

УДК 621.501.72

СЦЕНАРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОМИВКИ РІЧКИ ІНГУЛЕЦЬ ПРИ ПОДАЧІ ВОДИ НА ЗРОШЕННЯ

П.И. Ковальчук¹, О.С. Демчук², Р.Ю. Коваленко¹, А.А. Балихіна¹

¹Інститут водних проблем і меліорації НААН України, м. Київ

²Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне

romchik89@ukr.net

Запропоновано метод сценарного моделювання в процесі комбінованого управління промивкою р. Інгулець. Сценарне моделювання рекомендується застосовувати для оцінювання ефективності різних регламентів промивки імпульсним методом.

Ключові слова: сценарне моделювання, комбіноване управління, імпульсний метод, якість води для зрошення, графічний аналіз.

The method of scenario modeling while the complex controlling process of flushing of the Inhulets River is proposed. Scenario modeling is recommended to apply for the assessment of the efficiency of various flushing schedules by using a pulse method.

Keywords: Scenario modeling, complex control, pulse method, the water quality for irrigation, graphical analysis.

Предложен метод сценарного моделирования в процессе комбинированного управления промывкой р. Ингулец. Сценарное моделирование рекомендуется применять для оценки эффективности разных регламентов промывки импульсным методом.

Ключевые слова: сценарное моделирование, комбинированное управление, импульсный метод, качество воды для орошения, графический анализ.

1. Постановка задачі

В басейні р. Інгулець знаходиться значна частина гірничорудних підприємств Кривбасу (рис. 1), які забруднюють річку [1]. У хвостосховищах в басейні р. Інгулець складаються відходи збагачення залізних та уранових руд. Крім того, хвостосховища виконують важливу водорегулюючу функцію, оскільки є найважливішою складовою ланкою системи оборотного водопостачання комбінатів [2]. Так, в період з листопада по лютий дозволено скидання надлишків зворотних вод із ставків-накопичувачів відповідно до Регламенту скидів [1] зворотних, високомінералізованих шахтних вод у річки Інгулець і Саксагань. З метою запобігання виникненню аварійної ситуації на гідротехнічних спорудах Криворізького басейну та забезпеченню подачі води задовільної якості на Інгулецьку зрошувальну систему Державне агентство водних ресурсів розробляє та затверджує регламент промивання русла дніпровською водою та екологічного оздоровлення р. Інгулець.

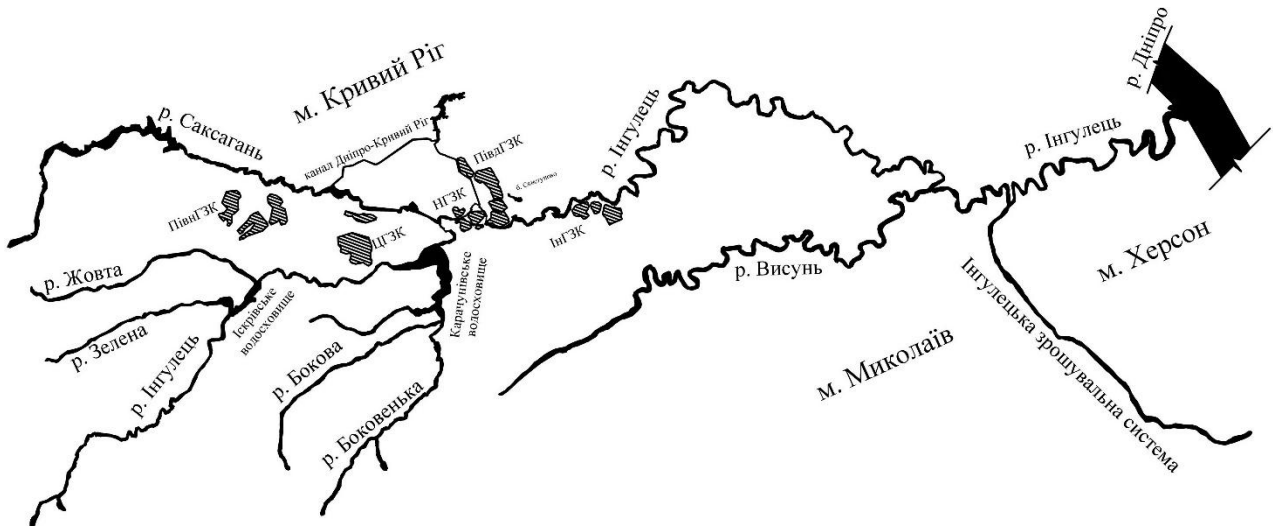


Рис. 1. Схема басейну р. Інгулець з її притоками та розташуванням основних хвостосховищ у Криворізькому рудному районі

