $i = 0$ (вище викиду забруднень в р. Жовта) або вище впадіння р Жовта в р. Інгулець задаються як $U_{\Phi, t=0}^n - U_{\Phi, t=0, n} - 0, 1, \dots, N$; початкові концентрації $U_{\Phi, t} - U_{\Phi, t=1, \dots, m}$ задаються, крім точок випуску, також як фонові, а в точці змішування розраховуються за формулою:

$$U_2^n = \frac{U_{N+1}^n Q_1 \tau + U_2 Q_2 \tau + (W - Q_1 \tau - Q_2 \tau) U_1^n}{W}, \quad (4)$$

де $Q_1 \tau$ - кількість води, що потрапила в Інгулець за 1 такт часу; $Q_2 \tau$ – кількість води, що проходить з Інгульця до пункту змішування за час τ ; $U_{N+1}^n Q_2 \tau$ - об'єм води з концентрацією U_1^n ; $U_2^\Phi Q_2 \tau$ - об'єм води з концентрацією U_2^n .

Система рівнянь (3) описує процеси переносу забруднюючої речовини у водосховищі, в початковий момент часу та показує перерозподіл концентрації з врахуванням зміни швидкості потоку вздовж руху по осі x:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} = \alpha^2 \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - V(x, y) \frac{\partial U}{\partial x} - \lambda(x, y) U + \mu(x, y) S(x, y) + f(x, y, t); \\ \frac{\partial S}{\partial t} = \lambda(x, y) U(x, y) - (\mu_1(x, y) + \mu_2(x, y)) S(x, y); \\ \frac{\partial R}{\partial t} = \mu_1(x, y) S(x, y). \end{cases} \quad (5)$$

Для розрахунку концентрацій за напрямком поширення забруднень використовуємо двомірну скінченно-різницеву схему:

$$\begin{cases} U_{i,j}^{n+1} = U_{i,j}^n + \frac{\Delta \tau}{\Delta x} \cdot \left(\alpha_{i+\frac{1}{2},j}^2 \cdot \frac{U_{i+1,j}^n - U_{i,j}^n}{\Delta x} - \alpha_{i-\frac{1}{2},j}^2 \cdot \frac{U_{i,j}^n - U_{i-1,j}^n}{\Delta x} \right) + \frac{\Delta \tau}{\Delta y} \cdot \\ \cdot \left(\alpha_{i,j+\frac{1}{2}}^2 \cdot \frac{U_{i,j+1}^n - U_{i,j}^n}{\Delta y} - \alpha_{i,j-\frac{1}{2}}^2 \cdot \frac{U_{i,j}^n - U_{i,j-1}^n}{\Delta y} \right) - V_{i-\frac{1}{2},j} \cdot \frac{U_{i,j}^n - U_{i-1,j}^n}{\Delta x} + \\ + V_{i+\frac{1}{2},j} \cdot \frac{U_{i+1,j}^n - U_{i,j}^n}{\Delta x} - \lambda U_{i,j}^n + \mu_2 S_{i,j}^n; \\ S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^n + \tau \lambda U_{i,j}^n - \tau \mu_1 S_{i,j}^n - \tau \mu_2 S_{i,j}^n; \\ R_{i,j}^{n+1} = R_{i,j}^n + \tau \mu_1 S_{i,j}^n. \end{cases} \quad (6)$$

Тут τ – крок по часу; n – номер розрахункового шару в часі; Δx – крок по координаті x ; i – номер i -ї розрахункової комірки.

На твердих границях (берег) задані умови не протікання забруднюючих речовин:

$$Q_n = 0; \quad \alpha^2 \frac{dU}{dy} = 0. \quad (7)$$

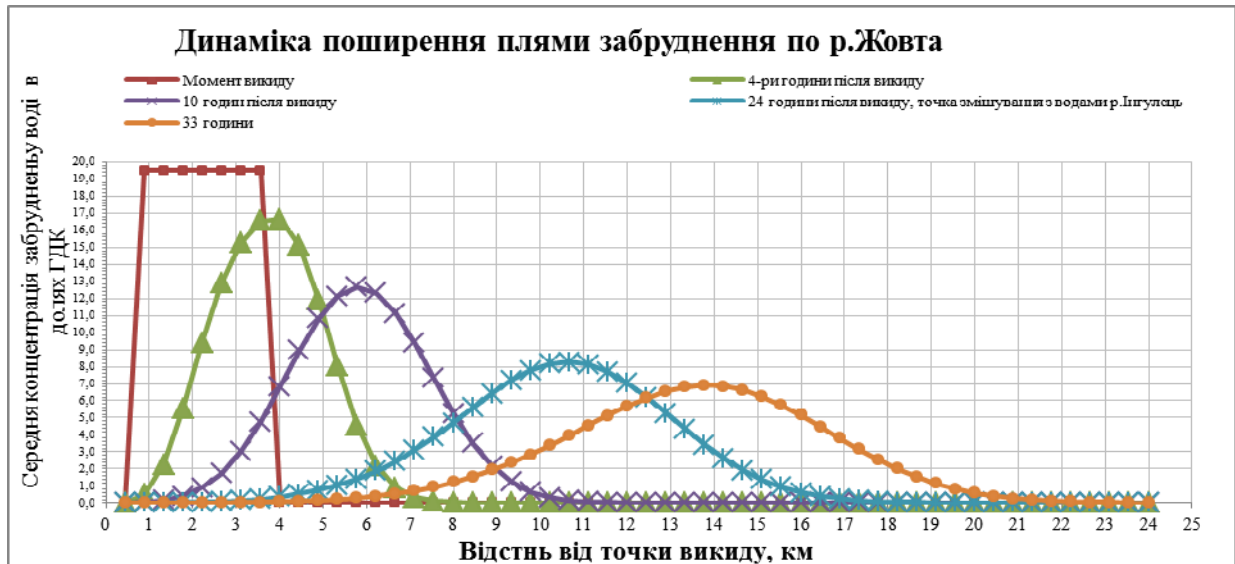
На рідких границях, де вода впадає і витікає з водоймища задані витрати води:

$$Q_n = f_n(x, y, t) \quad (8)$$

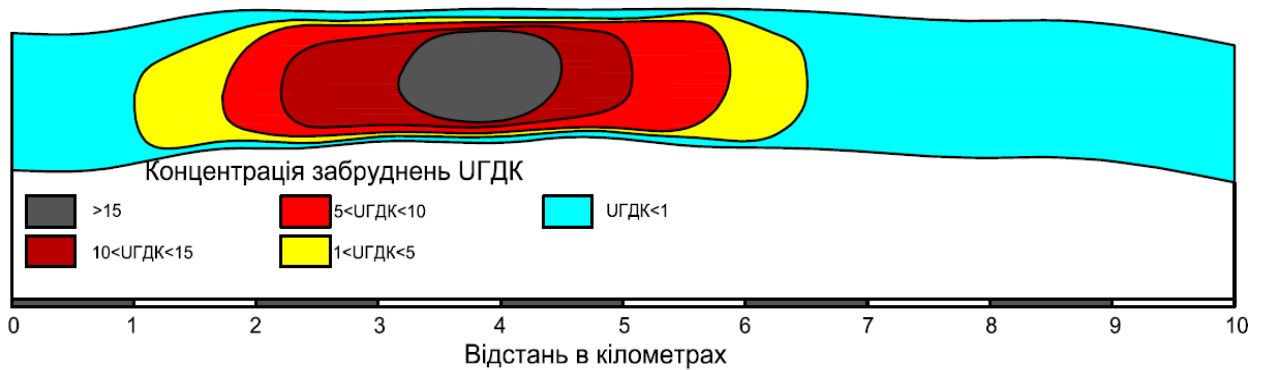
з концентраціями $Q_{\text{впад}}^n$ при впадінні і $Q_{\text{виток}}^n$ при витокі з водосховища.

Результати розрахунків. Запропонована математична модель поширення консервативних речовин була адаптована до умов досліджуваної системи

«р.Жовта, - р.Інгулець -Карачунівське водосховище». При розрахунку моделюється залповий викид на протязі 1 години з хвостосховища (рис.1) урановмісних відходів у р.Жовта з концентрацією U^{238} , що перевищує допустиму концентрацією $0,02 \text{ г/дм}^3$ у 19,5 разів.



