

**Ковальчук П. І., д.т.н., г.н.с., Ковальчук В. П., д.т.н., г.н.с.,
Балихіна Г. А., к.т.н., старший дослідник** (Інститут водних проблем і
меліорації НААН України, м. Київ,
kovalchuk.pavlo.ivanovich@gmail.com, volokovalchuk@gmail.com,
maslova-anna@ukr.net), **Демчук О. С., к.т.н., доцент, Придюк В. П.,
аспірант** (Національний університет водного господарства та
природокористування, м. Рівне, o.s.demchuk@nuwm.edu.ua,
v.p.prydyuk@nuwm.edu.ua)

СИСТЕМНА ОПТИМІЗАЦІЯ ЕКСТРЕМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ РОЗБАВЛЕННЯМ МІНЕРАЛІЗОВАНИХ ВОД В БАСЕЙНАХ РІЧОК

Формалізована комбінована система екстремального управління для оптимізації процесу розбавлення мінералізованих вод в басейні річки. Запропонована математична модель поширення водних мас і забруднень в руслі річки від точкових і дифузних джерел на основі системи різницевих балансових рівнянь, при дії стохастичних неконтрольованих перешкод. Стосовно таких умов, як адекватний інструментарій, розроблена система комбінованого управління, що використовує прийняття рішень за еколого-економічними критеріями на основі аналізу вхідних і вихідних даних одночасно, ідентифікації та відслідковування оптимуму в умовах зміщення під впливом перешкод екстремальної характеристики системи. Для управління в соціо-еколого-економічних системах, якими є басейни річок, необхідна системна багатокритеріальна оптимізація при прийнятті рішень.

Ключові слова: системна оптимізація; розбавлення мінералізованих вод; дифузні та точкові джерела; комбінований принцип; екстремальне управління; різницеві балансові рівняння; гранично допустимі скиди.

Вступ. Відповідно до Директиви ЄС [1] управління водними ресурсами повинно здійснюватися за басейновим принципом. Наявність інтегрованих підходів [2] забезпечує економічно ефективне водокористування з досягненням доброго екологічного стану річок. Для ефективного управління басейном річки, як

складною соціо-природно-технічною системою, в межах системного підходу для управління процесами необхідно розвивати принципи, методи і моделі, які вже використовувались і довели свою ефективність в складних технічних системах [3]. Методичні основи теорії автоматичного регулювання, зокрема комбінований принцип управління [3], пропонується розвивати в системі управління водними ресурсами річкового басейну. Це забезпечить прийняття рішень на основі системної оптимізації за економічно ефективними та екологічно збалансованими критеріями в умовах невизначеності і водних ризиків.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю розвитку принципу екстремального управління для системної оптимізації водних ресурсів річкового басейну з використанням лінійних і нелінійних критеріїв для розбавлення мінералізованих вод.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи моделювання, які використовувались в технічних системах, знайшли широке застосування в моделюванні соціо-природно-технічних систем [4]. Це імітаційні моделі басейну річок [5]. З розвитком методології інтегрованого управління водними ресурсами за басейновим принципом [6–9] виникла необхідність системного управління [9]. Система управління басейном річки [9] використовує імпульсний метод в комбінованій системі. Для оптимізації водообміну в Краснопавлівському водосховищі пропонується сценарний аналіз варіантів на основі імітаційно-оптимізаційного моделювання [10] за економічними та екологічними критеріями.

Проте досягнення доброго екологічного стану річок пов'язане з ефективним водовідведенням. Процес водовідведення включає три послідовні ланки: акумулювання вод в ставках-накопичувачах; розбавлення високомінералізованих вод до рівня нормативно-допустимих скидів [11]; промивка та екологічне оздоровлення річки для використання вод в галузях економіки [12–16]. Для обґрунтування промивки та екологічного оздоровлення річок використовуються експериментальні дослідження та математичне моделювання [17–21]. Проте відсутні роботи з розробки систем управління розбавленням вод, оптимізації процесу розбавлення за екологічними та економічними критеріями.

Мета дослідження полягає в розвитку теорії комбінованих систем екстремального управління для системної оптимізації управління розбавленням мінералізованих вод в басейні річки, що

забезпечує мінімізацію витрат води та підтримання її якості в межах, які не перевищують гранично допустимих скидів.

Модель комбінованої системи та критерії екстремального управління. Розглядається технологічний процес розбавлення мінералізованих вод на ділянці річки від точкового джерела забруднень (труба, притоки та ін.). Вода для розбавлення надходить з водосховища. В процесі поширення водного потоку між водосховищем і лівою границею ділянки річки діють неконтрольовані перешкоди $\xi_k(t)$, $k = 1, \dots, l$ від точкових та дифузних джерел забруднення

$$U_0(t_n) = U_0^n + \xi_k(t_n). \quad (1)$$

Стосовно перешкоди $\xi_k(t_n)$ відомо, що вона описується дискретним однорідним ланцюгом Маркова зі скінченним числом станів $\xi_k(t)$, $k = 1, \dots, l$.

