

DOI: <https://doi.org/10.31073/mivg202102-296>

Available at (PDF): <http://mivg.iwpim.com.ua/index.php/mivg/article/view/296>

УДК 001.891.54-024.84+658.5:556:332.(081)

КОМБІНОВАНА СИСТЕМА ЕКСТРЕМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ РОЗБАВЛЕННЯМ МІНЕРАЛІЗОВАНИХ ВОД У БАСЕЙНАХ РІЧОК

П.І. Ковальчук¹, докт. техн. наук, О.С. Демчук², канд. техн. наук, В.П. Ковальчук³, докт. техн. наук, Г.А. Балихіна⁴, канд. техн. наук

¹ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;

<https://orcid.org/0000-0003-1424-6995>, e-mail: kovalchuk.pavlo.ivanovich@gmail.com;

² Національний університет водного господарства і природокористування, Рівне, Україна;

<https://orcid.org/0000-0002-8318-5009>, e-mail: ldem1997@ukr.net;

³ Інститут водних проблем і меліорації НААН, Київ, Україна;

<https://orcid.org/0000-0001-7570-1264>, e-mail: volokovalchuk@gmail.com;

⁴ Національна академія аграрних наук України, Київ, Україна;

<https://orcid.org/0000-0002-5571-3556>, e-mail: maslova-anna@ukr.net

Анотація. Теорія комбінованих систем екстремального управління, яка використовується в технічних системах, розвинута і адаптована для управління в соціо-еколого-економічних системах. Зокрема, такими системами є басейни річок. Комбінована система екстремального управління формалізована для управління процесом розбавлення мінералізованих шахтних вод на ділянці річки. Запропонована математична модель поширення водних мас і забруднень у руслі річки від точкових і дифузних джерел на основі системи різницевої балансових рівнянь при дії стохастичних неконтрольованих перешкод. Стосовно таких умов, як адекватний інструментарій, розроблено систему 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. Структурно-функціональна схема представлена схемою розімкнутої частини, ідентифікація якої здійснюється на основі моделювання процесу розбавлення вод у різних ситуаціях на конкретному об'єкті. Замкнута частина з коректором – розрізняючою системою здійснює обернений зв'язок. Формалізовані математичні моделі динаміки водних мас і забруднень від точкових і дифузних джерел мають загальний характер і можуть використовуватись у басейнах інших річок. Система екстремального управління адаптується до гідрологічних умов та параметрів якості води конкретної річки.

Формалізована математична модель для комбінованого екстремального управління розбавленням шахтних вод на ділянці р. Інгулець. Вода для розбавлення надходить зі ставка-накопичувача в балці Свистунова. Визначаються регулюючі впливи, що підтримують якість води без перевищення нормативних значень гранично допустимих скидів. При цьому мінімізуються витрати води на розбавлення. Сценарний аналіз варіантів показав економію до 30% водних ресурсів, а саме 17,5 млн. м³, порівняно з проведеним у лютому-березні 2021 р. розбавленням за існуючим індивідуальним Регламентом.

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

Постановка проблеми. Відповідно до Директиви ЄС [1] управління водними ресурсами повинно здійснюватись 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 у складних технічних системах [3, 4].

Розглядаючи відомі принципи регулювання по збуренню та по відхиленнях [5], автор вказує на застосування комбінованого принципу управління [3, 4], коли одночасно використовують ці принципи для розв'язування задачі компенсації зовнішніх впливів на об'єкт регулювання. Методичні основи теорії автоматичного регулювання знайшли свій розвиток у біологічних контурах регулювання, в дослідженні обернених зв'язків у фізіології [5]. Комбінований принцип управління [3, 4] пропонується застосовувати і в системі управління річковим басейном,

забезпечуючи прийняття рішень за економічно ефективними та екологічно збалансованими критеріями. Це вимагає формалізації і сумісного співставлення елементів таких систем в моделях річкового басейну, розвитку інструментарію управління на основі моделювання специфічних процесів в умовах невизначеності і водних ризиків.

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю застосування в системі річкового басейну ефективного принципу комбінованих систем екстремального управління 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 [6]. Це відомі моделі динаміки міста [7], моделі світу [8], імітаційні моделі басейну річок [9]. З розвитком методології інтегрованого управління водними ресурсами за басейновим принципом [10–14] виникла необхідність системного управління [15]. Система управління басейном річки [15] використовує імпульсний метод у комбінованій системі. Для оптимізації водообміну в Краснопавлівському водосховищі пропонується сценарний аналіз варіантів на основі імітаційно-оптимізаційного моделювання [16].

Проте досягнення доброго екологічного стану річок пов'язане з ефективним водовідведенням. Процес водовідведення включає три послідовні ланки: акумулювання вод у ставках-накопичувачах [17]; розбавлення високомінералізованих вод до рівня нормативно-допустимих скидів [18]; промивку та екологічне оздоровлення річки для використання вод у галузях економіки [19–23].

Водночас, як на рівні системного управління [24], так і при моделюванні процесу водовідведення, відсутні роботи з управління розбавленням вод, оптимізації процесу розбавлення за екологічними та економічними критеріями.

Мета досліджень полягає в розвитку теорії комбінованих систем екстремального управління для ідентифікації моделей управління розбавленням мінералізованих вод в басейні річки, що забезпечують мінімізацію витрат води та підтримання її якості в межах, що не перевищують гранично допустимих скидів.

1. Принципи, методи і моделі.

