

УДК 621.501.72

П. І. Ковальчук*, д-р. техн. наук,

В. І. Рожко*,

Г. А. Балихіна*, канд. техн. наук,

О. С. Демчук**, канд. техн. наук

* Інститут водних проблем і меліорації НААН України, м. Київ,

** Національний університет водного господарства

та природокористування, м. Рівне

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЦЕНАРІЇВ ВОДООБМІНУ В СИСТЕМІ КАНАЛУ ДНІПРО-ДОНБАС

Запропоновано математичне моделювання сценаріїв проведення водообміну в системі каналу Дніпро-Донбас. Канал наповнюється дніпровською водою з Кам'янського водосховища з метою покращення стану Краснопавлівського водосховища, з якого вода подається для питних потреб м. Харків. Ставиться задача вибору найбільш економічно ефективного варіанту водообміну при забезпеченні доброго екологічного стану водних ресурсів в Орільському та Краснопавлівському водосховищах. Для вибору структури системи управління водообміном пропонується метод сценарного аналізу. Розглянуто підхід, в результаті реалізації якого критерій економії водних ресурсів необхідно спрямувати до максимального значення. Критерій якості води розглядається як обмеження згідно чинних нормативів.

Для екосистемного оцінювання якості води вздовж каналу використовуються нейронні мережі. Системний просторово-часовий аналіз якості води за ансамблем нейронів перцептронного типу дозволяє співставляти зміни якості води в каналі за окремими показниками та групами показників. Це дає можливість виявити найбільш перспективні варіанти прийняття рішень. Пропонуються балансові моделі водообміну, що базуються на рівняннях динаміки та збереження мас забруднюючих речовин. Спочатку розраховуються потоки води, а потім концентрації забруднюючих речовин в результаті змішування. Математичне моделювання надає можливість відслідковувати щодобові зміни гідрологічних та гідрохімічних показників у водосховищах при різних варіантах проведення водообміну, процеси транспортування та перемішування водних мас різної якості в Орільському та Краснопавлівському водосховищах. Варіанти сценаріїв визначають добу настання запланованого результату якості води та тривалість водообміну. За результатами сценарного аналізу найбільш економічно доцільним і при цьому екологічно безпечним є варіант виключення спрацювання та наповнення Орільського водосховища. У цьому варіанті тривалість проведення водообміну зменшується до

45 днів, не здійснюються безповоротні скиди води та лише на 5.6 % підвищується жорсткість у Краснопавлівському водосховищі протягом перших 12 діб.

Ключові слова: *нейронні мережі, моделювання водообміну, перцептронна модель, імітаційні сценарії, екосистемний підхід, категорія та клас якості вод.*

Вступ. Математичне моделювання дозволяє прогнозувати кількісні та якісні показники зміни стану водного середовища з метою розроблення рекомендацій щодо здійснення заходів покращення водообміну на основі аналізу варіантів сценаріїв [1], зокрема і в системі каналу Дніпро-Донбас.

Канал Дніпро-Донбас наповнюється дніпровською водою з Кам'янського водосховища з метою безперебійної подачі води на м. Харків та покращення екологічного стану Краснопавлівського водосховища у Харківській області. Однак у зв'язку з відсутністю фінансування на виконання цих заходів, водообмін проводиться раз на 2–3 роки. За період відсутності проведення чергового водообміну у Краснопавлівському водосховищі відмічається близька до кризової ситуація: наповнення водосховища наближається до рівня його робочого спрацювання, жорсткість води перевищує нормативи для питних потреб [2, 3].

На основі імітаційного моделювання сценаріїв водообміну потребує дослідження як економічна ефективність варіантів, так і забезпечення доброго екологічного стану водних ресурсів в Орільському та Краснопавлівському водосховищах [4].

Ставиться задача вибору найбільш ефективного варіанту водообміну і наповнення Краснопавлівського водосховища із забезпеченням належної якості води згідно методик [2, 3, 5]. Для оптимізації еколого-економічних оцінок ефективності необхідно провести математичне моделювання різних сценаріїв згідно затвердженого варіанту водообміну [6] та інших перспективних варіантів управління подачею води.