Аналіз системи управління розбавленням вод показав необхідність застосувати комбіновані системи екстремального управління в умовах невизначеності (рис. 1).

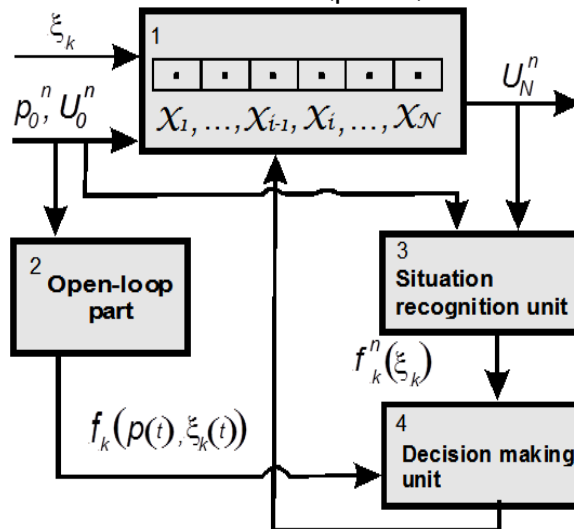


Рис. 1. Структурно-функціональна схема комбінованої системи екстремального управління розбавленням вод на ділянці річки: 1 – об'єкт управління; 2 – розімкнута частина; 3 – блок розпізнавання ситуацій; 4 – блок прийняття рішень

Ідентифікація точкових систем (рис. 1) починається з ідентифікації розімкнутої частини системи

$$f_k(t) = f(p(t), \xi_k(t)), \quad k=1, \dots, l, \quad (2)$$

для кожного з характерних значень перешкоди $\xi_k(t)$. Це означає, що для збурюючого впливу (значення витрат з водосховища $p_i(t)$) визначають управляючий вплив (витрати з труби на розбавлення $f_k(t)$). При цьому екстремальна характеристика системи управління виражає концентрацію в вихідному N-му створі на правій границі ділянки річки

$$U_N^n = \Phi(p_i(t), f_k(t), \xi_k(t)). \quad (3)$$

Критерії задаються як обмеження у вигляді двосторонніх нерівностей

$$U_{\text{дон}} \leq U_N^n \leq U_{\text{ГДС}}, \quad (4)$$

де $U_{\text{ГДС}}$ – концентрація гранично-допустимих скидів; $U_{\text{дон}}$ – допустиме значення концентрації скидів в створі повного перемішування N. Тут функція Φ виражається як результат імітаційного моделювання на основі запропонованих моделей динаміки поширення забруднень; U_N^n – концентрація в контрольному створі нижче створу повного перемішування на правій ділянці річки. Тут $U_{\text{дон}} = \text{const}$ – екологічний критерій; $U_{\text{ГДС}} = \text{const}$ – економічний критерій.

Якщо для $U_N^n < U_{\text{дон}}$, виконуються екологічні вимоги, проте в процесі розбавлення відбуваються значні перевитрати води. При перевищенні концентрації U_N^n гранично-допустимих скидів $U_{\text{ГДС}}$ не виконуються екологічні вимоги. В обох випадках необхідно провести корекцію управляючого впливу (витрат з труби): в першому випадку управляючий вплив f_k збільшують, в другому – f_k необхідно зменшувати для досягнення умов (4).

Управлінські рішення приймаються на основі замкнутої системи екстремального управління (рис. 1) з коректором – розпізнавальною системою на основі визначення міри близькості поточного зображення U_N^n за мірою близькості його до вихідної величини – одного з прототипів $U_N^n(\xi_k), k=1, \dots, l$, тобто:

$$\xi_k = \arg \min |U_N^n - U_N^n(\xi_k)|, \xi_k \in [\xi_1, \dots, \xi_l] \quad (5)$$

На основі системного моделювання для кожної ситуації ξ_k визначається характеристика розімкнутої частини за залежністю (5). В результаті розпізнавання ситуації (перешкоди ξ_k) визначається екстремальна характеристика (3). Прийняття рішень (блок 4) здійснюється згідно з розрахунками за залежністю $f_k(p(t), \xi_k(t))$ розімкнутої частини комбінованої системи екстремального управління. При цьому для відомого збурюючого впливу p_i^n підбирається регулюючий вплив f_i^n за встановленою залежністю (2).