1.1. Основні принципи теорії комбінованих систем для управління розбавленням мінералізованих вод у річках. Теорія комбінованих систем екстремального управління була розроблена в роботах [3,4] для управ-

ління технічними системами. Були розвинуті марківські моделі для управління технологічними процесами збагачення залізних руд [25] в умовах перешкоди, що описується дискретним ланцюгом Маркова [26]. В сучасних умовах, залежно від об'єкта управління, використовуються або розвиваються певні принципи теорії побудови комбінованих систем. Аналіз показав, що для управління розбавленням вод на ділянці річки найбільш адекватною системою є комбінована система екстремального управління, що використовує прийняття рішень на основі аналізу входів і виходів одночасно з побудовою екстремальної характеристики критерію якості управління. Критерій якості перебуває під впливом неконтрольованої стохастичної перешкоди ξ_k , тому завданням управління є відслідковування оптимуму екстремальної характеристики системи. Структурно-функціональна схема такої системи представлена двома складовими: структурною схемою розімкнутої частини і структурною схемою замкнутої частини. Проводиться ідентифікація розімкнутої частини $\mu(\lambda, \xi_k)$ для різних перешкод $\xi_k, k=1, \dots, l$. Задача екстремального управління виникає в тому випадку, коли об'єкт управління має екстремальну характеристику $\Phi(\lambda, \mu, \xi_k)$.

Сам об'єкт перебуває під впливом збурюючих впливів λ , деяких перешкод ξ_k і регулюючих впливів μ . На виході обчислюється або вимірюється показник якості $\Phi(\lambda, \mu, \xi_k)$ максимум якого повинна підтримувати система в умовах зміни λ на основі регулюючих впливів μ .

Перешкода може суттєво змінювати екстремальну характеристику, тому замкнута частина забезпечує зворотній зв'язок залежно від вхідної величини λ та вихідної Φ на основі попереднього розпізнавання стану об'єкта (перешкода ξ_k) і розрахунків розімкнутої частини $\mu = q(1, \xi_k), k=1, \dots, l$.

На відміну від технічних систем розвиток теорії комбінованих систем екстремального управління в природно-технічних системах вимагає розробки нових принципів системного моделювання для управління такими системами при взаємодії компонентів природної і технічної підсистем. Це пов'язано з топологією природно-технічних систем та специфікою протікання в них процесів масообміну.

Зберігаючи загальну схему застосування теорії комбінованих систем екстремального управління, для вирішення задач управління технологічним процесом розбавлення міне-

ралізованих вод в руслах річок розвиваються такі принципові підходи:

– різницевий підхід до формалізації природно-технічних процесів динаміки поширення водних мас та гідрохімічних компонент у водному потоці, що забезпечує застосування інструментарію управління;

– ідентифікація розімкнутої частини комбінованої системи екстремального управління на основі імітаційного моделювання екстремального управління;

– формалізація замкнутої частини системи для забезпечення специфічних умов оберненого зв'язку на основі коректора з розпізнаючою системою та прийняття рішень стосовно регулюючого впливу для підтримання якості води на основі моделювання динамічних процесів.

Застосування комбінованої системи екстремального управління розбавленням мінералізованих вод надає можливість оптимізації за двома критеріями якості: суттєво економити водні ресурси (економічний критерій) при підтриманні показників якості води в допустимих межах (екологічний критерій).

1.2. Математичні моделі розбавлення вод в умовах точкового та дифузних джерел забруднення. В наукових розробках для моделювання і управління розбавленням вод покладені моделі фізичних процесів поширення водних мас та динаміки забруднень у водному потоці в умовах наявності на ділянці річки точкового та дифузних джерел забруднення [15]. Поширення водних мас можна представити диференціальним рівнянням переносу (в одновірному випадку):

$$\frac{\partial W(t,x)}{\partial t} = r(W) \frac{\partial (W(t,x) + q(t,x))}{\partial x} + f(t,x), \quad (1)$$

де $\frac{\partial W(t,x)}{\partial t}$ – зміна величини водних мас $W(t,x)$ в деякій точці x , що пов'язана з переносом водних ресурсів $W(t,x)$ по осі X та надходженням водних ресурсів $q(t,x)$ із дифузних джерел, що розміщені вздовж річки по координаті X ; $r(W)$ – коефіцієнт, що виражає швидкість поширення водних мас залежно від їх величини; $f(t,x)$ – величина потоку водних мас точкового джерела за одиницю часу, що характеризує надходження на розбавлення забруднюючих речовин у річку.

Для моделювання неперервних фізичних процесів переносу забруднюючих речовин аналогічно можна використати диференціальне рівняння переносу, припустивши, що самоочищення відсутнє (для іонів хлору, мінеральних речовин), та знехтувати для

практичних розрахунків коефіцієнтом дифузії речовин.

Проте диференціальні рівняння неперервних процесів не є адекватним інструментарієм, що забезпечує управління розбавленням мінералізованих вод. Тому пропонується дискретний балансовий підхід, за яким формалізується модель у вигляді системи дискретних балансових рівнянь динаміки водних мас і забруднюючих речовин у річках.

Баланс водних мас у послідовності комірок на ділянці річки, в умовах точкового та дифузних джерел, визначається системою різницевих рівнянь збереження мас та нерозривності потоку:

$$W_i^{n+1} = r(W_i^n + q_i^n) + (1-r)(W_{i-1}^n + q_{i-1}^n) + F_i^n, \quad (2)$$

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 із 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:

$$F_i^n = \begin{cases} \int_{t^{n-1}}^{t^n} f_{i^*}(t) dt, & \text{при } i = i^*; \\ 0, & \text{при } i \neq i^*, \quad i = 1, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

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 річкової воді і в точковому джерелі забруднень. Балансові рівняння динаміки перенесення забруднень, після їх перемішування, мають вигляд:

$$U_i^{n+1} = \frac{r(W_i U_i^n + q_i C_i^n) + (1-r)(W_{i-1}^n U_{i-1}^n + q_{i-1}^n C_{i-1}^n) + F_i^n S_i^n}{W_i^{n+1}} \quad (4)$$

$i=1, \dots, n$,

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

Для розрахунків за моделями (2) і (4) 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

$$W_1^{n+1} = rW_1^n + \int_{t_n}^{t_{n+1}} (p_0(t) + \eta(t)) dt \quad (5)$$

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

Визначеними є витрати $f_k(t)$ 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, з урахуванням в ній конкретних дифузних та точкових джерел забруднення води.

