

ЗАСТОСУВАННЯ ОПТИМІЗАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ПРИ ПРОГНОЗУВАННІ РАДІОАКТИВНОГО ЗАБРУДНЕННЯ РІЧКОВИХ СИСТЕМ ІЗ ВОДОСХОВИЩАМИ

Ю. І. Кузьменко

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ

Описано оптимізаційну модель для прогнозу радіоактивного забруднення в річкових системах з водосховищами на основі камерної моделі. Модель заснована на сучасному підході багатокритеріальної оптимізації, адаптована до Дніпровського каскаду водосховищ і враховує правила їх експлуатації. Наведено приклади розрахунків для Київського водосховища.

Українські АЕС, які в силу своїх технологічних особливостей та призначення є великими водокористувачами, знаходяться в басейнах середніх або великих річок, мають власні штучні водосховища – ставки-охолоджувачі або розташовані в безпосередній близькості від інших штучних водосховищ, які можуть попасти в зону впливу внаслідок аварійних викидів чи скидів радіоактивних речовин.

Досвід ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС, що призвела до найбільшого забруднення Дніпровського каскаду водосховищ, показав необхідність і важливість оперативного проведення прогностичних розрахунків забруднення водного середовища саме з урахуванням особливостей існування регульованих водосховищ як водогосподарських об'єктів багатопільового використання, у тому числі як елементу системи контрзаходів. Тому розробка та впровадження комп'ютерних систем моделювання переносу радіонуклідів у річкових системах із водосховищами є актуальною й обумовлена потребою розробки нових швидких комп'ютерних методів оцінки та регулювання радіоактивного забруднення на різних ділянках річкових систем, що дає змогу вести розрахунки у випадку викиду радіоактивних речовин за даними існуючої стаціонарної мережі спостережень та іншими даними.

Особливістю задачі розрахунку на річкових ділянках із водосховищами є те, що водосховище являє собою керовану систему, в якій витрати води на виході (у створі греблі) залежать не лише від витрат води на вході (притоку), але й від положення рівня вільної поверхні води в кожний проміжок часу в межах ділянки що розглядається. Якість (результати) керування водосховищем доцільно оцінювати за допомогою водогосподарських, економічних, екологічних показників, що в сукупності характеризують наслідки рішень, які приймаються, для різних аспектів функціонування водосховища. Багато складних задач прийняття рішень, у тому числі й ця, включають кілька суперечливих (одночасно недосяжних) цілей, що, природно, веде до використання кількох критеріїв при виборі дій із множини альтернатив. Так, наприклад, при плануванні режимів роботи водосховищ виникають протиріччя між вимогами різних водокористувачів та водоспоживачів. Зокрема, вимоги річкового флоту до підтримування рівня навігаційного спрацювання водосховищ у літню межень, які забезпечують судноплавні глибини, можуть вступати в протиріччя із забезпеченням санітарних витрат води в нижні б'єфи водосховищ та забезпеченням водою водоспоживачів, що знаходяться нижче створу греблі. У загальному випадку, критерії керування водосховищем суперечливі [1]. З метою узгодження інтересів водокористувачів, визначення певних пріоритетів, забезпечення безперебійності водоспоживання, безпеки гідроспоруд та населення, підтримки належного санітарного стану водойм для водосховищ розробляються й затверджуються плани експлуатації, які враховують різні сценарії водності. Правила експлуатації містять граничні обмеження на рівні і витрати води протягом року за різних гідрологічних та водогосподарських умов, але не задають точної траєкторії динаміки режимів в часі, що залишає певну свободу в оперативному керуванні водним режимом і дає досить великий простір для пошуку його оптимальної траєкторії. Її пошук можна здійснити за допомогою оптимізаційної моделі.

При вирішенні задачі прогнозування наслідків радіаційного забруднення вод на перший план виступає завдання оцінити, яким чином впливає режим експлуатації гідропоруд на якість (ступінь забруднення радіонуклідами) водного середовища, і чи можливо зменшити негативні наслідки цього впливу для водокористувачів, у першу чергу, питного та сільськогосподарського водоспоживання. Тому необхідною складовою частиною оптимізаційної моделі експлуатації водосховищ повинна бути модель пошуку компромісного рішення в умовах багатокритеріальності.