Математичні моделі розбавлення вод в умовах точкового та дифузних джерел забруднення. Баланс водних мас в послідовності комірок на ділянці річки, в умовах точкового та дифузних джерел, визначається системою різницевих рівнянь збереження мас та нерозривності потоку:

$$W_i^{n+1} = r(W_i^n + q_i^n) + (1-r)(W_{i-1}^n + q_{i-1}^n) + F_i^n, \quad (6)$$

де $0 \leq r \leq 1$; $i=1, \dots, N$; W_i^{n+1} – водні ресурси в i -й комірці в $(n+1)$ -й момент часу; W_i^n, W_{i-1}^n – об'єми води в i -й та $(i-1)$ -й комірці в n -й момент часу; q_i^n, q_{i-1}^n – об'єми води в i -й та $(i-1)$ -й комірці в n -й момент часу, що поступають з бічних приток або фільтруються з ґрунтових вод; r – коефіцієнт переносу, що відображає швидкість потоку (при $r=0$ водні маси повністю переходять за визначений час Δt з $i-1$ -ої в i -ту комірку, при $r=1$ – стояча вода); F_i^n – водні ресурси, що надійшли від точкового джерела в комірку $i=i^*$; N – кількість комірок, визначених на ділянці річки. Точкове джерело в комірці $i=i^*$ задається кусковою функцією:

$$F_i^n = \begin{cases} \int_{t_{n-1}}^{t_n} f_{i^*}(t) dt, & \text{if } i = i^*; \\ 0, & \text{if } i \neq i^*, i = 1, \dots, N, \end{cases} \quad (7)$$

де $f_{i^*}(t)$ – витрати води з точкового джерела (труби), що надходять на розбавлення.

Одночасно з перенесенням водних мас, здійснюється перенесення та розбавлення гідрохімічних елементів (мінералізації, хлоридів, сульфатів та ін.), що знаходяться в річковій воді і в точковому джерелі забруднень. Балансові рівняння динаміки перенесення забруднень, після їх перемішування, мають вигляд:

$$U_i^{n+1} = \frac{r(W_i^n U_i^n + q_i^n C_i^n) + (1-r)(W_{i-1}^n U_{i-1}^n + q_{i-1}^n C_{i-1}^n) + F_i^n S_i^n}{W_i^{n+1}}, \quad i=1, \dots, n, \quad (8)$$

де $rW_i^n U_i^n$ – водні ресурси з концентрацією U_i^n в i -й комірці в n -й момент часу; $q_i^n C_i^n$ – водні ресурси з концентрацією C_i^n , які фільтруються в i -ту комірку з ґрунтових вод або поступають з приток; $(1-r)W_{i-1}^n U_{i-1}^n$ – водні ресурси з концентрацією U_{i-1}^n , що надійшли в i -ту комірку з $(i-1)$ -ї комірки; $(1-r)q_{i-1}^n C_{i-1}^n$ – водні ресурси з концентрацією C_{i-1}^n , що фільтруються з ґрунтових вод або поступають з приток і надійшли з $(i-1)$ -ї комірки; S_i^n – концентрація вод, що поступають в річку на розбавлення з точкового джерела (зі ставка-накопичувача).

Для розрахунків за моделями (6) і (8) важливо задати крайові умови: початкові умови W_i^0 – водні ресурси та концентрації U_i^0 в кожній комірці; граничні умови на лівій границі – концентрації U_i^1 та водні ресурси в першій комірці W_1^{n+1} обчислюються за формулою:

$$W_1^{n+1} = rW_1^n + \int_{t_n}^{t_{n+1}} (p_0(t) + \eta(t)) dt, \quad (9)$$

де $p_0(t)$ – витрати, що надходять на ділянку річки на розбавлення з водосховища; $\eta(t)$ – неконтрольовані витрати, що надходять в річку на ділянці «водосховище – ліва границя ділянки річки».

Визначеними є витрати $f_{i*}(t)$ та водні ресурси F_i^n функції джерела. Відомою є концентрація S_i^n води, що подається зі ставка-накопичувача. Величини $q_i^n, C_i^n, \eta(t)$ не піддаються вимірюванню, є неконтрольованими і їх можна розглядати як деякі перешкоди в системі управління.

Формалізовані математичні моделі мають загальний характер і можуть бути використані для довільної річки, в урахуванням в ній конкретних дифузних та точкових джерел забруднення води.

Системне моделювання екстремального управління. Застосування екстремального управління покажемо на прикладі системи процесу розбавлення мінералізованих вод р. Інгулець після акумуляції шахтних вод в ставку-накопичувачу, розміщеному в балці Свистунова. Місце скиду води в річку Інгулець представляє собою

трубу великого діаметра. Такий скид вод в р. Інгулець моделюється як точкове джерело забруднень (рис. 2).



Рис. 2. Схема балки Свистунова та скид шахтних вод у р. Інгулець

Забруднення р. Інгулець здійснюється не тільки організованими скидами зі ставків-накопичувачів в період з листопада по лютий-березень місяці. В цей же час і впродовж року спостерігається постійне забруднення р. Інгулець неорганізованими скидами з відвалів (дифузні джерела забруднень) внаслідок фільтрації з підземних та ґрунтових вод. Вони розташовані на прилеглий території Криворізького залізорудного басейну. Їх дія зосереджена на ділянці річки від Карачунівського водосховища до п. Андріївка, де проводяться вимірювання згідно програми Державного моніторингу вод. В процесі поширення забруднень відбувається осідання в мулі та захоронення важких металів в донних відкладах. Сольове забруднення практично не піддається самоочищенню в річці Інгулець і фіксується в п. Снігурівка, де здійснюється забір води на Інгулецьку зрошувальну систему.