Існуючий регламент промивки р. Інгулець полягає в тому, що весною, в залежності від погодних умов року, проводиться промивка великими витратами (15 – 20 м/с) води р. Інгулець, яка триває кілька діб. Поступова витрата води зменшується до 5 м/с і залишається сталою протягом вегетаційного періоду. Чинний регламент щорічно уточнюється, проте спільним залишається певний, заданий апіорі, режим витрат з Карачунівського водосховища. В теорії управління це називається системою управління без оберненого зв'язку (розімкнута система управління). При цьому імпульс промивки, що не враховує якість води при заборі на ГНС Інгулецької зрошувальної системи, допускає перевитрату водних ресурсів, не сприяє їх економії і раціональному використанню. Аналіз існуючого регламенту показав, що він не враховує також процесу поширення забруднень, відсутня система активного управління з оберненим зв'язком, тобто прийняття рішень в залежності від якості води при заборі на зрошення.

Ставиться задача комбінованого управління, яка базується на сценарному моделюванні промивки р. Інгулець з урахуванням вимірювання якості води при заборі на ГНС Інгулецької зрошувальної системи.

2. Імпульсний метод промивки

Як показує характеристика основних забруднювачів р. Інгулець, їх специфічний вплив полягає в тому, що вони забруднюють річку протягом всього року. У вегетаційний період, з березня по жовтень кожного року, часто відбуваються аварійні скиди забруднень та неорганізовані скиди, як з дифузних джерел (фільтрація з ґрунтових вод), так і точкових – хвостосховищ та ставків. В цей час, за рахунок неорганізованих викидів через ґрунтові води, мінералізація води, а також її значення по окремих показниках зростає.

Для обґрунтування імпульсного методу промивки нами відбирались проби води для визначення показників її якості біля головної насосної станції

Інгулецької зрошувальної системи до проведення промивок і під час промивки з різних глибин (1 метр і 3 метри від поверхні) за екологічними та агрономічними критеріями води для зрошення [3, 4].

Встановлено, що оцінка якості води за агрономічними критеріями в результаті промивки спостерігається зменшення вмісту показника аніон-хлору (Cl⁻), промивка сприяє поліпшенню якості води і змінюється від «непридатної» до «обмежено придатної» (рис. 2).

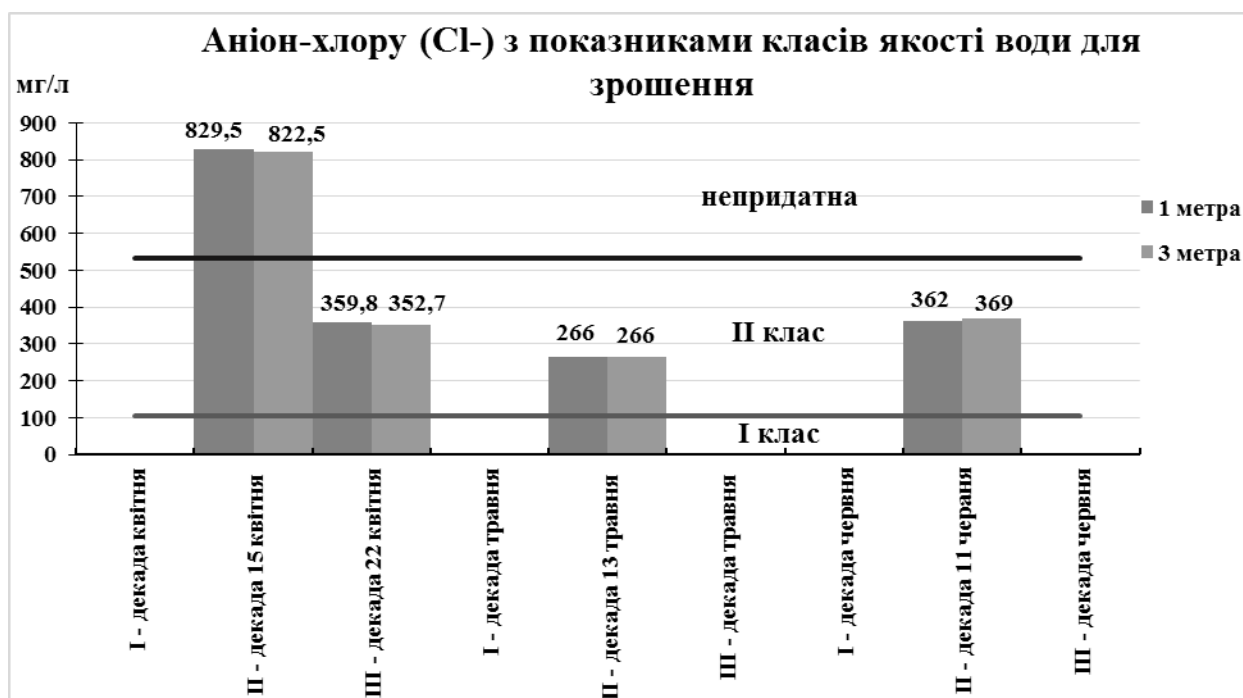


Рис. 2. Динаміка якості води для зрошення в точці водозабору Інгулецької зрошувальної системи за показником аніон-хлору (Cl⁻) в процесі промивки р. Інгулець з Карачунівського водосховища.