Метод моделювання сценаріїв. Інтегрований підхід за екологічними та економічними цілями. При виборі сценаріїв водообміну інтегрований підхід за екологічними та економічними цілями є одним із напрямів реалізації системної узгодженості управління. В умовах сталого розвитку системна узгодженість управління полягає в тому, що функціонування системи передбачає багатокритеріальну оптимізацію економічних цілей, які визначаються як сумарні прирости на інтервалі T :

$$\left\{ \int_0^T F_1(X(t+1), U(t)) dt, \dots, \int_0^T F_n(X(t+1), U(t)) dt \right\} \rightarrow \max, \quad (1)$$

де F_1, \dots, F_n — економічні критерії оцінювання кількості та якості водокористування; $X(t)$ та $U(t)$ — відповідно стани системи та управління в момент t .

При цьому безумовно враховують екологічні цілі, задані як обмеження або як критерії досягнення доброго екологічного стану системи:

$$\begin{cases} F_{n+1}(X(t+1), U(t)) \leq C_{n+1}(t); \\ \dots \\ F_p(X(t+1), U(t)) \leq C_p(t); \end{cases} \quad (2)$$

де F_{n+1}, \dots, F_p — екологічні критерії, $C_{n+1}(t), \dots, C_p(t)$ — обмеження в моменти $t \in [0; T]$ для досягнення доброго або відмінного екологічного стану.

Для еколого-економічного обґрунтування варіантів управління водообміном розробляються різні сценарії динаміки руху водного потоку та поширення забруднень. Сценарії оцінюються за критеріями (1, 2), оптимальне рішення стосовно системи управління визначається на основі багатокритеріальної оптимізації, зокрема з використанням принципу Парето.

При виборі структури управління водообміном в системі каналу Дніпро-Донбас пропонується підхід, в результаті реалізації якого економічний критерій (економія водних ресурсів) необхідно спрямувати до максимального значення:

$$F^* - F_1(x, t) \rightarrow \max, \quad (3)$$

де F^* — максимальні (планові) витрати водних ресурсів; $F_1(x, t)$ — поточні витрати водних ресурсів за варіантами.

При цьому, показники якості води Краснопавлівського водосховища залишаються в межах допустимих (нормативних) значень (в межах концентрацій \leq ГДК):

$$\begin{cases} F_2(X, t) \leq C_1(t); \\ \dots \\ F_p(X, t) \leq C_p(t), \end{cases} \quad (4)$$

де $F_2(x, t), \dots, F_p(x, t)$ — екологічні критерії, $C_1(t), \dots, C_p(t)$ — обмеження показників якості води згідно чинних нормативів.

Нейронні мережі як метод моделювання якості води в процесі водообміну. Для екологічної оцінки ефективності проведення водообміну пропонується екосистемний підхід, що базується на використанні нейронної мережі [7]. Для адекватної розробки нейронної мережі та візуалізації екологічної оцінки на вибраному об'єкті необхідно розробити карту-схему каналу Дніпро-Донбас з нанесенням пунктів відбору проб (рис. 1).



Рис. 1. Карта-схема каналу Дніпро-Донбас

Сукупність нейронів, що взаємодіють на рівні певної системи при прийнятті рішень будемо називати нейронною мережею або ансамблем нейронів. Формальний нейрон являє собою елементарний перцептрон, тобто систему прийняття рішення в окремій точці, що складається з кількох шарів, які утворені відповідно елементами трьох типів: сенсорних елементів, тобто рецепторів (S -елементів), що фіксують концентрації гідрохімічних показників в заданій точці; асоціативних елементів (A -елементів), які здійснюють пороговий відбір; R -елементів прийняття рішень, що реалізують інтегровані оцінки якості води (числові, графічні, логіко-лінгвістичні) за рівнями ієрархії (рис. 2).

Досить адекватною для реалізації екосистемного підходу в системі каналу, на нашу думку, є методика екологічної оцінки [5], за якою рішення приймаються в кожному пункті вимірювань. Точки спостережень складають елементи системи і являються формальними нейронами (індикаторами), прийняття рішень в яких здійснюється на основі перцептронної моделі [7]. Використання моделі нейронної мережі полягає в розрахунку якості води в системі каналу до водообміну та після його проведення.