1.3. Модель комбінованої системи екстремального управління розбавленням вод в умовах невизначеності. Розглядається технологічний процес розбавлення мінералізованих вод на ділянці річки від точкового джерела забруднень (труба, притоки та ін.) Вода надходить із 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. Вони впливають на концентрацію забруднень водних ресурсів на лівій ділянці річки

$$U_0(t_n) = U_0^n + \xi_k(t_n) \quad (6)$$

Стосовно перешкоди $\xi_k(t_n)$ відомо, що вона описується деяким стохастичним процесом у дискретні моменти часу t_n , а її зміна залежить тільки від моменту t_n і не залежить від попередніх моментів часу. Прийmemo, що процес описується дискретним однорідним ланцюгом Маркова зі скінченним числом станів ξ_k , $k=1, \dots, l$ і матрицею переходів [25]

$$Q = \begin{vmatrix} Q_{11} & Q_{12} & \dots & Q_{1l} \\ Q_{l1} & Q_{l2} & \dots & Q_{ll} \end{vmatrix} \quad (7)$$

При наявності спостережень компоненти матриці Q знаходяться на основі статис-

тичного визначення ймовірностей, а при їх відсутності припускається рівномірний характер появи їх, а перехід з одного стану в інший здійснюється вкрай повільно. Це дозволяє розпізнавати стани і будувати систему управління.

Отже, аналіз системи управління розбавленням вод показав необхідність застосувати комбіновані системи екстремального управління в умовах невизначеності.

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

$$f_k(t) = g(p(t), \xi_k(t), k=1, \dots, l) \quad (8)$$

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

$$U_N^n = \Phi(p_i(t), f_k(t), \xi_k(t)) \quad (9)$$

задається у вигляді двосторонніх нерівностей

$$U_{\text{доп}} \leq U_N^n \leq U_{\text{ГДС}} \quad (10)$$

тобто в процесі управління її значення попадає в заданий допустимий інтервал

$$U_N^n \in [U_{\text{доп}} ; U_{\text{ГДС}}], \quad (11)$$

де $U_{\text{ГДС}}$ – концентрація гранично допустимих скидів; $U_{\text{доп}}$ – допустиме значення концентрації скидів у створі повного перемішування N . Тут функція Φ виражається як результат імітаційного моделювання на основі запропонованих моделей (2–5) динаміки поширення

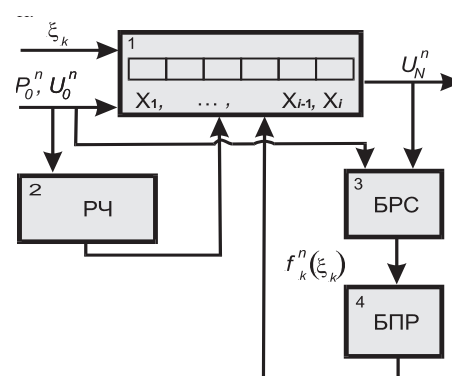


Рис. 1. Структурно-функціональна схема комбінованої системи екстремального управління розбавленням вод на ділянці річки: 1 – об’єкт управління; 2 – розімкнута частина; 3 – блок розпізнавання ситуацій; 4 – блок прийняття рішень

забруднень; U_N^n – концентрація в контрольному створі нижче створу повного перемішування на правій ділянці річки.

Якщо для $U_N^n < U_{\text{доп}}$ 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 слід провести корекцію управляючого впливу (витрат з труби): у першому випадку управляючий вплив f_k збільшують, у другому – f_k необхідно зменшувати для досягнення умов (10).

На основі імітаційного моделювання для кожної ситуації ξ_k визначається характеристика розімкнутої частини – залежність (8).

Управлінські рішення приймаються на основі замкнутої системи екстремального управління (рис. 1) з коректором – розпізнаючою системою. Вона включає блок розпізнавання ситуації, в якому визначається стан об'єкта (діюча перешкода $\xi_k(t)$) (блок 3). Розпізнавання ситуації здійснюється за вхідними та вихідними даними одночасно (в цьому суть комбінованого управління). При фіксованих у певний момент t_n вхідних значеннях ($P_i^n f_i^n$) розпізнавання відбувається на основі визначення міри близькості поточного зображення U_N^m за мірою близькості його до одного з прототипів, $k=1, \dots, l$, тобто:

$$\xi_k = \arg \min |U_N^m - U_N^m(\xi_k)|, \xi_k \in [\xi_1, \dots, \xi_l] \quad (12)$$

В результаті розпізнавання ситуації (перешкоди ξ_k) визначається екстремальна характеристика і прийняття рішень (блок 4) здійснюється згідно з розрахунками розімкнутої частини комбінованої системи екстремального управління. До того ж для відомого збурюючого впливу p_i^n підбирається регулюючий вплив f_i^n за залежністю (8).

2. Моделювання екстремального управління і аналіз результатів. Необхідність

застосування екстремального управління покажемо на прикладі розбавлення мінералізованих вод р. Інгулець після акумуляції шахтних вод у ставку-накопичувачу, розміщеному в балці Свистунова. Скид шахтних вод із балки Свистунова в р. Інгулець у 2021 р. проводили на основі Розпорядження Кабінету Міністрів [18], а розбавлення – у відповідності з Індивідуальним регламентом [27]. Місцем скиду води в річку Інгулець є труба великого діаметра. Такий скид вод у р. Інгулець моделюється як точкове джерело забруднень (рис. 2).

Відомо [27], що об'єми акумуляції шахтних вод у ставку-накопичувачу виходили не тільки за рекомендовані межі, але і за проектний рівень заповнення, про що свідчить динаміка обсягів акумуляції (рис. 3) в останні роки. Оскільки балка Свистунова є відгалудженням балки Широка, то у випадку аварії, якщо вода прорве дамбу ставка-накопичувача – руйнівна хвиля потрапить до балки Широкої. Діставшись селища Широке, завдаючи величезних збитків, вода піде вниз долиною річки Інгулець. Для запобігання аварійним ситуаціям, в міжвегетаційний період 2020–2021 років (з 1 листопада по 15 березня) було дозволено [18] скидання надлишкових зворотних вод гірничорудних підприємств Кривбасу. Планувався дозований (регульований) скид і розбавлення в обсягі 12,171 млн. м³ за розробленим регламентом. Фактично з 20 січня по 15 березня 2021 р. скинуто 6,3 млн. м³ і розбавлено з неперевищенням гранично допустимих скидів (ГДС), що становлять 4,5 г/дм³ [28] за показником хлоридів.