Якщо розглядати річкову систему із зарегульованим стоком як систему послідовно розташованих ділянок з водно-екологічними характеристиками, осередненими за об'ємом водойми або її частини (у багатьох випадках таке припущення є допустимим з точки зору достатньої для практичних цілей точності розрахунків), то її математичну модель можливо представити у вигляді камерної моделі, в якій кожній із таких ділянок відповідає камера. Найбільш вдалим з точки зору врахування всіх основних процесів переносу радіонуклідів, на наш погляд, є камерні моделі, що враховують всі основні процеси міжфазної трансформації радіонуклідів (у розчині, на завислих наносах і в донних відкладах) у поверхневих водах, які реалізовані в програмних кодах WOTOX і RIVER-RAD і детально описані в [2, 3].

Математично такі моделі є системою звичайних диференціальних рівнянь, що описують динаміку води в об'ємі камери й осереднені по камері величини концентрації зважених наносів, радіонуклідів на суспензії, у розчині та донних відкладах.

Рівняння водного балансу для системи камер має вигляд

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} = Q_{i-1} - q_i + R_i + \sum_{j=1}^m Q_i^j - Q_i^w, \quad (1)$$

де V_i - об'єм камери I ; Q_i - витрати води в наступну камеру; Q_{i-1} - витрати води з попередньої камери; Q_i^j - надходження води з бічних приток до i -ї камери; Q_i^w - водоспоживання; R_i - різниця між величиною опадів і випаровування.

Рівняння транспорту зважених наносів S_i , осереднених по камері з урахуванням граничних умов, може бути записано як

$$\frac{\partial (V_i S_i)}{\partial t} = Q_{i-1} S_{i-1} - Q_i S_i + q_i^b - q_i^s + q_i^h - S_i Q_i + \sum_{j=1}^m Q_j^t S_j^t, \quad (2)$$

де R_i^h - надходження в камеру за рахунок процесу ерозії берегів; S_j^t - концентрація седиментів по притокам; q_i^b і q_i^s - осереднені по камері величини ресуспензії та седиментації, обчислювані як функції рівноважної концентрації зважених наносів S^* .

Слід зазначити, що для водосховищ V_i розраховується за допомогою проектних кривих статичних об'ємів $V_i = V_i(H_i)$, де H_i - рівні вільної поверхні води водосховищ і на практиці можуть бути завдані табличною функцією або апроксимовані степеневим поліномом.

Транспорт радіонуклідів у камері описується рівняннями динаміки концентрації радіонукліда в розчині C_j , концентрації радіонукліда на суспензії C_i^s і концентрації радіонукліда у верхніх шарах донних відкладів C_i^b . З урахуванням граничних умов та обмінних процесів система відповідних рівнянь має вигляд

$$\frac{dC_i^m}{dt} = A(Q_i, Q_{i-1}, V_i, S_i, Q_i^w, p_i^k) C_i^m + F(C_{i-1}^m, Q_{i-1}, q_{i-1}, S_{i-1}, Q_{i-1}^w, p_i^k), \quad (3)$$

де A та F - параметри, які є функціями від незалежних змінних; p_i^k - вектор параметрів моделі.

Оптимізаційна модель розрахунку режимів роботи водосховища

Оптимізаційна модель розрахунку режимів роботи водосховища базується на розрахунках керування функціями $V_i(t)$ та $C_i(t)$ шляхом зміни витрат енижні б'єфи водосховищ Q_i з дотриманням вимог і певних обмежень, визначених правилами експлуатації гідропоруд.

Задача пошуку режимів роботи каскаду водосховищ може бути сформульована як задача оптимального керування з вільною або фіксованою кінцевою точкою[6]: на траєкторії керуваної системи при виконанні вимог $V_i(0) = V_{i0}, C_i(0) = C_{i0}, V_i(t) = P_i, Q_i(t) = U_i$ треба мінімізувати функціонали

$$\min_{Q_i(t) \in U_i} F_i(Q_i(t), C_i(t), V_i(t)), \quad (4)$$

де $F_i(Q_i(t), C_i(t), V_i(t))$ - показники якості функціонування i -го водосховища, яких може бути декілька в загальному випадку:

$$F_i(Q_i(t), C_i(t), V_i(t)) = \int_0^T \Phi(V_i(t), Q_i(t), C_i(t)) dt \quad (5)$$

та (або)

$$F_i(Q_i(t), C_i(t), V_i(t)) = \min_{Q_i(t) \in U_i} \Phi(V_i(t), Q_i(t), C_i(t)), \quad (6)$$

де V_{i0} - початковий об'єм i -го водосховища; C_{i0} - початкова концентрація забруднювача у воді i -го водосховища; P та U - множини допустимих об'ємів та витрат для i -го водосховища.