В результаті аналізу процесу промивки зафіксовано швидке покращення (за 1 – 2 доби) показників якості води для зрошення, що важливо для оцінки ефективності варіанту управління та побудови моделей промивки забруднених вод. Проте при зниженні інтенсивності промивки з 24 м³/с до 10 м³/с, а в подальшому і до 5 м³/с концентрація дещо підвищилася, хоча залишається в межах другого класу, тобто є обмежено придатною. Підвищення концентрації пояснюється впливом антропогенних джерел забруднення в басейні р. Інгулець, які діють як дифузні неорганізовані джерела – їх впливу не можна запобігти. Отже, в певний момент часу потрібен ще один імпульс промивки, який знизить величину аніону-хлору та інших показників, якості води для зрошення [5] в процесі промивки р. Інгулець з Карачунівського водосховища.

Пропонується, для вдосконалення чинного регламенту промивки, використання комбінованих систем управління. Комбінована система управління має як розімкнуту лінію управління, так і один контур оберненого зв'язку. Розімкнута лінія управління визначається плануванням заданої

послідовності в часі імпульсів з їх витратами з Карачунівського водосховища, тобто планування певного режиму промивки. Пропозиція авторів полягає (враховуючи поширення лінзи мінералізованих вод) в скороченні витрат порядку 15 – 20 м³/с до 7 діб і менше. Контур оберненого зв'язку забезпечує вибір або корекцію витрат з Карачунівського водосховища на основі одержаних в результаті вимірювань значень якості води, в порівнянні з допустимими нормативами. Система управління передбачає послідовність імпульсів промивки в залежності від якості води в пункті с. Андріївка та при заборі ГНС Інгулецької зрошувальної системи (рис. 3).

Комбіноване управління здійснюється за схемою, де на вході запланована послідовність імпульсів та витрат по кожному з цих імпульсів. Стан об'єкта оцінюється за вимірними концентраціями в пункті с. Андріївка (рис. 3) та в пункті ГНС Інгулецької зрошувальної системи. Прийняття рішень про черговий імпульс приймається за функцією, що оцінює управляючі впливи на основі вхідних і вихідних значень одночасно, тобто:

$$Q_1(x, t_{n+1}) = F(V_i(t_n), S_i(t_n), V_j(t_n), S_j(t_n), Q_1(x, t_n)), \quad (1)$$

де $Q_1(x, t_{n+1})$ – витрати (імпульс) в наступний n+1 момент часу; V_j, S_j – концентрації хлору в верхньому і нижньому шарах в пункті с. Андріївка; V_i, S_i – концентрації в верхньому і нижньому шарах в пункті ГНС Інгулецької зрошувальної системи; $Q_1(x, t_n)$ – витрати в попередній момент часу з Карачунівського водосховища; F – функція, що визначає алгоритм прийняття рішень за вдосконаленим регламентом.