Слід зауважити, що забруднення р. Інгулець здійснюється не тільки організованими скидами зі ставків-накопичувачів у період із листопада по лютий-березень. В цей же час і впродовж року спостерігається постійне забруднення р. Інгулець неорганізованими



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



Рис. 3. Фактична динаміка змін обсягів акумуляції шахтних вод у ставку-накопичувачу балки Свистунова за 2018–2019 роки (за даними Укрводпроект [28])

скидами із відвалів (дифузні джерела забруднень) унаслідок фільтрації з підземних та ґрунтових вод. Вони розташовані на прилеглий території Криворізького залізничного басейну (Лівобережний відвал, хвостосховище «Войково», «Об'єднане» та ін.). Їх дія (забруднення переважно хлоридно-сульфатно-натрієво-магнієвого типу, а також важкими металами) зосереджена на ділянці річки від Карачунівського водосховища до п. Андріївка, де проводяться вимірювання згідно з програмою Державного моніторингу вод. В процесі поширення забруднень відбувається осідання в мулі та захоронення важких металів у донних відкладах, тоді як сольове забруднення практично не піддається самоочищенню в річці Інгулець і фіксується в п. Снігурівка, де здійснюється забір води на Інгулецьку зрошувальну систему.

Неорганізовані скиди з дифузних та точкових джерел забруднення, які діють на ділянці річки і не піддаються вимірюванням, в теорії екстремального управління називають неконтрольованими перешкодами. Перешкоди $\xi_k(t_n)$ суттєво змінюють екстремальну характеристику, здійснюючи стохастичну зміну неконтрольованого показника в певних межах $\xi_k(t_n) \in [\xi^{\min}, \xi^{\max}]$. Аналіз даних Державного моніторингу вод в р. Інгулець показав, що за показником хлоридів в умовах відсутності промивки річки, фонові значення змінюються в межах 1000–2000 мг/дм³,

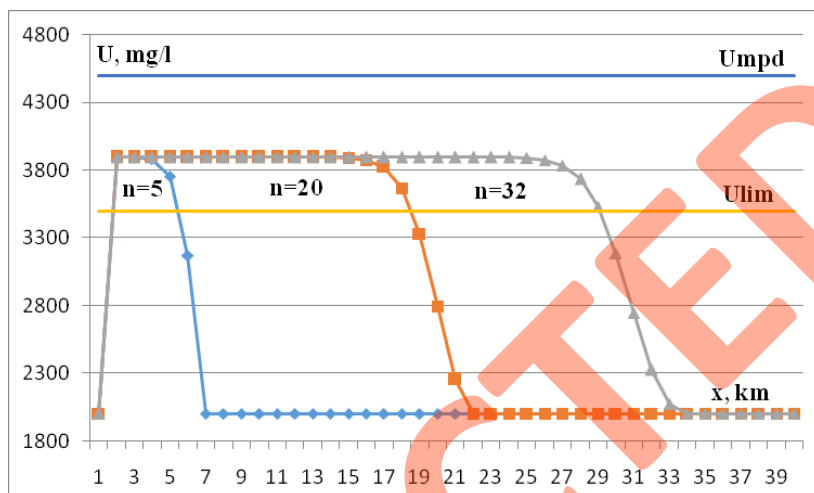
сягають 3000 мг/дм³. Тому для ідентифікації розімкнутої частини доцільно прийняти $\xi_1(t_n) = 0,160$ мг/дм³ (фонові значення води Карачунівського водосховища), $\xi_2(t_n) = 1000$ мг/дм³, $\xi_3(t_n) = 2000$ мг/дм³ – як деякі прототипи при побудові коректора з розпізнаючою системою.

Для моделювання та 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. 4а) при гідрологічних характеристиках р. Інгулець, витратах із 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 $U^{\text{доп}} \leq U_N^n \leq U_{\text{ГДС}}$, отже корекція перешкоди (стану об'єкта) не проводиться. У випадку, якщо перешкода змінює стан об'єкта ($\xi_2(t) = 3000$ мг/л), $U_N^n > U_{\text{ГДС}}$ (рис. 4б), не виконуються екологічні вимоги до умов розбавлення вод. Роль коректора з розпізнаючою системою полягає у визначенні нового стану об'єкта і переході системи екстремального управління на відповідну характеристику розімкнутої частини. Аналогічно, при значенні перешкоди до $\xi_3(t) = 1000$ мг/л та $U_N^n < U_{\text{доп}}$ здійснюються

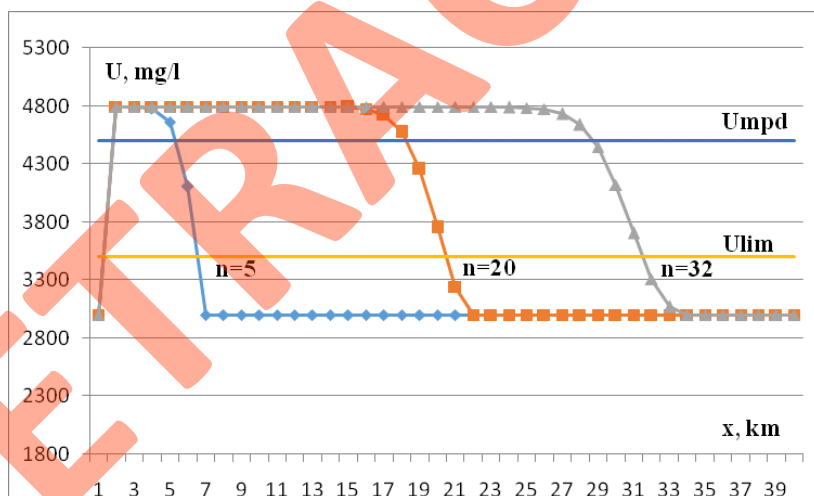
значні перевитрати води на розбавлення (рис. 4в). Коректор із розпізнаючою системою розпізнає ситуацію і встановлює систему управління на іншу характеристику розімкнутої частини, що задається множиною залежностей (8).