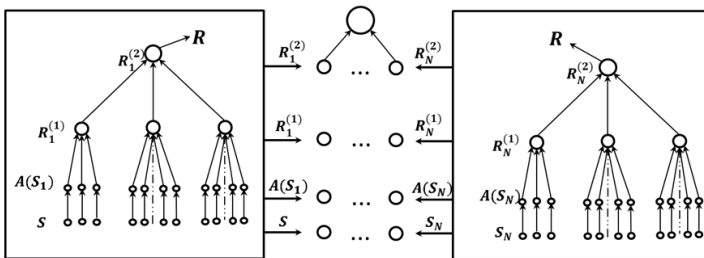


Рис. 2. Схема басейнових екологічних оцінок якості води за ансамблем нейронів перцептронного типу

Особливістю системної моделі є можливість повної екологічної оцінки, що враховує проміжні оцінки вихідних значень нейронної мережі на всіх рівнях ієрархії. Такий системний просторово-часовий

аналіз якості води за ансамблем нейронів перцептронного типу дає можливість виявити найбільш перспективні напрямки прийняття рішень для покращення якості води у водних об'єктах.

Математичні моделі водообміну. Пропонуються балансові моделі, що базуються на рівнянні динаміки та збереження мас забруднюючих речовин, побудовані таким чином, що спочатку розраховуються потоки води, а потім концентрації забруднюючих речовин в результаті змішування [8]. Водообмін у каналі відбувається таким чином, що частина забрудненої води витісняється потоком води з Кам'янського водосховища.

$$W_i^{n+1} = W_i^n + q_i^n - p_i^n, n = 1, \dots, N, \quad (5)$$

де W_i^{n+1} , W_i^n — об'єм водних ресурсів у водосховищі в $(n + 1)$ -й і n -й моменти часу в i -й комірці; q_i^n — водні ресурси, що надходять з каналу у водосховище; p_i^n — водні ресурси, що відбираються з водосховища, в результаті скиду в р. Орілька або забору в систему каналу для подачі в Краснопавлівське водосховище; i — номер комірки.

Концентрація речовини в n -й момент часу в i -й комірці в результаті змішування знаходиться за формулою:

$$U_i^{n+1} = \frac{W_i^n U_i^n + q_i^n C_i^n - p_i^n S_i^n}{W_i^{n+1}}, \quad (6)$$

де $W_i^n U_i^n$ — водні ресурси W_i^n з концентрацією U_i^n , що знаходяться в i -й комірці в n -й момент часу; $q_i^n C_i^n$ — водні ресурси q_i^n , що надходять з каналу в Орільське водосховище з певною концентрацією C_i^n в i -й комірці в n -й момент часу; $p_i^n S_i^n$ — водні ресурси p_i^n , що відбираються з водосховища, з концентрацією S_i^n в i -й комірці в n -й момент часу.

Аналіз якості води при проведенні водообміну. Згідно методики [5] проводилась екологічна оцінка якості вод у системі каналу Дніпро-Донбас до водообміну та після його проведення. Результати аналізу якості вод до проведення водообміну показують, що води каналу відносяться до 2–4 категорій 2–3 класів. В системі каналу якість вод змінювалася від «дуже добрих», «чистих» з тенденцією наближення до категорії «добрих», «досить чистих» (с. Шульгівка) до «задовільних», «слабко забруднених» вод з тенденцією наближення до «посередніх», «помірно забруднених» (Орільське та Краснопавлівське водосховища) (рис. 3).

Після проведення водообміну у каналі відмічається покращення якості води від дуже добрих, «чистих» вод (с. Шульгівка) до перехідних за якістю від «дуже добрих», «чистих» до «добрих», «досить чистих» вод (с. Орілька) 2–3 категорій 2 класу якості та «задовільних», «слабко забруднених» вод з ухилом до «добрих», «досить чистих» вод 4 категорії 3 класу якості (рис. 3).

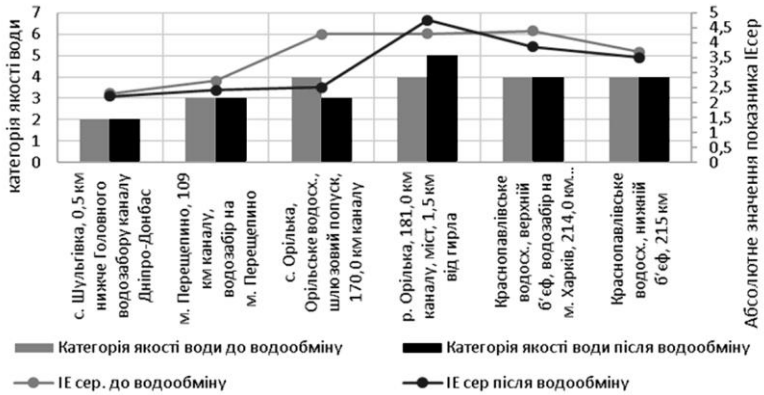


Рис. 3. Категорії якості води та абсолютні значення показника $I_{сер}$ до водообміну та після його проведення