Для запобігання аварійним ситуаціям, в міжвегетаційний період 2020–2021 років (з 1 листопада по 15 березня) було дозволено [11] скидання надлишкових зворотних вод гірничорудних підприємств Кривбасу. Фактично з 20 січня по 15 березня 2021 року скинуто 6,3 млн м³ і розбавлено за розробленим регламентом [22] з неперевищенням гранично-допустимих скидів (ГДС).

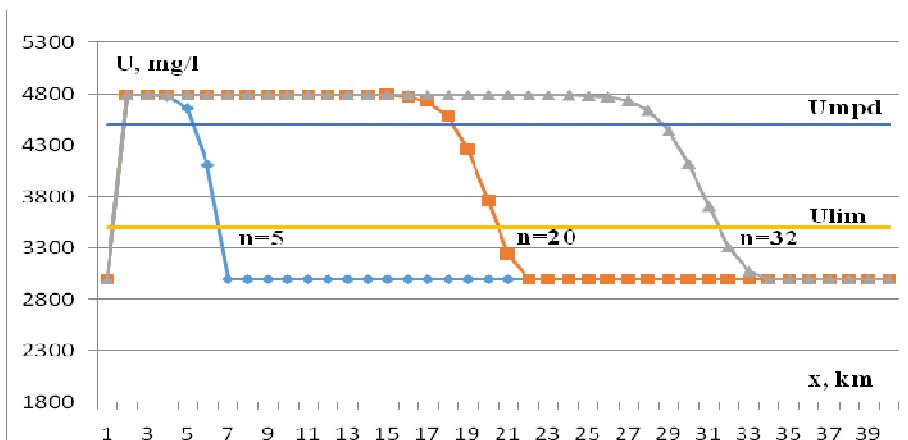
За показником хлоридів $U_{ГДС} = 4,5$ г/дм³, а $U_{дон} = 3,5$ г/дм³. В цих межах необхідно підтримувати концентрацію U_N^n в вихідному

створі.

Неорганізовані скиди з дифузних та точкових джерел забруднення, які діють на ділянці річки і не піддаються вимірюванням є неконтрольованими перешкодами. Перешкоди U_N^n суттєво змінюють екстремальну характеристику в межах $\xi_k^1(t_n) \in [\xi^{\min}; \xi^{\max}]$. Дані Державного моніторингу вод в р. Інгулець показують, що за показником хлоридів в умовах відсутності промивки річки, фонові значення змінюються в межах 1000-3000 мг/дм³.

Скид зворотних вод зі ставка-накопичувача в р. Інгулець здійснюється одним поверхневим зосередженим випуском (рис. 2) з концентрацією розчину за хлоридами $S_2(t)=20000$ г/дм³. Відкачку води на скид забезпечують дві плавучі насосні станції, які мають регульований скид шахтних вод в діапазоні від 0,6 до 1,7 м³/с. З Карачунівського водосховища витрати води є в інтервалі $p(t) \in [2; 10]$, м³/с.

Для системного моделювання екстремального управління процесом розбавлення мінералізованих вод розроблено програмний комплекс, що дозволяє проводити імітаційне моделювання з корекцією стану об'єкта в умовах перешкоди. Так, на основі моделювання розрахована динаміка поширення забруднень (рис. 3, а)



а)