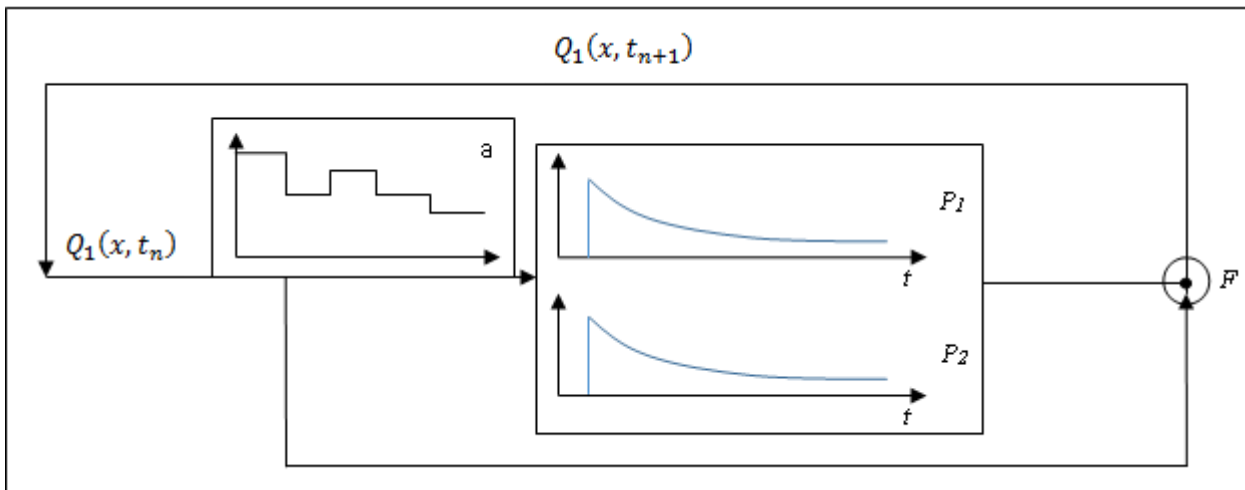


Рис. 3. Схематичне зображення принципу комбінованого управління промивкою русла р. Інгулець по вдосконаленому регламенту: а – планова послідовність імпульсів; P_1 – значення концентрацій в пункті с. Андріївка; P_2 – значення концентрацій в пункті забору води ГНС Інгулецької зрошувальної системи

Пропонується встановити біля забору на зрошення на Інгулецьку зрошувальну систему моніторинговий контроль за якістю води і, в міру потреби, подавати імпульс промивки дніпровською водою з Карачунівського водосховища.

3. Балансові різницеві рівняння руху води в потоці та поширення забруднень вздовж русла ріки

Диференціальні рівняння неусталеного, повільно змінюваного руху потоку у відкритих призматичних руслах задаються системою рівнянь Сен-Венана [6]. Проте для більшої адекватності моделі процесу пропонуються різницеві рівняння. Для моделювання руху потоку в р. Інгулець модель повинна враховувати, що рух у верхньому шарі, а особливо при промивці річки, відбуваються з більшою швидкістю, порівняно з рухом потоку в придонному шарі. Це має важливе значення при моделюванні переносу забруднюючих речовин. Промивання р. Інгулець відбувається таким чином, що частина забрудненої води витісняється потоком води з Карачунівського водосховища (витіснення лінзи солоних вод). Певна частина забрудненої води з нижнього шару піднімається в верхній шар і переноситься вздовж потоку вже з більшою швидкістю. Чим більша швидкість потоку у верхньому шарі, тим з більшою силою піднімаються забруднені води з нижнього шару, тобто інтенсивніше відбувається промивка нижнього забрудненого шару. В результаті здійснення промивки взаємодіють процеси витіснення забруднених вод та процеси перемішування води верхнього з нижнім шаром.

Для адекватного відображення динаміки розглядуваних процесів неусталеного повільно змінюваного руху водного потоку у відкритих руслах (з урахуванням швидкостей руху різних шарів води та підйомної сили потоку у верхньому шарі) розглянемо двох шарову різницеву модель, яка описує рух води в верхньому шарі потоку (де рух відбувається зі значною швидкістю) та динаміку потоку в придонному шарі (де відбувається рух повільно змінюваного потоку). При цьому в різницевих рівняннях в певній мірі будуть враховані як процеси, що описуються рівняннями Сен-Венана (балансове рівняннями нерозривності і динамічної рівноваги), так і процеси переносу та перемішування забруднюючих речовин.

Балансові рівняння потоку води в верхньому шарі, аналогічно рівнянню Сен-Венана, що визначає нерозривність потоку, задається у вигляді:

$$W_i^{n+1} = r(W_i^n + q_i^n) + (1 - r)(W_{i-1}^n + q_{i-1}^n), \quad 0 \leq r \leq 1; \quad i = 1, \dots, N, \quad (2)$$

де W_i^n, W_{i-1}^n – об'єми води в n -й момент часу в i -й та $i - 1$ -й комірці; q_i^n, q_{i-1}^n – об'єми води в n -й момент часу в i -й та $i - 1$ -й комірці, що надходять з бічного притоку або фільтруються з ґрунтовими водами; W_i^{n+1} – водні ресурси в i -й комірці в $n + 1$ -й момент часу; r – коефіцієнт, що залежить від швидкості

поток (при $r = 0$, водні маси з i -ї комірки переходять за визначений момент часу цілком в $i + 1$ -у комірку, при $r = 1$ – повністю стояча вода); N – кількість комірок (для р. Інгулець взято $N = 336$).

Очевидно, що при $0 < r < 1$ – частина води залишається в i -ї комірці, інша частина надходить з $i - 1$ -ї комірки.