Для ідентифікації розімкнутої частини комбінованої системи екстремального управ-

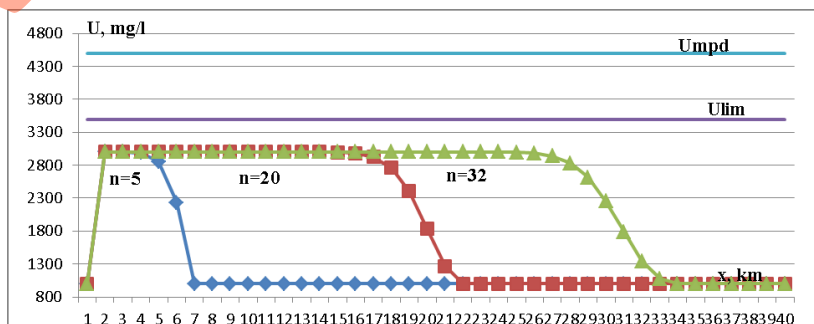
ління розглянуто параметри об'єкта управління. Скид зворотних вод зі ставка-накопичувача в р. Інгулець здійснюється одним поверхневим зосередженим випуском (рис. 2) з концентрацією розчину за хлоридами $S^2(t) = 20\,000\text{ г/дм}^3$. Відкачку води на скид забезпечують дві плавучі насосні станції, які мають технічну можливість регулювати витрати від



а)



б)



в)

Рис. 4. Залежність розрахункової концентрації забруднення на вихідній ділянці річки в різні моменти часу залежно від величини перешкоди

0,6 до 0,9 м³/с. Паралельний режим роботи насосних станцій може забезпечувати регульований скид шахтних вод у діапазоні від 0,6 до 1,7 м³/с. Витрати контролюються водомірним пристроєм. З Карачунівського водосховища витрати достатньо обмежити інтервалом $p(t) \in [2; 10]$, м³/с.

Отже, на основі імітаційного моделювання розраховують, при різних значеннях перешкоди, параметри розімкнутої частини комбінованої системи. Тобто для кожного забруднюючого впливу $p(t)$ визначаються витрати (регулюючий вплив) із труби $f(p(t), \xi_k(t))$, які підтримують екстремальну характеристику в допустимих межах $U_{\text{доп}} \leq U_N^* \leq U_{\text{ГДС}}$.

На підставі багаторічних досліджень по впливу хлоридів, сульфатів, мінералізації на життєдіяльність іхтіофауни встановлено [27], що при скиді зворотних вод вміст хлоридів нижче зони змішування не повинен перевищувати рівня 4,5 г/дм³, а рівні мінералізації води не більше 9,0 г/дм³ [28]. Проте в регла-

менті скиду надлишків зворотних вод у ставку-накопичувачі 2020–2021 року за контрольні розрахунки концентрацій необґрунтовано прийнято за хлоридами – 3,5 г/дм³, за мінералізацією 7,0 г/дм³ [27], що призводить до перевитрат водних ресурсів при розбавленні вод.

Порівняльний аналіз фактично проведеного розбавлення вод у період із 20 січня по 15 березня 2021 р. з моделюванням процесу за розробленим алгоритмом комбінованої системи екстремального управління зафіксував за показником хлоридів в обох випадках задовільну якість вод (рис. 5).

Проте 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. 6). Отже, комбінована система екстремального управління, що оптимізує процес прийняття рішень за принципом двокритеріальної оптимізації [28], має суттєві

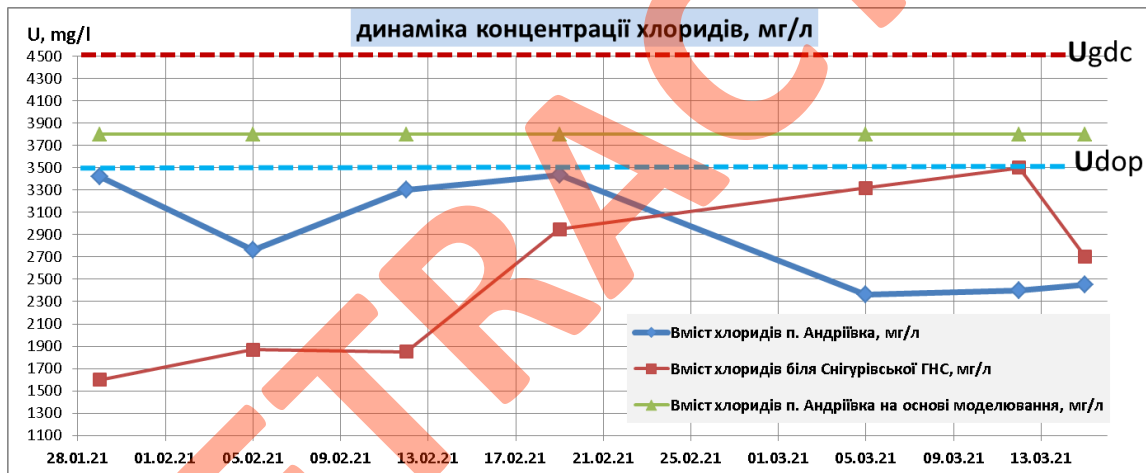


Рис. 5. Фактична та розрахункова (п. Андріївка та Снігурівська ГНС) динаміка концентрації хлоридів