Приймаючи до уваги нерозривність витрат води між суміжними водосховищами, можна записати $Q_i = q_{i-1}$.

Вираз (4) являє собою загальний вигляд системи моделей для пошуку режимів експлуатації водосховищ із урахуванням екологічних критеріїв. Залежності від способів конструктивного завдання функцій $F_i, Q_i(t), V_i(t)$ та множин U_i і P_i з моделі (4) може бути побудована конкретна система моделей, за допомогою якої можливо вирішення практичних задач моделювання водосховищ.

Таким чином, мінімальна система математичних моделей повинна вміщувати гідрологічну та радіоекологічну моделі об'єктів (водосховищ), моделі окремих показників якості функціонування системи (залежності показників якості від вирішальних змінних) та модель виявлення експертних переваг.

Аналіз потреб до режиму роботи водосховищ в різні сезони та при різних ситуаціях водозабезпеченості дозволив виділити ряд водогосподарських критеріїв, якими можна керуватися при пошуку режимів, які придатні для практичних потреб [4]. До таких критеріїв можна віднести:

$$f_1 = \max_{t \in [0, T]} Q_i(t) \text{ або } f_1 = \int_0^T Q_i^2(t) dt \quad (7)$$

для утримання води у водосховищі або зрізки піка повені (може бути використано навесні);

$$f_2 = \int_0^T (\hat{H}(t) - H(t))^2 dt \quad (8)$$

для одержання режиму максимально наближеного до бажаного (наперед зданого у вигляді $\hat{H}(t)$, де $H(t)$ - рівень води у водосховищі, який у більшості випадків можна вважати однозначно пов'язаним з об'ємом води.);

$$f_3 = \int_0^T (Q_i(t) - Q_i(t - \tau))^2 dt \text{ або рівнозначний } f_3 = \int_0^T (H_i(t) - H_i(t - \tau))^2 dt \quad (9)$$

для забезпечення найбільш рівномірного спрацювання водосховища, нормальних умов для нересту риби та запобігання різких коливань води в нижньому б'єфі (корисне для використання влітку); тут τ - час запізнення.

У разі оцінки впливу наслідків радіаційної аварії на АЕС у ситуації забруднення водосховищ змінним у часі джерелом (наприклад, як це було при забрудненні радіоактивним

стоком річок Прип'ять та Уж, який поступав до Київського водосховища в період Чорнобильської катастрофи) можливе застосування наступних критеріїв розрахунку водного режиму:

$$f_4 = \max_{t \in [0, T]} C_i(t) \quad (10)$$

максимальне зниження пікової концентрації заданої радіаційної домішки;

$$f_5 = \int_0^T (C_i(t))^2 dt \quad (11)$$

інтегральне зниження концентрації заданого радіонукліда на всьому інтервалі часу;

$$f_6 = \int_0^T (C_i Q_i(t))^2 dt \quad (12)$$

зниження об'єму виносу заданого радіонукліда за прогностичний період.

Можливо використання також критерію

$$f_7 = \int_0^T (C_i^b(t))^2 dt \rightarrow \max, \quad (13)$$

який відповідає режиму найбільшого накопичення радіонуклідів у донних відкладах у першу чергу внаслідок седиментації, а також змін швидкості фізико-хімічних процесів, які є змінними в часі. Цей критерій також може використовуватись для попередньої оцінки ефективності при проектуванні донних уловлювачів забруднених наносів за різних сценаріїв водності на невеликих річках і в рамках застосування одномірної руслової моделі з осередненням параметрів по ширині русла.

Режими роботи водосховищ регулюються з урахуванням проектних та галузевих вимог, а режими Дніпровського каскаду – Правилами експлуатації водосховищ Дніпровського каскаду [5]. Вимоги правил до режиму враховують потреби у воді для питного та побутового водоспоживання населення, промисловості, гідроенергетики, сільського господарства (зрошуване землеробство), водного транспорту, рибного господарства, рекреації, а також для санітарно-екологічних попусків, визначають пріоритетність у забезпеченні водокористувачів водою і запобігають виникненню надзвичайних ситуацій.

У зв'язку з розташуванням на річці численних великих та дрібних водозаборів вимогами з боку водопостачання до режимів експлуатації є не тільки забезпечення необхідних обсягів води, а й дотримання певних позначок рівня води у водосховищах, нижче яких водозабірні споруди починають працювати з перебоями. Подібні вимоги висувають й інші галузі, наприклад водний транспорт потребує дотримання необхідної глибини для проходження великотоннажних суден.