Якість води за показником жорсткості до водообміну коливалася від 3 мг-екв/куб.дм (с. Шульгівка) до 18,4 мг-екв/куб.дм (Орільське водосховище), зокрема в Краснопавлівському водосховищі становила 8,0–8,1, при ГДК для питного водоспоживання 7,0 мг-екв/куб.дм. Після проведення водообміну якість води суттєво покращилась від 3,3 до 7,5 мг-екв./куб.дм, що не перевищує норми ГДК для питних потреб (рис. 4).

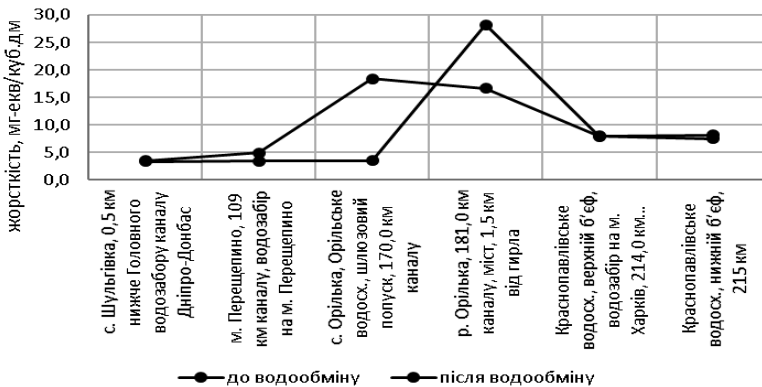


Рис. 4. Величина жорсткості води до водообміну та після його проведення

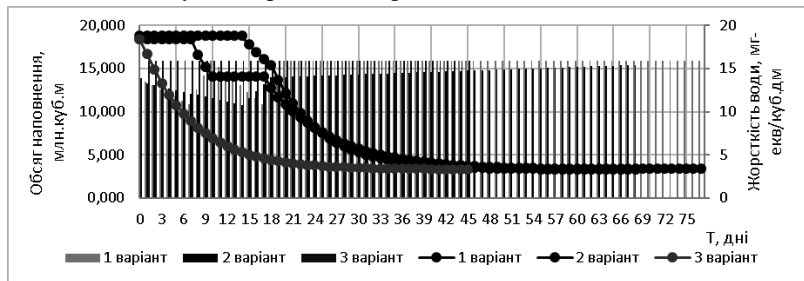
Сценарний аналіз варіантів водообміну. Імітаційна модель складається з двох взаємопов'язаних блоків — Орільського та Краснопавлівського водосховищ.

Розглянуто *перший варіант сценарію проведення водообміну відповідно до регламенту* [6]. Водообмін в Орільському водосховищі триває 20–21 добу і включає п'ять етапів: двократне спрацювання і наповнення водосховища та власне водообмін з подальшим перека-

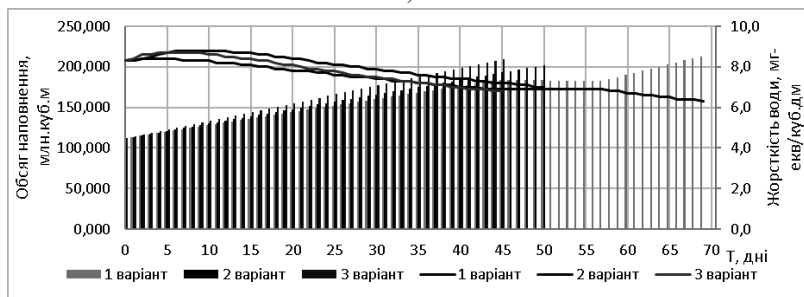
чуванням води до Краснопавлівського водосховища. Математична модель водообміну у Краснопавлівському водосховищі включає два етапи наповнення з паралельним водозабором на м. Харків і етап лише спрацювання на питні потреби м. Харкова.

Другий варіант сценарію відповідає фактично проведеному водообміну, який включає разове спрацювання і наповнення Орільського водосховища, в результаті якого жорсткість води знижується з 18,8 до 15,4 мг-екв./куб.дм, та власне етап водообміну з одночасним наповненням водосховища з каналу Дніпро-Донбас та подачею води до Краснопавлівського водосховища протягом 50 днів.