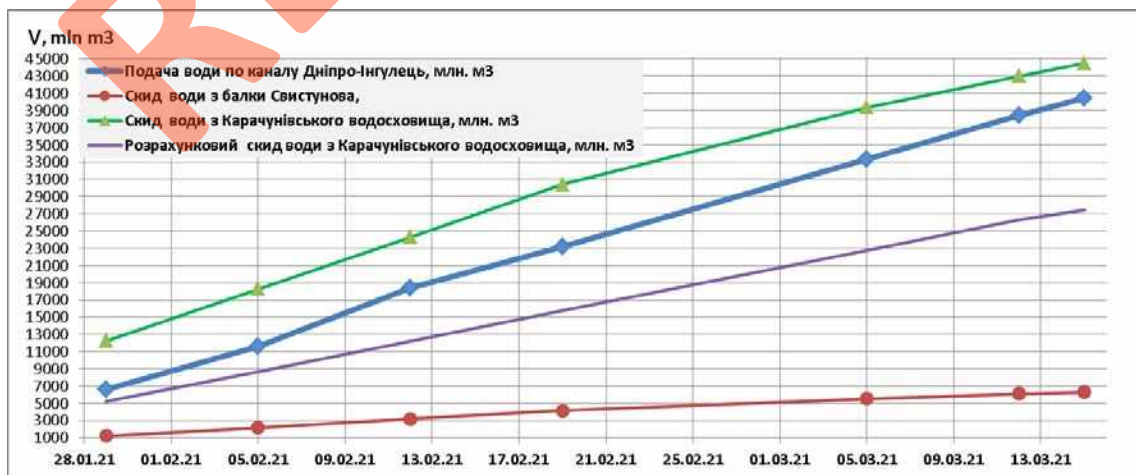


Рис. 6. Динаміка об'ємів витрат води в процесі розбавлення

переваги порівняно з подачею води за існуючим Регламентом [27].

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці Регламенту розбавлення вод на принципах комбінованого управління, який більш ефективний за економічними та екологічними критеріями ніж існуючі регламенти.

Висновки. Комбінована система екстремального управління розбавленням мінералізованих вод дозволяє оптимізувати процес управління за економічними та екологічними критеріями. Це досягається на основі математичного моделювання поширення забруднень і контролю якості води в створі повного перемішування. Підтримання якості води в допустимих межах забезпечує вибір управлін-

ських рішень, що мінімізують витрати води на розбавлення мінералізованих скидних вод. Сценарний аналіз управління розбавленням вод на прикладі р. Інгулець і порівняння з розбавленням за існуючим Регламентом 2021 р. підтверджує можливість економії до 17,5 млн. м³ промивної води при розбавленні 6,3 млн. м³ стоків.

Формалізовані математичні моделі знайшли своє застосування в басейні р. Інгулець. Проте вони 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.

Бібліографія

1. 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.
2. Закон України «Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо впровадження інтегрованих підходів в управлінні водними ресурсами за басейновим принципом» від 4 жовтня 2016 року № 1641-VIII.
3. Ивахненко А.Г. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления. Київ : Техніка, 1969. 392 с.
4. Ивахненко А.Г. Кибернетические системы с комбинированным управлением. Київ : Техніка, 1966. 512 с.
5. Кухтенко А.И. Кибернетика и фундаментальные науки. Киев : Наукова думка, 1987. 142 с.
6. Ковальчук П.І., Ковальчук В. П. Системне управління як розвиток інтегрованого управління водним режимом меліорованих територій. *Вісник НУВГП*. 2015. Вип. 3(71). Сер. Технічні науки.
7. Форрестер Дж. Динамика развития города. Москва : Прогресс, 1974. 287 с.
8. Форрестер Дж. Мирская динамика. Москва : Наука, 1978. 167 с.
9. Экологические системы. Адаптивная оценка и управление / Под ред. К. С. Холинга. Москва : Мир, 1981. 396 с.
10. Dukhovny, V., Sokolov, V., Manthrilake, H.: Integrated Water Resources Management: Putting Good Theory into Real Practice. Central Asian Experience. SIC ICWC, Tashkent (2009).
11. Сташук В., Яцик А. Україна на шляху до басейнового принципу управління водними ресурсами. *Водне господарство України*, 2007. № 4. С. 6–10.
12. Климчик О.М., Пінкіна Т.В., Пінкін А.А. Впровадження системи інтегрованого управління водними ресурсами за басейновим принципом. *Scientific Journal «ScienceRise»*. 2018. № 4(45). С. 36–40.
13. Kovalchuk P., Kovalenko R., Kovalchuk V., Demchuk O., Balykhina H. (2021) 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*. ICCSEE 2020. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1247. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1_4
14. Ковальчук П.І., Коваленко Р.Ю., Балихіна Г.А. Методологічні особливості концепції системного управління водними ресурсами за басейновим принципом. *Меліорація і водне господарство*. Київ : Аграрна наука. 2018. № 1(107). С. 17–23. DOI : <https://doi.org/10.31073/mivg201801-115>
15. 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.
16. Kovalchuk, P., Rozhko, V., Kovalchuk, V., Balykhina, H., & Demchuk, O. (2019, September). Optimization of integrated water exchange management technologies in territorial systems for conditions of sustainable development. In 2019 IEEE 14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) (Vol. 1, pp. 80–83). IEEE.

17. Балансовий метод інтегрованого управління водовідведенням за об'ємами та мінералізацією шахтних вод у басейні р. Інгулець. Ковальчук П. І. та ін. *Меліорація і водне господарство*. Київ : Аграрна наука. 2021. № 1. С. 23–32. DOI : <https://doi.org/10.31073/mivg202101-274>.
18. Розпорядження Кабінету Міністрів України № 1670-р від 28.12.2020 року «Про запобігання виникненню аварійної ситуації на ставку- накопичувачу, розташованому на території Криворізького району Дніпропетровської області»
19. Keller I., Schwartz R. “Instrument of the integrated pollutant/sediment management in the Elbe catchment area”, International Conference RIVER BASINS 2015. Monitoring, Modelling & Management of Pollutants. June 24th and 25th 2015. Germany : Karlsruhe. 2015. pp. 67–74.
20. Бурлака В.О. Промивка р. Інгулець у 2011 році. *Водне господарство України*. 2011. № 5. С. 17–18.
21. Бабій П.О., Лисюк О.Г. Рукотворна повінь на р. Рось. *Водне господарство України*. 2010. № 5. С. 4–6.
22. “Investigation of Options to increase the flood mitigation performance of Wivenhoe Dam”, Final Report. Brisben : GHD. 2011. pp. 146.
23. “Environmental assessment accelerated Mahaweli development program” in US Agency for International Development, New York : TAMS, pp. 389, (1980).
24. Системна модель інтегрованого управління водними ресурсами р. Інгулець за басейновим принципом. Ковальчук П. І. та ін. *Меліорація і водне господарство*, 2020. (1), 37–48. <https://doi.org/10.31073/mivg202001-219>
25. Ковальчук П.І., Несходовський В.І. Коректор комбінованої системи екстремального керування як марківський автомат. *Автоматика*. 1970. № 1. С. 78–88.
26. Ковальчук П.І., Несходовський В.І. Процес корекції у комбінованій системі екстремального керування як гра автомата з природою. *Автоматика*. 1970. № 5. С. 9–20.
27. 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.
28. 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.
29. Подиновский В.В., Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. Москва : Наука, 1982. 253 с.