Балансові рівняння потоку води в нижньому шарі запишуться у вигляді:

$$D_i^{n+1} = D_i^n \mu + p_i^n \mu + (1 - \mu)(D_{i-1}^n + p_{i-1}^n), 0 \leq \mu \leq 1, \quad (3)$$

де D_i^n, D_{i-1}^n – водні ресурси, що надходять з i -ї та $i - 1$ -ї комірок нижнього шару; D_i^{n+1} – водні ресурси в i -ї комірці в $n + 1$ -й момент часу; p_i^n, p_{i-1}^n – водні ресурси, які надходять в нижній шар з приток або фільтруються з ґрунту; μ – коефіцієнт швидкості руху води (при $\mu = 1$ – стояча вода; $\mu = 0$ – вода надходить з $i - 1$ -ої комірки).

Неусталений рух води задається за допомогою змінних в часі граничних умови у верхньому шарі. Таким же способом задається інтенсивність імпульсу промивки або послідовності імпульсів.

Балансова модель базується на рівнянні динаміки та збереження мас забруднюючих речовин і побудована таким чином, що спочатку задається процес поширення забруднень, а потім здійснюється перемішування нижнього та верхнього шару з певною інтенсивністю λ , тобто підняття водних мас з нижнього шару в верхній з певною концентрацією забруднень в нижньому шарі та опускання відповідних водних мас з верхнього шару в нижній з концентрацією забруднень, що знаходяться у верхньому шарі. Результуюча модель передбачає, що спочатку розраховуються потоки води, а потім концентрації забруднюючих речовин в результаті змішування.

В такому випадку концентрація в $n + 1$ -й момент часу в i -ї комірці, в результаті змішування в верхньому шарі знаходиться за формулою:

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

де $rW_i^n U_i^n$ – водні ресурси rW_i^n з концентрацією U_i^n в i -ї комірці (в n -й момент часу); $r q_i^n C_{q_i}^n$ – водні ресурси $r q_i^n$, які поступили з притоки, чи з ґрунтових вод з концентрацією $C_{q_i}^n$ в i -ту комірку; $(1-r)W_{i-1}^n U_{i-1}^n$ – водні ресурси $(1-r)W_{i-1}^n$ з концентрацією U_{i-1}^n в i -ї комірці; $(1-r)q_{i-1}^n C_{q_{i-1}}^n$ – водні ресурси $(1-r)q_{i-1}^n$, що надійшли з $i - 1$ -ої комірки в дану комірку з притоки чи з ґрунтових вод з концентрацією $C_{q_{i-1}}^n$. Між верхнім шаром і нижнім шаром іде водообмін ; з нижнього шару надходять у верхній шар водні ресурси λD_i^n з концентрацією S_i^n і опускаються в нижній шар – λD_i^n водні ресурси з

концентрацією U_i^n . Величина λ характеризує інтенсивність водообміну між верхнім та нижнім шаром.

Цілком аналогічно, концентрація в $n + 1$ -й момент часу в i -й комірці нижнього шару знаходиться за формулою:

$$S_i^{n+1} = \frac{\mu D_i^n S_i^n + \mu p_i^n R_i^n + (1-\mu) D_{i-1}^n S_{i-1}^n + (1-\mu) p_{i-1}^n R_{i-1}^n - \lambda D_i^n S_i^n + \lambda D_i^n U_i^n}{D_i^{n+1}}, \quad (5)$$

де $\mu D_i^n S_i^n$ – водні ресурси μD_i^n з концентрацією S_i^n , що залишилися в i -й комірці; $\mu p_i^n R_i^n$ – водні ресурси μp_i^n з концентрацією R_i^n , що надходять з ґрунту з ґрунтовими водами або з притоку річки. (μ – коефіцієнт, при $\mu \rightarrow 0$, швидкість потоку зростає, при $\mu \rightarrow 1$, швидкість потоку зменшується до нуля); $(1 - \mu) D_{i-1}^n S_{i-1}^n$ – водні ресурси, що надійшли з $i - 1$ -й комірки з концентрацією S_{i-1}^n ; $(1 - \mu) p_{i-1}^n R_{i-1}^n$ – водні ресурси $(1 - \mu) p_{i-1}^n$ з концентрацією R_{i-1}^n , що надходять в $i - 1$ -й комірку з притоку або з ґрунтових вод; $-\lambda D_i^n S_i^n$ – водні ресурси $-\lambda D_i^n$ з концентрацією S_i^n , що надходять ввєрх, в верхній шар (знак «мінус» означає убування з нижнього шару); $\lambda D_i^n U_i^n$ – водні ресурси, що надходять з верхнього шару в нижній з концентрацією U_i^n (яка у верхньому шарі). Тобто більш солонa вода піднімається в верхній шар, а менш солонa опускається в нижній шар. В формулі (5) – середньозважена водна суміш (водні ресурси зі зваженою концентрацією складових) ділиться на водні ресурси в $n + 1$ -й момент часу. Тоді частка – концентрації U_i^{n+1} в i -й комірці в $n + 1$ -й момент часу.