Імітаційна модель водообміну за третім варіантом виключає етап безповоротного скиду вод високої жорсткості з Орільського водосховища у р. Орілька, адже це економічно недоцільні витрати. Сценарій даної моделі включає етап наповнення водосховища та власне етап водообміну, який триває до моменту зниження жорсткості води у Краснопавлівському водосховищі до 7,0 мг-екв./куб.дм, згідно моделі — 45 діб. Жорсткість води у Краснопавлівському водосховищі знижується з 8,3 до 7,0 мг-екв./куб.дм з нетривалим підвищенням до 8,8 мг-екв./куб.дм протягом перших 12 діб.



а)



б)

Рис. 5. Взаємозв'язок між жорсткістю води та обсягом наповнення водосховищ за варіантами сценаріїв імітаційних моделей: а) для Орільського водосховища; б) для Краснопавлівського водосховища

Висновки. Математичне моделювання надає можливість відслідковувати щодобові зміни гідрологічних та гідрохімічних показників у водосховищах при проведенні водообміну, процеси транспортування та перемішування водних мас різної якості у Орільському та Краснопавлівському водосховищах. Варіанти сценаріїв визначають добу настання запланованого результату якості води та тривалість водообміну.

За результатами першого сценарію покращення якості води по жорсткості у Краснопавлівському водосховищі до позначки 6,2 мг-екв/куб.дм досягається на 56 день проведення водообміну (загальний термін становить 77 днів). За другим сценарієм водообміну жорсткість води у Краснопавлівському водосховищі понизилась до позначки 7,0 мг-екв/куб. дм на 50 добу. Відповідно до третього сценарію, що виключає попередній водообмін у Орільському водосховищі, показник жорсткості знижується до позначки 7,0 мг-екв/куб. дм на 45 добу.

Результати математичного моделювання показують, що в усіх трьох варіантах сценаріїв до Краснопавлівського водосховища буде подаватися вода підвищеної жорсткості у перші дні наповнення, проте час наповнення водосховища залежить від інтенсивності водообміну у Орільському водосховищі. Найбільш тривалим (77 днів) та економічно затратним є варіант проведення водообміну згідно затвердженого регламенту, адже він включає двократне спрацювання Орільського водосховища та безповоротні скиди води загальним об'ємом 10 млн. куб. м. Але при даному сценарії досягається найкраще значення показника жорсткості — 6,2 мг-екв/куб. дм.

Найбільш економічно доцільним і при цьому екологічно безпечним є варіант виключення спрацювання та наповнення Орільського водосховища. У даному варіанті тривалість проведення водообміну зменшується до 45 днів, не здійснюються безповоротні скиди води та лише на 5,6% підвищується жорсткість у Краснопавлівському водосховищі протягом перших 12 діб.

Список використаних джерел:

1. Kovalchuk P. Modelling of water use and river basin environmental rehabilitation / P. Kovalchuk, H. Balykhina, O. Demchuk, V. Kovalchuk // Комп'ютерні науки та інформаційні технології CSIT 2017 : матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції CSIT 2017. — Львів : Видавництво «Вежа і Ко», 2017. — Т. 1. — С. 468–472.
2. Державні санітарні норми та правила охорони поверхневих вод від забруднення (ДСанПіН 4630-88).
3. ДСТУ 4808:2007 Джерела централізованого питного водопостачання. Гігієнічні та екологічні вимоги щодо якості води і правила вибирання. — К. : Держспоживстандарт України, 2007.
4. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy // Official Journal of the European Communities. 22.12.2000, ENL327/1.

5. Методика екологічної оцінки якості поверхневих вод за відповідними категоріями / В. Д. Романенко, В. М. Жукинський, О. П. Оксіюк [та ін.]. — К. : Символ-Г, 1988. — 28 с.
6. Регламент проведення водообміну у Краснопавлівському водосховищі у період жовтень-грудень 2016 року, затверджений Державним агентством водних ресурсів України від 29 серпня 2016 р.
7. Kovalchuk P. I. Perceptron model of system environmental assessment of water quality in river basins / P. I. Kovalchuk, A. V. Gerus, V. P. Kovalchuk // 4-th international conference on inductive modeling. Proceedings. — K., 2013. — P. 279–284.
8. Ковальчук П. І. Сценарне моделювання промивки річки Інгулець при подачі води на зрошення / П. І. Ковальчук, О. С. Демчук, Р. Ю. Коваленко, Г. А. Балихіна // Індуктивне моделювання складних систем : збірник наукових праць. — 2016. — № 8. — С. 117–127.