У нашому випадку такі висунуті різними галузями народного господарства вимоги ми вважатимемо жорсткими й неприйнятними до порушення. У межах цих вимог залишається певна варіативність режиму, тому знаходження в них конкретних траєкторій і буде задачею оптимізації з урахування заданих критеріїв.

Вирішення задачі управління

Практичне вирішення задачі багатокритеріальної оптимізації (6) для окремого водосховища (камери) може бути реалізоване шляхом її переформулювання й зведення до вирішення ряду однокритеріальних задач (скалярної оптимізації) зі складною адитивною цільовою функцією з ваговими коефіцієнтами, що враховують заздалегідь визначені пріоритети управління.

Перш ніж увести позначення, необхідні для математичної постановки задачі управління, сформулюємо основні припущення, виходячи з яких вона проводитиметься.

По-перше, прогноз притоку до водосховища задано на весь період планування в детермінованому вигляді, тобто у вигляді конкретного гідрографа стоку або набору гідро-

графів. Причому в останньому випадку задачу необхідно буде вирішувати для кожного гідрографа окремо.

По-друге, моделі, що описують рух води у водосховищі, є детермінованими моделями, що забезпечують можливість розрахунків із достатньою для практичних цілей точністю.

По-третє, передбачається також, що умови оптимальності режимів роботи розташованих вище за течєю водосховищ (камер), виражені у вимогах Правил експлуатації до величин скидних витрат води і підтримуваних позначок рівнів верхніх б'єфів, відображають режимні вимоги розміщених нижче гідровузлів із урахуванням установлених пріоритетів їх важливості.

Уводяться такі позначення:

N – число інтервалів планування /декад, діб/ у планованому періоді;

H_i – рівневі позначки верхнього б'єфу водосховища на кінець i -го інтервалу планування;

ΔH_i – зміна рівнів верхнього б'єфу водосховища, обчислюється як $\Delta H_i = H_i - H_{i-1}$;

q_i – середньоінтервальні витрати води через дамбу ГЕС;

H_i^+, H_i^- – верхні та нижні обмеження на рівневі позначки;

$\Delta H_i^+, \Delta H_i^-$ – верхні та нижні обмеження на зміни рівнів;

q_i^+, q_i^- – верхні та нижні обмеження на середньоінтервальні скидні витрати води;

Q_i – середньоінтервальні витрати притоку до водосховища (скидні витрати з вищерозміщеного);

H_0 – рівнева позначка на початок періоду планування;

$f(q, H, C) = f(\Delta H_i), \{i=1, N\}$ – цільова функція, що являє собою математичний запис залежності основних цілей регулювання стоку від режимних змінних q і H , виражених через ΔH .

З урахуванням наведених вище позначень математична постановка завдання полягатиме в наступному. Для заданого гідрографа притоку до водосховища (витрати води через дамбу вищерозміщеного водосховища) і рівневої позначки на початок періоду планування знайти значення зміни рівнів ΔH_i , при яких досягається максимум цільової функції

$$f(\Delta H, q, C) \rightarrow \min \quad (14)$$

з дотриманням обмежень:

$$\sum_1^N \Delta H_i = H_N - H_0 \quad (15)$$

$$H_i \leq H_0 + \sum_1^i \Delta H_i \leq H_i^+, i = \overline{1, N}, \quad (16)$$

$$\Delta H_i \leq \Delta H_i \leq \Delta H_i^+, i = \overline{1, N}, \quad (17)$$

Обмеження (15) – (17) враховують вимоги безпеки гідроспоруд, мінімізації втрат народному господарству від затоплень, можливого зменшення скидань та ін. При цьому обмеження (15), що забезпечує вихід на кінцеву задану рівневу позначку H_N , уводиться лише для випадків, коли це необхідно. Обмеження (16) забезпечує знаходження поточних рівнів вільної поверхні H_i в допустимих межах, обмеження (17) враховують додаткові вимоги до траєкторії зміни рівневих позначок залежно від формально неврахованих обставин.