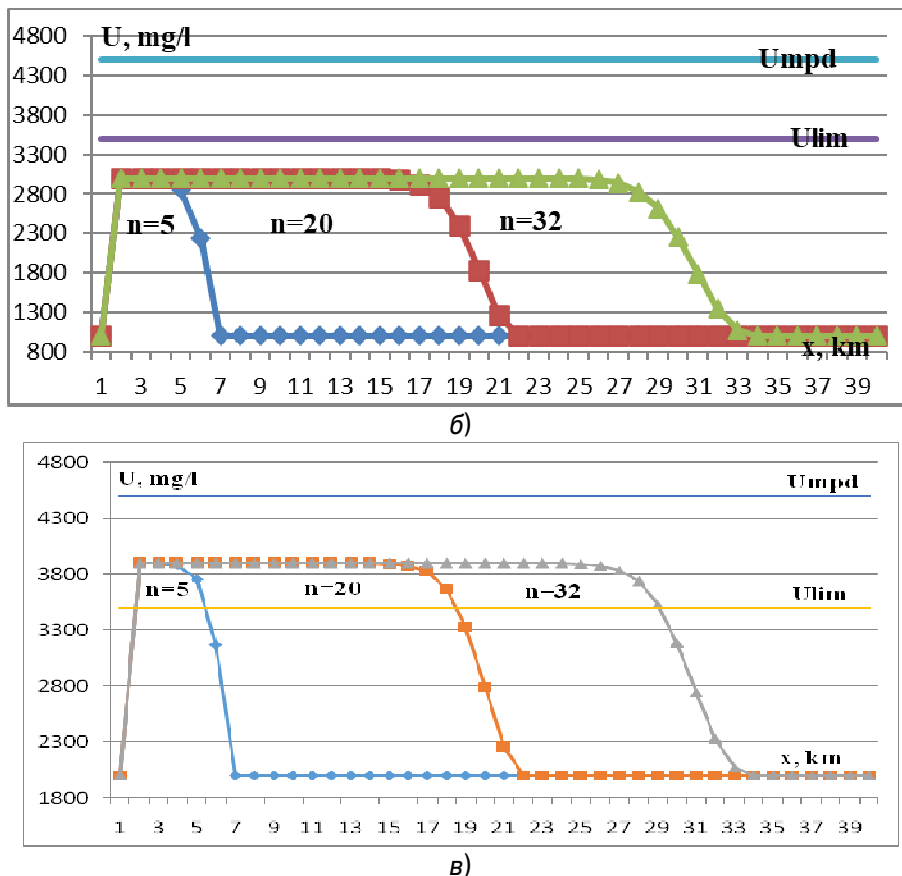


Рис. 3. Залежність розрахункової концентрації забруднення на вихідній ділянці річки у різні моменти часу залежно від величини перешкоди:
а – $\xi_1(t)=2000$ мг/л; б – $\xi_2(t)=3000$ мг/л; в – $\xi_3(t)=1000$ мг/л

при гідрологічних характеристиках р. Інгулець, витратах з водосховища $p(t)=6$ м³/с, концентрація хлоридів 20000 мг/л, витратах зі ставка-накопичувача $f(t)=1,6$ м³/с, перешкоди $\xi(t)=2000$ мг/л (стан об'єкта). При цьому концентрація хлоридів в N-му контрольному створі на віддалі 25 км від точки розбавлення становить 3800 мг/л і знаходиться в межах $U_{дон} \leq U_N^n \leq U_{ГДС}$, отже корекція перешкоди (стану об'єкта) не проводиться.

У випадку, якщо перешкода змінює стан об'єкта $\xi_3(t_n)=3000$ мг/л, $U_N^n > U_{ГДС}$ (рис. 3, б), не виконуються екологічні вимоги до умов розбавлення вод. Роль коректора з розпізнаваючою

системою полягає в визначенні нового стану об'єкта і перехід системи екстремального управління на відповідну характеристику розімкнутої частини.

При значенні перешкоди до $\xi_1(t_n)=1000$ мг/л та $U_{don} > U_N^n$ здійснюються значні перевитрати води на розбавлення (рис. 3, в). Коректор з розпізнаваючою системою розпізнає ситуацію і встановлює систему управління на іншу характеристику розімкнутої частини, що задається множиною залежностей (2).

Порівняльний аналіз імітаційного моделювання з фактичним розбавленням вод

Порівняльний аналіз фактично проведеного розбавлення вод в період з 20 січня по 15 березня 2021 року з моделюванням процесу за розробленим алгоритмом комбінованої системи екстремального управління показав за показником хлоридів в обох випадках задовільну якість вод (рис. 4).

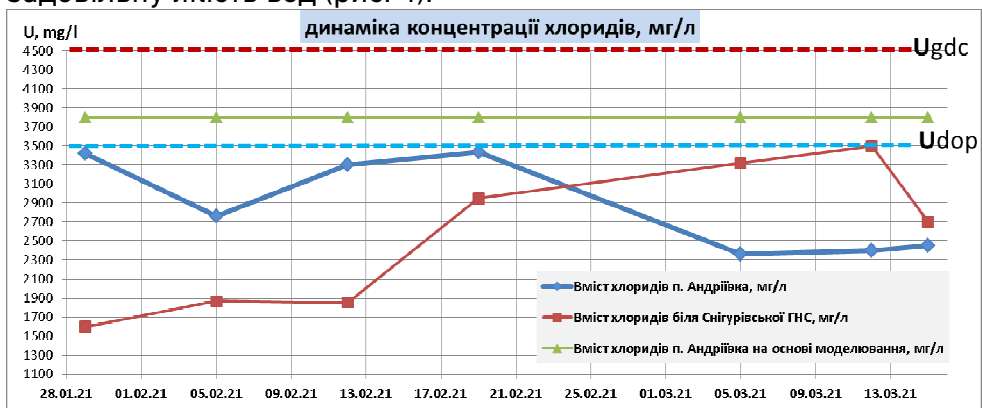


Рис. 4. Фактична та розрахункова (п. Андріївка та Снігурівська ГНС) динаміка концентрації хлоридів

Проте в регламенті скиду надлишків зворотних вод зі ставка-накопичувача за контрольні розрахунки концентрацій необґрунтовано прийнято за хлоридами – 3,5 г/дм³ [23], що призводить до перевитрат водних ресурсів при розбавленні вод.