THE MATHEMATICAL MODELING OF WATER EXCHANGE SCENARIOS IN THE DNIPRO-DONBASS CHANNEL SYSTEM

The mathematical modeling of water-exchange scenarios in the Dnipro-Donbass channel system is proposed. The channel is filled with Dnipro water from the Kamensky reservoir in order to improve the conditions of the Krasnopavliv reservoir, from which the water is supplied for Kharkiv city drinking needs. The task of choosing the most cost-effective variant of water exchange is determined, while providing a good ecological state of water resources in the Orilsk and Krasnopavliv reservoirs. The method of scenario analysis is proposed for selecting the structure of the water management system. An approach is considered, as a result of which the criterion of water resources saving should be directed to the maximum value. The water quality criterion is considered as a limitation according to the current standards.

Neural networks are used for ecosystem assessment of water quality in the channel system. System spatial-temporal analysis of water quality by ensemble of neurons of the perceptron type allows to compare the changes of water quality in the channel by separate indicators and groups of indicators. It gives the opportunity to find the most promising options for decision making. The balance models of water exchange, based on the equations of dynamics and preservation of the masses of pollutants, are proposed. Initially, the water flows are calculated, and then the concentration of pollutants as a result of mixing. The mathematical modeling provides the opportunity to monitor daily changes in hydrological and hydrochemical parameters in reservoirs at different variants of water exchange, processes of transportation and mixing of water mass of different quality in the Orilsky and Krasnopavliv reservoirs. The scenario options are defined the day onset of the planned result of water quality and duration of water exchange. According to the results of the scenario analysis, the most economically feasible and at the same time environmentally safe is the option to exclude the drain and filling of the Orilsky reservoir. In this embodiment, the duration of water exchange is reduced to 45 days, no irreversible

discharges of water are carried out and only a 5.6% increase in rigidity in the Krasnopavliv reservoir during the first 12 days.

Key words: *neural networks, water exchange modeling, perceptron model, simulation scenarios, ecosystem approach, category and water quality class.*

Отримано: 28.05.2018

УДК 537.7

О. Д. Кожушко, молодший науковий співробітник,

П. М. Мартинюк, д-р техн. наук, професор

Національний університет водного господарства

та природокористування, м. Рівне

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РОЗЛИВУ ЗАБРУДНЮЮЧОЇ РЕЧОВИНИ НА ВОЛОГОПЕРЕНЕСЕННЯ В ҐРУНТІ ЗАСОБАМИ КОМП'ЮТЕРНОГО ТА МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Комп'ютерне та математичне моделювання процесів вологоперенесення в ґрунтах займає чільне місце при проектуванні гідростпурд, дослідженні стійкості зсувонебезпечних ґрунтових масивів, прогнозуванні врожайності тощо. Ці задачі є складовими забезпечення економічної безпеки держави.

Для формулювання задачі вологоперенесення в даній роботі використовувалася модель, що враховує взаємопов'язані процеси перенесення вологи, тепла та хімічних речовин. Розглянуто різні змінні параметри середовища та згаданих процесів, а також описано деякі залежності для їх знаходження. Дослідження даної моделі здійснено на прикладі двовимірної задачі для випадку розливу забруднюючої речовини на поверхні ґрунту. Особливістю такої задачі є забруднення ґрунту внаслідок адсорбції твердими частками ґрунту хімічної речовини. У цьому випадку, на нашу думку, особливо важливим стає врахування зміни пористості ґрунту, що відбувається внаслідок збільшення об'єму твердих часток. Також відіграють свою роль зміна густини порової рідини, що зростає при розчиненні у ній забруднюючих солей, та явище хімічного осмосу, що впливає на рух рідини.

Поставлена задача вологоперенесення в ґрунті з врахуванням змінної пористості була розв'язана чисельно методом скінченних елементів. Програмна реалізація відповідних алгоритмів здійснена в середовищі FreeFem++. Здійснено чисельні експерименти, в яких порівняно розв'язки класичної задачі вологоперенесення та поставленої задачі із врахуванням тепломасопере-