4. Сценарне моделювання та аналіз результатів

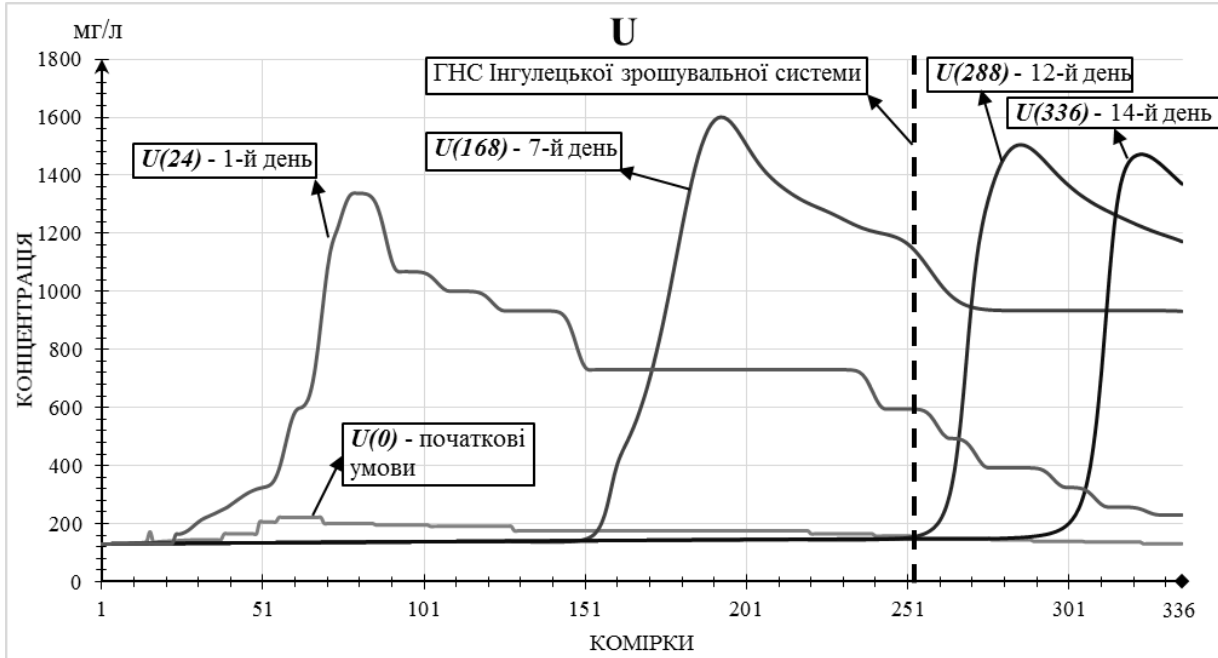
Нижче пропонується один із сценаріїв промивки, що дозволяє слідкувати витіснення лінзи до пункту відбору проб.

За даним сценарієм задаються початкові умови концентрацій в верхньому та нижньому шарі: в верхньому шарі U_i^0 ($i=1, \dots, 336$) – концентрації забруднень 130 мг/л (для Cl), які спостерігаються в Карачунівському водосховищі; в нижньому шарі S_i^0 , $i=1, \dots, 336$ – типові концентрації, які спостерігаються вздовж р. Інгулець перед промивкою. Граничні умови (біля Карачунівського водосховища): $U_0^n = 130$ мг/л, $n = 0, \dots, N$; $S_0^n = 130$ мг/л, $n = 0, \dots, N$.