Отже, за величиною витрат води на промивку розроблений варіант моделювання комбінованого екстремального управління має значні переваги. Економія води становить біля 17,5 млн м³ при розбавленні 6,3 млн м³ стоків (рис. 4). Таким чином, комбінована система екстремального управління, що оптимізує процес ухвалення

рішень за принципом двокритеріальної оптимізації [24] має суттєві переваги в порівнянні з подачею води за існуючим регламентом [22].

Перспективи подальших досліджень полягають в розробці Регламенту розбавлення вод на принципах комбінованого управління, який більш ефективний за економічними та екологічними критеріями ніж існуючі регламенти. Буде розроблена технологія управління розбавленням, яка надає можливість суттєво економити водні ресурси при підтриманні показників якості води в допустимих межах (екологічний критерій).

Висновки. Комбінована система екстремального управління розбавленням мінералізованих вод дозволяє оптимізувати процес управління за економічними та екологічними критеріями. Це досягається на основі системного моделювання для підтримання якості води в допустимих межах. При цьому забезпечується вибір управлінських рішень, що мінімізують витрати води на розбавлення мінералізованих скидних вод. Системний аналіз управління розбавленням вод на прикладі р.Інгулець і порівняння з розбавленням за існуючим регламентом 2021 року підтверджує можливість економії до 17,5 млн м³ промивної води при розбавленні 6,3 млн м³ стоків.

Формалізовані математичні моделі можуть бути використані для моделювання дифузних і точкових джерел забруднень та розбавлення в басейнах інших річок. При цьому структурно-функціональна схема системи управління повинна бути адаптована до гідрологічних умов та параметрів конкретної річки.

1. UE Water Framework Directive 2000/60/EC. Definition of Main Terms. 2. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо впровадження інтегрованих підходів в управлінні водними ресурсами за басейновим принципом : Закон України від 4 жовтня 2016 року № 1641-VIII.
3. Ивахненко А. Г. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления. Київ : Техніка, 1969. 392 с.
4. Ковальчук П. І., Ковальчук В. П. Системне управління як розвиток інтегрованого управління водним режимом меліорованих територій. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки*. 2015. Вип. 3(71).
5. Экологические системы. Адаптивная оценка и управление / под ред. К. С. Холинга. М. : Мир, 1981. 396 с.
6. Dukhovny V., Sokolov V., Manthrithilake H. Integrated Water Resources Management: Putting Good Theory into Real Practice. Central Asian Experience. Tashkent : SIC ICWC. 2009.
7. Сташук В., Яцик А. Україна на шляху до басейнового принципу управління водними ресурсами. *Водне господарство України*.

2007. № 4. С. 6–10. **8.** Kovalchuk P., Kovalenko R., Kovalchuk V., Demchuk O., Balykhina H. Integrated Water Management and Environmental Rehabilitation of River Basins Using a System of Non-linear Criteria / In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds). *Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEEA*. 2020. P. 40–51. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-55506-1_4 (дата звернення: 02.02.2024). **9.** Системне моделювання і управління водо- і землекористуванням : монографія / Ковальчук П. І., Матяш Т. В., Ковальчук В. П., Демчук О. С., Балихіна Г. А., Герус А. В., Пендак Н. В. Київ : Аграрна наука, 2019. 608 с. **10.** Kovalchuk P., Rozhko V., Kovalchuk V., Balykhina H., Demchuk O. Optimization of integrated water exchange management technologies in territorial systems for conditions of sustainable development. *14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies*. 2019. Vol. 1. P. 80–83. **11.** Про запобігання виникненню аварійної ситуації на ставку-накопичувачу, розташованому на території Криворізького району Дніпропетровської області : Розпорядження Кабінету Міністрів України № 1670-р від 28.12.2020 року. **12.** Keller I., Schwartz R. Instrument of the integrated pollutant/sediment management in the Elbe catchment area. *Monitoring, Modelling & Management of Pollutants : International Conference RIVER BASINS*. 2015. Germany, Karlsruhe, 2015. P. 67–74. **13.** Бурлака В. О. Промивка р. Інгулець у 2011 році. *Водне господарство України*. 2011. № 5. С. 17–18. **14.** Бабій П. О., Лисюк О. Г. Рукотворна повинь на р. Рось. *Водне господарство України*. 2010. № 5. С. 4–6. **15.** Investigation of Options to increase the flood mitigation performance of Wivenhoe Dam. Final Report. Brisben : GHD, 2011. 146 p. **16.** Environmental assessment accelerated Mahaweli development program. US Agency for International Development. New York : TAMS, 1980. **17.** Mah D. Y. S., Putuhena F. J. bt Rosli N. A. Modelling of river flushing and water quality in a tributary constrained by barrages. *Irrig Drainage Syst*. 2011. № 25. P. 427–434. URL: <https://doi.org/10.1007/s10795-011-9122-1>. (дата звернення: 02.02.2024). **18.** Tena A., Vericat D. Batalla R. J. Suspended sediment dynamics during flushing flows in a large impounded river (the lower River Ebro). *J Soils Sediments*. 2014. № 14. P. 2057–2069. URL: <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0987-0>. (дата звернення: 02.02.2024). **19.** Cui G., Su X., Liu Y. et al. Effect of riverbed sediment flushing and clogging on river-water infiltration rate: a case study in the Second Songhua River, Northeast China. *Hydrogeol J*. 2021. № 29. P. 551–565. URL: <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02218-7>. (дата звернення: 02.02.2024). **20.** Yamamoto K., Tsujimura H., Nakajima M. et al. Flushing rate and salinity may control the blooms of the toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarense* in a river/estuary in Osaka Bay, Japan. *J Oceanogr*. 2013. № 69. P. 727–736. URL: <https://doi.org/10.1007/s10872-013-0203-7>. (дата звернення: 02.02.2024). **21.** Huggett R. D., Purdie D. A. Haigh I. D.