Цільова функція у формулі (14) являє собою вираз

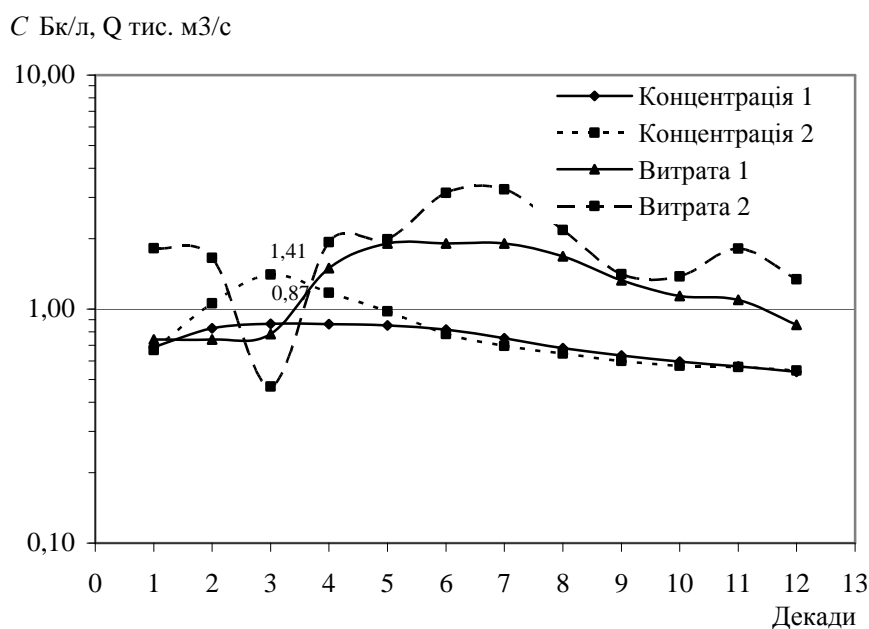
$$f(\Delta H) = \sum a_i f_i + \begin{cases} \frac{1}{2} \sum_1^N \beta_1 (q_i^+ - q_i)^2 | q_i > q_i^+ \\ \frac{1}{2} \sum_1^N \beta_2 (q_i^- - q_i)^2 | q_i < q_i^- \\ 0, q_i^- \leq q_i \leq q_i^+ \end{cases} \quad (18)$$

у якому перший доданок правої частини враховує ступінь досягнення цілей управління на основі набору функцій f_i (7) - (13) з урахуванням експертних переваг визначених за допомогою масових коефіцієнтів a_i , а другий виражає обмеження на максимальні та мінімальні витрати води у створі ГЕС за допомогою функції штрафу, до виконання яких треба прагнути при розробці режиму [6]. У виразі (18) β_1 і β_2 - масові коефіцієнти функції штрафу, q_i - витрати води, обчислені за однією з гідрологічних моделей і при заданих Q_i , $q_i = \varphi(h_i)$, для $Q_i > 2-3$ тис. м³/с. У випадках, коли Q_i менше вказаної межі, розрахунок можна проводити за кривими статичних об'ємів як

$$q_i = Q_i - \frac{W(H_{i-1} + \Delta H) - W(H_{i-1})}{\tau}, \quad (19)$$

де $W(H)$ - об'єм водосховища, що відповідає значенню H_i ; τ - часовий інтервал. Особливістю задачі регулювання високих повеней є те, що в період проходження максимальних витрат вимоги на дотримання обмежень по позначках рівнів і скидних витратах часто стають суперечливими. Це вимагає пошуку компромісних рішень шляхом опробування різних варіантів із подальшими експертними оцінками. Включення обмежень на скидні витрати до цільової функції з постійним коефіцієнтом важливості α_1 дозволяє за допомогою штрафної функції в процесі підбору керуючих параметрів, коли жорсткі обмеження на рівні відпрацьовані, одержувати варіанти режимів із порушенням обмежень на витрати. Слід також зазначити, що перенесення, як правило, нелінійних обмежень на ΔH , виражених через q_i , у цільову функцію дає змогу полегшити вирішення задачі.

На рисунку представлено результати моделювання за описаним алгоритмом для Київського водосховища на р. Дніпро за одних і тих самих граничних і початкових умов (витрат та концентрацій притоку, початкових рівнів води та концентрацій радіонуклідів). За показник якості управління було взято критерій максимального зниження пікової концентрації заданої радіаційної домішки, що вираховувався за формулою (10).