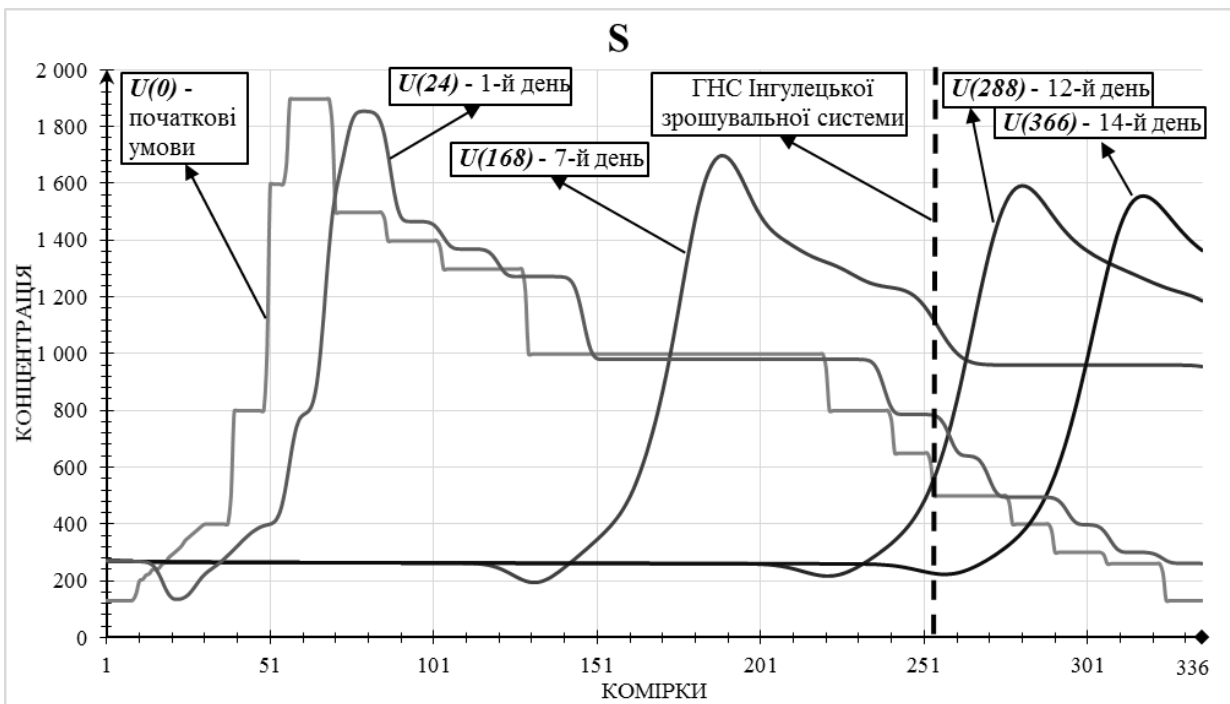
Забір води на промивку проводився з Карачунівського водосховища згідно витрат: в верхньому шарі (гранична умова) витрати становлять 41400 м³/год; в нижньому шарі (початкові умови) в кожній комірці – 12000 м³/год, гранична умова – становить також 12000 м³/год; крок по довжині русла $\Delta x = 1$ км; крок по часу тобто, один такт становить 1-у година.

Як показує практика, процес промивки здійснюється витісненням лінзи високомінералізованих вод з певним їх перемішуванням в верхньому та

нижньому шарі (рис. 4). Промивка здійснюється на протязі 14 днів, коли лінза мінералізованих вод витіснена за пункт відбору, а вода стає в межах допустимих нормативів при водозаборі на зрошення (рис. 4). На протязі промивки задавався тільки один імпульс (рис. 5) з великими витратами (граничні умови).



а)



б)

Рис. 4. Динаміка концентрацій забруднюючих речовин в процесі промивки вздовж русла р. Інгулець в різні моменти часу: а) в верхньому шарі (U); б) в нижньому шарі (S).

Запропонований підхід дозволяє обґрунтування різних сценаріїв промивки ріки, що базується на еколого-економічному підході з використанням парадигми сталого розвитку України [7]. В такому випадку найбільш ефективним є комбінований метод управління, що базується на вимірюваннях якості води (вихідних даних) при заборі на ГНС Інгулецької зрошувальної системи з певною послідовністю імпульсів (вхідних даних).

Так, перший імпульс промивки рекомендується проводити в процесі щоденного оцінювання якості води в пунктах с. Андріївка Дніпропетровської області та Головної насосної станції Інгулецької зрошувальної системи Миколаївської області. Після досягнення значень хлоридів в межах 220-260 мг/л зменшити подачу води з Карачунівського водосховища до 8-10 м³/с. При поступовому зростанні значення показника хлоридів в межах 320 - 350 мг/л, здійснювати другий імпульс промивки попусками в розмірі 15 м³/с – на протязі 7 днів.