Modelling the Influence of Riverine Inputs on the Circulation and Flushing Times of Small Shallow Estuaries. *Estuaries and Coasts*. 2021. № 44. P. 54–69. URL: <https://doi.org/10.1007/s12237-020-00776-3>. (дата звернення: 02.02.2024). **22.** Індивідуальний регламент скидання надлишків зворотних вод гірничорудних підприємств Кривбасу зі ставка-накопичувача б. Свистунова у р. Інгулець у міжвегетаційний період 2020–2021 років / ПРАТ «Укрводпроект». Київ, 2020. **23.** Шерстюк Н. П., Хільчевський В. К. Особливості гідрохімічних процесів у техногенних та природних водних об'єктах Кривбасу : монографія. Дніпропетровськ : ТОВ «Акцент ПП», 2012. 263 с. **24.** Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. Москва : Наука, 1982. 253 с.

REFERENCES

1. UE Water Framework Directive 2000/60/EC. Definition of Main Terms. **2.** Pro vnesennia zmin do deiakykh zakonodavchykh aktiv Ukrainy shchodo vprovadzhennia integrovanykh pidkhodiv v upravlinni vodnymy resursamy za baseinovym pryntsypom : Zakon Ukrainy vid 4 zhovtnia 2016 roku № 1641-VIII.
3. Yvakhnenko A. H. Samoobuchaiushchiesia systemy raspoznavaniya y avtomatycheskoho upravleniya. Kyiv : Tekhnika, 1969. 392 s. **4.** Kovalchuk P. I., Kovalchuk V. P. Systemne upravlinnia yak rozvytok integrovanoho upravlinnia vodnym rezhytom meliorovanykh terytorii. *Visnyk NUVHP. Ser. Tekhnichni nauky*. 2015. Vyp. 3(71). **5.** Ekolohycheskye systemy. Adaptivnaia otsenka y upravlenye / pod red. K. S. Kholynha. M. : Myr, 1981. 396 s. **6.** Dukhovny V., Sokolov V., Manthrithilake H. Integrated Water Resources Management: Putting Good Theory into Real Practice. Central Asian Experience. Tashkent : SIC ICWC. 2009. **7.** Stashuk V., Yatsyk A. Ukraina na shliakhu do baseinovooho pryntsypu upravlinnia vodnymy resursamy. *Vodne hospodarstvo Ukrainy*. 2007. № 4. S. 6–10. **8.** Kovalchuk P., Kovalenko R., Kovalchuk V., Demchuk O., Balykhina H. Integrated Water Management and Environmental Rehabilitation of River Basins Using a System of Non-linear Criteria / In: Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds). *Advances in Computer Science for Engineering and Education III. ICCSEEA*. 2020. P. 40–51. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-55506-1_4 (дата звернення: 02.02.2024). **9.** Systemne modeliuвання i upravlinnia vodo- i zemlekorystuvanniam : monohrafiia / Kovalchuk P. I., Matiash T. V., Kovalchuk V. P., Demchuk O. S., Balykhina H. A., Herus A. V., Pendak N. V. Kyiv : Ahrarna nauka, 2019. 608 s. **10.** Kovalchuk P., Rozhko V., Kovalchuk V., Balykhina H., Demchuk O. Optimization of integrated water exchange management technologies in territorial systems for conditions of sustainable development. *14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies*. 2019. Vol. 1. P. 80–83. **11.** Pro zapobihannia vynyknenniu avariinoi sytuatsii na stavku-nakopychuvachu, roztashovanomu na terytorii