Поширення плями забруднень в р.Жовта на момент часу 4 години



Поширення плями забруднень в р.Жовта на момент часу 33 години

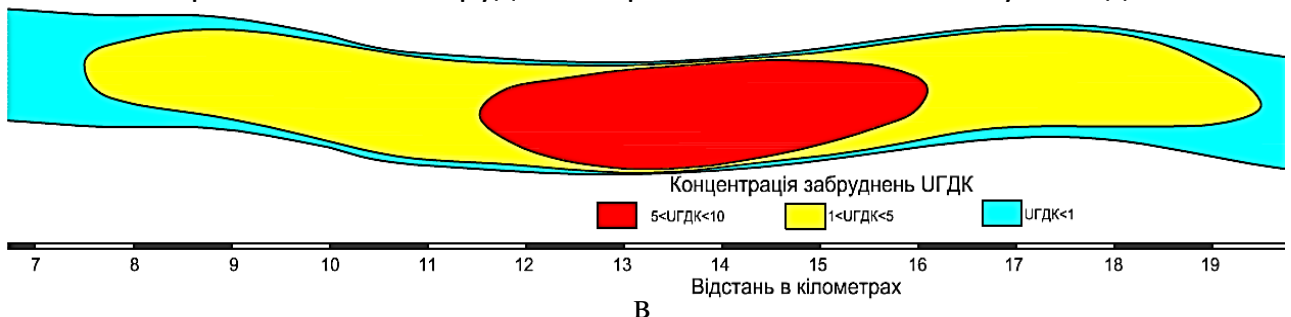
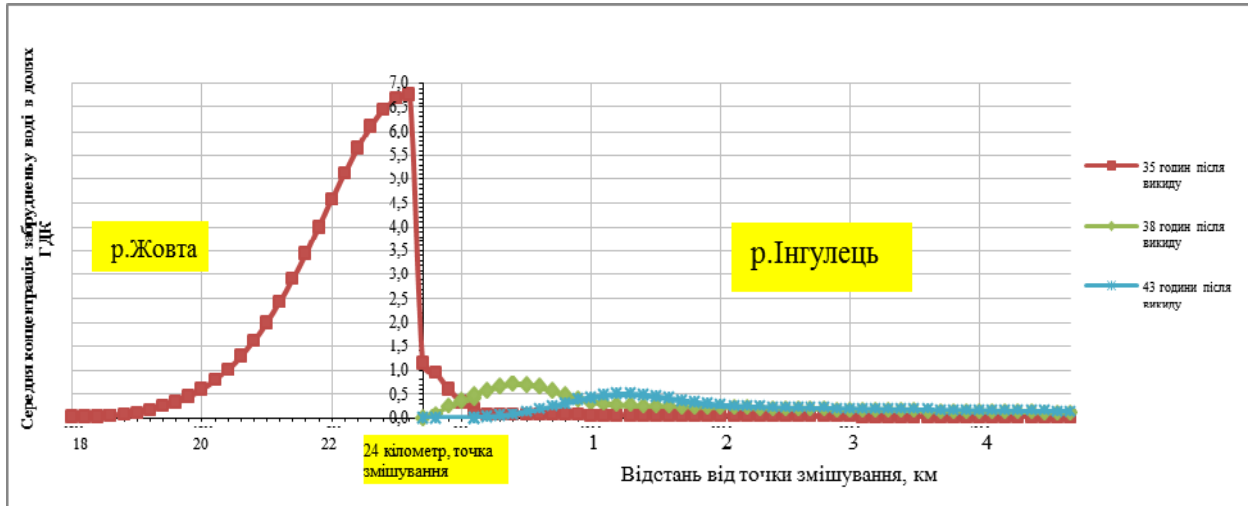
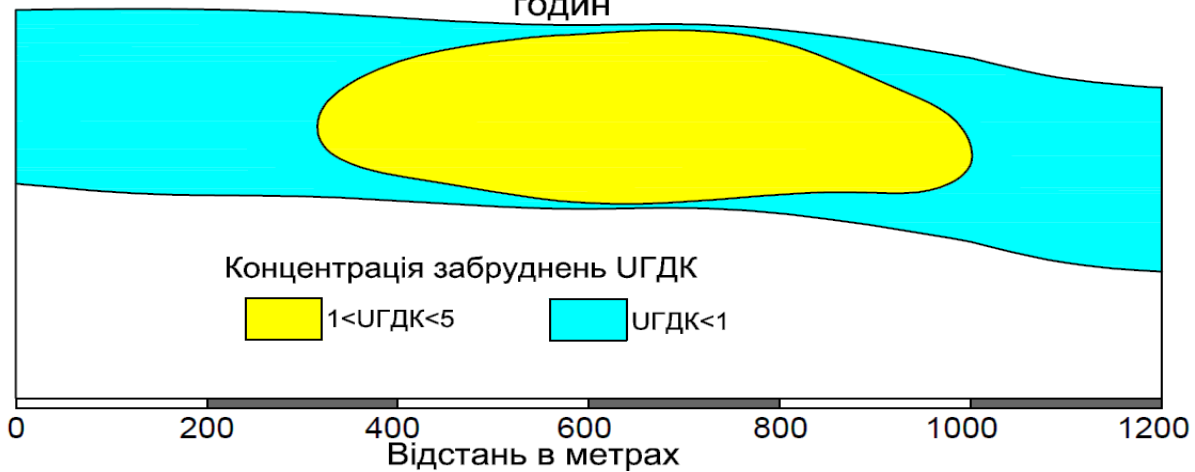