Розрахункові концентрації ^{137}Cs у воді при різних скидних витратах води у створі дамби Київської ГЕС у маловодний рік за березень – червень

Графіки характеризують вплив режимів пропуску весняної повені на динаміку концентрацій ^{137}Cs у воді за умов оптимального (витрата 1) (з точки зору отримання мінімуму

максимальної концентрації) і найгіршого (витрата 2) режимів роботи водосховища, розрахованого за критерієм максимізації пікової концентрації. Максимальні концентрації відповідно до отриманих режимів становлять 0,87 і 1,41 Бк/л, тобто різняться в 1,6 рази. У таблиці наведено детальну інформацію щодо водного балансу та балансу ^{137}Cs у воді за розрахунковий період.

**Результати розрахунків забруднення води Київського водосховища ^{137}Cs
для різних режимів його експлуатації в період весняної повені (березень - червень)
у маловодний рік 65 – 75 %-ної забезпеченості**

Декада	Приплив води Q_i , $\text{м}^3 \cdot 10^6$	Оптимальний режим			Найгірший режим		
		Відтік 1 q_i , $\text{м}^3 \cdot 10^6$	Концентрація 1 ^{137}Cs , Бк/л	Винос 1 ^{137}Cs , 10^9Бк	Відтік 2 q_i , $\text{м}^3 \cdot 10^6$	Концентрація 2 ^{137}Cs , Бк/л	Винос 2 ^{137}Cs , 10^9Бк
1	593,6	641,1	0,69	0,44	1572,5	0,67	1,05
2	635,0	641,1	0,83	0,53	1428,2	1,06	1,51
3	674,8	674,8	0,87	0,58	403,5	1,41	0,57
4	1293,4	1293,4	0,86	1,12	1671,0	1,17	1,96
5	1841,2	1648,5	0,85	1,40	1715,9	0,98	1,68
6	2116,8	1648,5	0,82	1,35	2712,1	0,78	2,12
7	1823,9	1648,5	0,75	1,24	2802,0	0,70	1,95
8	1451,5	1451,5	0,68	0,99	1878,3	0,65	1,21
9	1145,7	1145,7	0,63	0,73	1218,2	0,60	0,73
10	982,4	982,4	0,60	0,59	1191,5	0,57	0,68
11	946,9	946,9	0,57	0,54	1564,7	0,57	0,89
12	739,6	739,6	0,54	0,40	1156,9	0,55	0,63
Усього	14244,8	13462,0		9,90	19314,7		14,98

При цьому сумарний виніс радіонуклідів за розрахунковий період для обох варіантів відрізняється в 1,5 рази і становить $9,90 \cdot 10^9$ Бк та $14,98 \cdot 10^9$ Бк відповідно.

Викладене дає змогу зробити висновок про суттєвість впливу режимів експлуатації штучних водойм на радіоекологічний стан довкілля, необхідність розвитку засобів моделювання з використанням оптимізаційних моделей прогнозування режимів їх роботи, а також розширення їх використання з метою підготовки різних сценаріїв управління гідроспорудами в аварійних або штатних умовах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Хилюк Л.Ф., Краснитский С.М., Мацак И.К. и др. Многокритериальная задача рационального планирования комплексного использования водных ресурсов бассейнов рек (на примере р.Днепр) // Автоматика. - 1982. - № 3. - С. 47 - 55.
2. Zheleznyak M.Y., Demtchenko R.I., Kuzmenko Yu. et al. Mathematical modelling of radionuclide dispersion in the water bodies of the Chernobyl NPP zone and in the Dnieper Reservoirs // Hydrological Impact of Nuclear Power Plants. Proc. UNESCO Workshop-92, UNESCO Press, Paris, 1993. - P. 173 - 185.
3. Hetrick D.M., McDowell-Boyer L.M., Sjoreen, A.L. et al. RIVER-RAD: A computer code for simulating the transport of radionuclides in rivers.
4. Железняк М.Й., Кузьменко Ю.И., Ткалич П.В. ВОТОКС - система поддержки принятия решений по управлению каскадом водохранилищ по экологическим критериям // Системы поддержки принятия решений в экологии. - К.: Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова, 1992.
5. Правила експлуатації водосховищ Дніпровського каскаду / А. В. Яцик, А. І. Томільцева, М. Г. Томільцев та ін. – К.: Генеза, 2003. – 176 с.
6. Кузьменко Ю.И. Оптимальное управление каскадом водохранилищ по водохозяйственным и экологическим критериям // Системный анализ и методы математического моделирования в экологии. - К.: Ин-т кибернетики им. В. М. Глушкова, 1990. - С. 73 - 78

Надійшла до редакції 22.12.08