References

1. 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. (2000). Official Journal of the European Communities, ENL327/1.
2. Закон України «Про внесення змін до деяких закондавчих актів України шходо впровадження інтегрованих підходів в управлінні водними ресурсами за басейновим принципом» від 4 жовтня 2016 року № 1641-VIII. [The Law of Ukraine «On Amendments to Certain Legislative Acts of Ukraine on Implementation of Integrated approaches to the of Water Resources Management based on basin principle» of October 4, 2016, No. 1641-VIII]. [in Ukrainian]
3. Ivakhnenko, A. (1969). Samoobuchaiushchiesya sistemy raspoznavaniya i avtomaticheskoho upravlenaya. Kyiv : Tekhnika. [in Russian]
4. Ivakhnenko, A. (1966). Kiberneticheskiye sistemy s kombinirovannym upravleniyem. Kyiv : Tekhnika.,. 512. [in Russian]
5. Kuhtenko, A. (1987). Kibernetika i fundamentalnye nauki. Kyiv : Naukova dumka,142. [in Russian]
6. Kovalchuk, P.I., & Kovalchuk V.P. (2015). Systemne upravlinnia yak rozvytok integrovanooho upravlinnia vodnym rezhytom meliorovanyh terytorii [System management as the integrated management development of the water regime of the reclaimed area]. *Visnyk NUVGP*, 3(71), 19–23. [in Ukrainian]
7. Forrester, J. (1974). *Dinamika razvitiya horoda*. Moscow: Progress. [in Russian]
8. Forrester, J. (1974). *Mirovaya dinamika*. Moscow, Nauka. [in Russian]
9. Holing, K. (1981). *Ekologicheskiye sistemy*. Moscow, Mir. [in Russian]
10. Dukhovny, V., Sokolov, V., & Manthritilake, H. (2009). *Integrated Water Resources Management: Putting Good Theory into Real Practice*. Central Asian Experience. Tashkent : SIC ICWC.

11. Stashuk, V.A., & Yatsyk, A.V. (2007). Ukraina na shlyahu do baseynovoho pryntsyphu upravlinnia vodnymy resursamy [Ukraine is on the way toward the basin principle of water resources management]. *Vodne hospodarstvo Ukrainy*, 4, 6–10. [in Ukrainian]
12. Klymchuk, O.M., Pinkina, T.V., & Pinkin, A.A. (2018). Vprovadzhennia systemy integrovanooho upravlinnia vodnymy resursamy za baseynovym pryntsepom [Adaptation of the integrated water resources management system based on the basin principle]. *Scientific Journal Science Rise*, 4(45), 36–40. [in Ukrainian]
13. Kovalchuk P., Kovalenko R., Kovalchuk V., Demchuk O., & Balykhina H. (2021) 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. ICCSEE 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 1247. Springer, Cham. Retrieved from: https://doi.org/10.1007/978-3-030-55506-1_4/
14. Kovalchuk, P., Kovalenko, R., & Balykhina, H. (2018). Methodological features of the concept of water use system management using basin principle. *Land Reclamation and Water Management*, 107(1), 17–23. Retrieved from: <https://doi.org/10.31073/mivg201801-115>. [in Ukrainian]
15. Kovalchuk, P.I., Matiash, T.V., Kovalchuk, V.P., Demchuk, O.S., Balykhina, H.A., Gerus, A.V., & Pendak, N.V. (2019). Systemne modeliuвання i upravlinnia vodo- i zemlekorystuvanniam: Monohrafiia. Kyiv: Ahrarna nauka. [in Ukrainian]
16. Kovalchuk, P., Rozhko, V., Kovalchuk, V., Balykhina, H., & Demchuk, O. (2019, September). Optimization of integrated water exchange management technologies in territorial systems for conditions of sustainable development. *14th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies*, Vol. 1, 80–83.
17. Kovalchuk P., Stetsenko V., Balykhina H., Kovalchuk V. & Demchuk O. (2021). Balance method of integrated control of mine water removal by the volumes and mineralization rate within the Ingulets river basin. *Land Reclamation and Water Management*, 1, 23–32. Retrieved from: <https://doi.org/10.31073/mivg202101-274>. [in Ukrainian]
18. Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy «Pro zapobihannia vynyknenniu avariinoi situatsii na stavku-nakopychuvachu, rozdashovanomu na terytorii Kryvorizkoho raionu Dnipropetrovskoi oblasti» vid 28.12.2020 roky № 1670-r. [Ordinance of the Cabinet of Ministers of Ukraine «About accident prevention within storage pond is on Kryvyi Rih district of the Dnipropetrovsk region» of December 28, 2020, № 1670-r]. [in Ukrainian]
19. Keller I., & Schwartz R. (2015) Instrument of the integrated pollutant/sediment menegment in the Elbe catchment area. *International Conference RIVER BASINS 2015: Monitoring, Modelling & Management of Pollutants*. Germany, Karlsruhe, 67–74.
20. Burlaka, B. (2011). The flushing Inhulets river in 2011. *Water Management of Ukraine*, 5, 17–18. [in Ukrainian]
21. Babiy, P.O., & Lisyuk, O.G. (2010). Man-made flood on the river Ros. *Water management of Ukraine*, 5, 4–6. [in Ukrainian]
22. Final Report. (2011). Investigation of Opions to increase the flood mitigation performance of Wivenhoe Dam. Brisben: GHD.
23. Environmental assessment accelerated Mahaweli development program. (1980). US Agency for International Development. New York : TAMS.
24. Kovalchuk, V., Kovalchuk, P., Yatsyuk, M., Kovalenko, R., Demchuk, O., & Balykhina, H. (2020). System model of integrated management of the water resources of the Ingulets River by a basin principal. *Land Reclamation and Water Management*, (1), 37–48. Retrieved from: <https://doi.org/10.31073/mivg202001-219>
25. Kovalchuk, P., & Neskhodovskiy, V. (1970). Korektor kombinovanoyi systemy ekstremalnoho keruvannya yak markivskiy avtomat. *Avtomatyka*, 1, 78–88. [in Ukrainian].
26. Kovalchuk, P., & Neskhodovskiy, V. (1970). Protses korektsiyi u kombinovaniy systemi ekstremalnoho keruvannya yak hra avtomata z pryrodoyu. *Avtomatyka*, 5, 9–20. [in Ukrainian]
27. Indyvidualnyi rehlament skydannya nadlyshkiv zvorotnykh vod hirnychorudnykh pidpriyemstv Kryvbasu zi Stavka-nakopychuvacha Svystunova u Inhulets u mizhvehetatsiyniy period 2020–2021. (2020). Kyiv : Ukrvodproyekt.
28. Sherstiuk, N., & Khilchevskiy, V. (2012). Osoblyvosti hidrokhimichnykh protsesiv u tekhnohennykh ta pryrodnykh vodnykh obyektakh Kryvbasu. *Dnipropetrovsk : Aktsent*. [in Ukrainian]
29. Podinovskiy, V., & Noghin, V. (1982). Pareto optimal solution for multicriterion problems. Moscow : Nauka. [in Russian]