Рис. 2. Поширення плями забруднень в р.Жовта за результатами моделювання: а- динаміка концентрацій в часі і по довжині ріки; б, в — просторове поширення плями забруднень в різні моменти часу.



а

Поширення плями забруднень в р.Інгулець на момен часу 38 годин



в

Рис. 3. Поширення плями забруднень в точці змішування потоків р.Жовта та р.Інгулець за результатами моделювання: а- динаміка концентрацій в часі і по довжині ріки з перерахунком змішування; б – просторове поширення плями забруднень в моменти часу 38 годин.

Сценарне моделювання показує, що за рахунок скиду в аварійній ситуації на протязі години шахтних вод з концентрацією, що перевищує допустиму в 19,5разів, р.Жовта не зможе виконати розбавлюючу функцію та акумулювати в донні відклади значну кількість забруднюючих речовин. Проте в р.Інгулець спостерігається різке зменшення концентрації, за рахунок значного розбавлення, а частково випадіння в донні відклади. При цьому в р.Інгулець концентрація зменшується до рівнів ГДК. Динаміка поширення забруднень вниз по р.Інгулець показує, що концентрація швидко наближається до фонових значень (рис.3).

Висновки

Розроблена математична модель поширення забруднень в річках та взаємодії з завислими наносами та донними відкладами дозволяє моделювати різні сценарії аварійних викидів забруднюючих речовин в річковій системі з водосховищем з метою прийняття запобіжних заходів.

Проведене моделювання в системі «р. Жовта – р. Інгулець – Карачунівське водосховище» дає можливість оцінити загрозу виникнення аварійних ситуацій з небезпекою забруднення питного водозабору м. Кривий Ріг.

Список використаної літератури

1. Хільчевський В.К., Кравчинський Р.Л., Чунар'єв О.В. Гідрохімічний режим та якість води Інгульця в умовах техногенезу. – К. : Ніка-Центр, 2012. – С. 180.
2. Малі річки України (Довідник)/ під ред. Яцика А.В. – К. : Урожай, 1991. – С. 296..
3. Сизоненко В.П., Шевченко О.Л., Лисюк О.Г. Прогнозування впливу підприємств ядерно-паливного циклу на поверхневі водоймища на прикладі скидів шахти «Нова» /В.П. Сизоненко//Проблеми загальної енергетики.- 2010.-№2(22).-с.45-52.
4. Галкин Л. М. Решение диффузионных задач методом Монте-Карло. — М.: Наука, 1975. — С. 94
5. Ковальчук П.І., Герус А.В. Математичне моделювання та прогнозування поширення забруднень в річках при аварійних ситуаціях. //Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2013.- №1(7).- с.119-123.
6. Самарский А.А. Теория разносных схем. – Учебное пособие. Главная редакция физико-математической литературы. –М.: Наука, 1977.- С. 656.