Kryvorizkoho raionu Dnipropetrovskoi oblasti : Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy № 1670-r vid 28.12.2020 roku. **12.** Keller I., Schwartz R. Instrument of the integrated pollutant/sediment management in the Elbe catchment area. *Monitoring, Modelling & Management of Pollutants* : International Conference RIVER BASINS. 2015. Germany, Karlsruhe, 2015. P. 67–74. **13.** Burlaka V. O. Promyvka r. Inhulets u 2011 rotsi. *Vodne hospodarstvo Ukrainy*. 2011. № 5. S. 17–18. **14.** Babii P. O., Lysiuk O. H. Rukotvorna povin na r. Ros. *Vodne hospodarstvo Ukrainy*. 2010. № 5. S. 4–6. **15.** Investigation of Options to increase the flood mitigation performance of Wivenhoe Dam. Final Report. Brisben : GHD, 2011. 146 p. **16.** Environmental assessment accelerated Mahaweli development program. US Agency for International Development. New York : TAMS, 1980. **17.** Mah D. Y. S., Putuhena F. J. bt Rosli N. A. Modelling of river flushing and water quality in a tributary constrained by barrages. *Irrig Drainage Syst.* 2011. № 25. P. 427–434. URL: <https://doi.org/10.1007/s10795-011-9122-1>. (data zvernennia: 02.02.2024). **18.** Tena A., Vericat D. Batalla R. J. Suspended sediment dynamics during flushing flows in a large impounded river (the lower River Ebro). *J Soils Sediments*. 2014. № 14. P. 2057–2069. URL: <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0987-0>. (data zvernennia: 02.02.2024). **19.** Cui G., Su X., Liu Y. et al. Effect of riverbed sediment flushing and clogging on river-water infiltration rate: a case study in the Second Songhua River, Northeast China. *Hydrogeol J.* 2021. № 29. P. 551–565. URL: <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02218-7>. (data zvernennia: 02.02.2024). **20.** Yamamoto K., Tsujimura H., Nakajima M. et al. Flushing rate and salinity may control the blooms of the toxic dinoflagellate *Alexandrium tamarens* in a river/estuary in Osaka Bay, Japan. *J Oceanogr.* 2013. № 69. P. 727–736. URL: <https://doi.org/10.1007/s10872-013-0203-7>. (data zvernennia: 02.02.2024). **21.** Huggett R. D., Purdie D. A. Haigh I. D. Modelling the Influence of Riverine Inputs on the Circulation and Flushing Times of Small Shallow Estuaries. *Estuaries and Coasts*. 2021. № 44. P. 54–69. URL: <https://doi.org/10.1007/s12237-020-00776-3>. (data zvernennia: 02.02.2024). **22.** Indyvidualnyi rehlament skydannia nadlyshkiv zvorotnykh vod hirnychorudnykh pidpriemstv Kryvbasu zi stavka-nakopychuvacha b. Svystunova u r. Inhulets u mizhvehetatsiyni period 2020–2021 rokiv / PRAT «Ukrvodproiekt». Kyiv, 2020. **23.** Sherstiuk N. P., Khilchevskiy V. K. Osoblyvosti hidrokhimichnykh protsesiv u tekhnohennykh ta pryrodnykh vodnykh obiektakh Kryvbasu : monohrafiia. Dnipropetrovsk : TOV «Aktsept PP», 2012. 263 s. **24.** Podynovskyi V. V., Nohyn V. D. Pareto-optymalnye resheniya mnohokryteryalnykh zadach. Moskva : Nauka, 1982. 253 s.

Kovalchuk P. I., Doctor of Engineering, Chief Researcher (Institute of Water Problems and Land Reclamation NAAS of Ukraine, Kyiv, kovalchuk.pavlo.ivanovich@gmail.com), **Kovalchuk V. P., Doctor of Engineering, Chief Researcher** (Institute of Water Problems and Land Reclamation NAAS of Ukraine, Kyiv, volokovalchuk@gmail.com), **Balykhina H. A., Candidate of Engineering (Ph.D.), Senior Researcher** (Institute of Water Problems and Land Reclamation NAAS of Ukraine, Kyiv, maslova-anna@ukr.net), **Demchuk O. S., Candidate of Engineering (Ph.D.), Docent, Associate Professor** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, o.s.demchuk@nuwm.edu.ua), **Prydyuk V. P., Post-graduate Student** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, v.p.prydyuk@nuwm.edu.ua)

SYSTEM OPTIMIZATION OF MINERALIZED WATERS DILUTION EXTREME MANAGEMENT IN RIVER BASINS

A combined system of extreme management has been formalized to optimize the process of mineralized waters dilution in river basins. A mathematical model for the propagation of water masses and pollution in the riverbed from point and diffuses sources based on a system of difference balance equations under the action of stochastic uncontrolled interference is proposed. As an adequate toolkit, a combined control system has been developed, in which decision-making is carried out on the basis of environmental and economic criteria using the analysis of input and output data simultaneously, identifying and tracking the optimum under the influence of extreme system characteristics. To manage such socio-ecological-economic systems as river basins, systemic multi-criteria optimization in decision-making is necessary. The structural and functional scheme of the extreme control system is considered. The scheme of the open part is presented. The closed part with the corrector – the recognition system provides feedback. At the same time, the extreme management system adapts to the hydrological conditions and water quality parameters of a particular river. A model for combined extreme management of mine water dilution management on the Ingulets River section according to ecological and economic criteria has been implemented. This minimizes the cost of water for dilution.

Keywords: system optimization; dilution of mineralized waters; diffuse and point sources; combined principle; extreme control; differential balance equations; maximum allowable discharges.