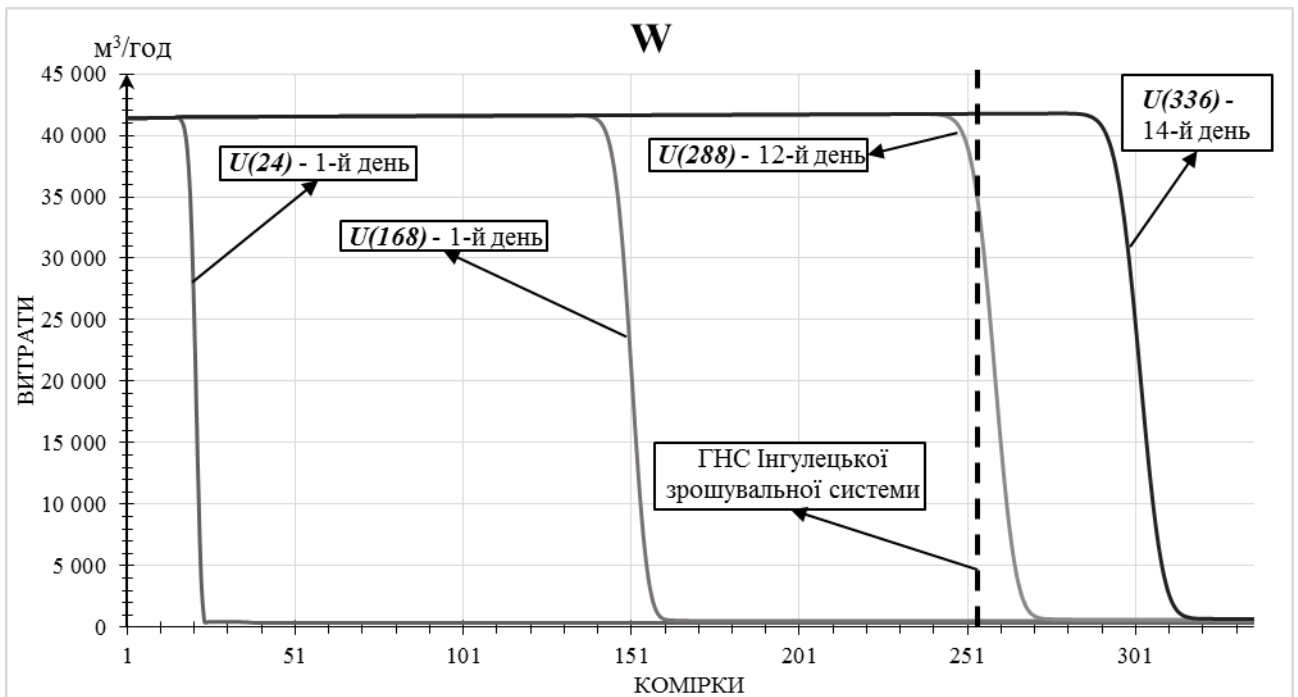


Рис. 5. Динаміка витрат водних ресурсів в процесі промивки вздовж р. Інгулець в різні моменти часу

По мірі проведення імпульсів оцінюється загальний баланс витрат, виходячи з загального обсягу скиду з Карачунівського водосховища. Він становить близько 124,0 млн. м³, з них 122,0 млн. м³ за рахунок подачі води у весняно-літній період по каналу Дніпро-Інгулець і попередньо поданих у зимовий період 2,0 млн.м³ для розбавлення зворотних вод.

Висновки

Запропонований метод сценарного моделювання може бути використаний для оцінювання ефективності регламенту, який використовує

імпульсний метод для комбінованого управління промивкою р. Інгулець. Розрахунковий метод слід доповнювати моніторингом якості води в пунктах відбору проб с. Андріївка Дніпропетровської області та Головної насосної станції Інгулецької зрошувальної системи Миколаївської області з метою здійснення оберненого зв'язку.

Сценарний аналіз доцільно також застосовувати для порівняння сценаріїв на основі імітаційного моделювання, оцінювання їх ефективності за еколого економічними критеріями.

Література

1. Регламент скиду надлишків зворотніх вод гірничо рудних підприємств Кривбасу у 2016-2017 рр., ПАТ "Укрводпроект", ДУ ІГНС, 2016 р., Режим доступу: <http://www.me.gov.ua/Documents/Download?id=01e3ab3f-a002-4152-832d-cb67450cafd5>
2. Федоров И. С. Складирование отходов рудообогачения / И. С. Федоров, М. Н. Захаров. – Москва: Недра, 1989. – 228 с.
3. ДСТУ 7286:2012 Якість природної води для зрошення. Екологічні критерії. – К.: Мінекономрозвитку України, 2013. – 14 с.
4. ДСТУ 2730-94 Якість природної води для зрошення. Агрономічні критерії – К.: Держстандарт України, 1994. – 14 с.
5. Коваленко Р. Ю. Теоретико експериментальне обґрунтування регламенту промивки р. Інгулець на основі імпульсного методу подачі води / Р.Ю. Коваленко / Всеукраїнська науко-практична конференція присвячена, Всесвітньому дню води «Вода і робочі місця», ІВПіМ. м. Київ, 2016. – С. 56-57.
6. Ковальчук П. І. Математичне моделювання поширення забруднення в річках при промивках із водосховищ / П.І. Ковальчук, О.С. Демчук, Р.Ю. Коваленко // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. м. Кам'янець-Подільський. – 2016. – Випуск 13. – С. 91-99
7. Національна парадигма сталого розвитку України / за заг. ред. акад. НАН України, д.т.н., проф. Б.Є. Патона. – 2-ге, переробл. і доповн. – К.: Державна установа «Інститут економіки природокористування та сталого розвитку Національної академії наук України», 2016. – 72с.