П.И. Ковальчук, Е.С. Демчук, В.П. Ковальчук, А.А. Балыхина
Комбинированная система экстремального управления разбавлением
минерализованных вод в бассейнах рек

Аннотация. Теория комбинированных систем экстремального управления, которая используется в технических системах, была развернута и адаптирована для управления в социо-эколого-экономических системах. К примеру, такими системами являются бассейны рек. Комбинированная система экстремального управления была формализована для управления процессом разбавления минерализованных шахтных вод на участке реки. Предложена математическая модель распространения водных масс и загрязнений в русле реки от точечных и диффузных источников на основе системы разностных балансовых уравнений при воздействии стохастических неконтролируемых помех. Относительно таких условий, как адекватный инструментарий, разработана система комбинированного управления, которая использует принятие решений по эколого-экономическим критериям на основе анализа входных и выходных данных одновременно, идентификации и отслеживания оптимума в условиях смещения под воздействием помех экстремальной характеристики системы. Структурно-функциональная схема представлена схемой разомкнутой части, идентификация которой осуществляется на основе моделирования процесса разбавления вод в различных ситуациях на конкретном объекте. Замкнутая часть с корректором - распознающей системой осуществляет обратную связь. Формализованные математические модели динамики водных масс и загрязнений от точечных и диффузных источников имеют общий характер и могут быть использованы для бассейнов других рек. Система экстремального управления адаптируется до гидрологических условий и параметров качества воды конкретной реки.

Формализована математическая модель для комбинированного экстремального управления разбавлением шахтных вод на участке р. Ингулец. Вода для разбавления поступает из пруда-накопителя в балке Свистунова. Определяются регулирующие воздействия, которые поддерживают качество воды без превышения нормативных значений предельно допустимых сбросов. При этом минимизируются расходы воды на разбавление. Сценарный анализ вариантов показал экономию до 30% водных ресурсов, а именно 17,5 млн. м³, по сравнению с проведенным в феврале-марте 2021 разбавлением по существующему индивидуальному регламенту.

Ключевые слова: разбавление минерализованных вод, диффузные и точечные источники, комбинированный принцип, экстремальное управление, разностные балансовые уравнения, предельно допустимые сбросы.

P.I. Kovalchuk, O.S. Demchuk, V.P. Kovalchuk, H.A. Balykhina
Combined system of extreme control of mineralized water dilution in river basins

Abstract. The theory of combined systems of extreme control, which is used in technical systems, was developed and adapted in socio-ecological-economic systems. For example, river basins are such systems. A combined extreme control system has been formalized to control the dilution of mineralized mine waters in river sections. A mathematical model of the distribution of water masses and pollution in river beds from point and diffuse sources is proposed on the basis of a system of difference balance equations under the influence of stochastic uncontrolled disturbances. With regard to such conditions as adequate instrumentation, a combined control system has been developed that uses decision-making according to environmental and economic criteria based on the analysis of input and output data simultaneously, identification and tracking of the optimum in conditions of displacement under the influence of the disturbances of extreme characteristics of the system. The structural and functional diagram is represented by the open-loop diagram, the identification of which is carried out on the basis of modeling the process of water dilution in various situations at a specific object. A closed part with a recognition system as a corrector provides feedback. Formalized mathematical models of the dynamics of water masses and pollution from point and diffuse sources are of a general nature and can be used for the basins of other rivers. The extreme control system can adapt to the hydrological conditions and water quality parameters of a particular river.

A mathematical model has been formalized for the combined extreme control of mine water dilution in the section of the Ingulets river. The water for dilution comes from a storage pond in the Svystunov gully. Regulatory actions that maintain water quality without exceeding the normative values of maximum permissible discharge are determined. At the same time, water consumption for dilution is minimized. The scenario analysis of the options showed a saving of up to 30% of water resources, namely 17,5 million m³, compared to the dilution carried out in February-March 2021 according to the existing individual regulations.

Key words: dilution of mineralized water, diffuse and point sources, combined principle, extreme control, differential balance equations, maximum permissible discharge