

УДК 628.1.033.001.57

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПИТНОЇ ВОДИ

© Роман Бичківський, Оксана Гонсьор, 2005

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра метрології, стандартизації та сертифікації,  
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

*Описана динамічна математична модель для оцінювання якості питної води, яка дає можливість визначити ступінь очищення води, а також встановити відповідність її нормам питного водопостачання.*

*Описана динамическая математическая модель оценки качества питьевой воды, дающая возможность определить степень очистки питьевой воды, а также ее соответствие нормам питьевого водоснабжения.*

*The dynamic mathematical model of an estimation of quality of potable water enabling is described to define a degree of clearing of potable water and also its conformity to the standards of potable water facilities.*

**Вступ.** У результаті соціальної діяльності людини (розвиток промисловості, містобудування, благоустрій населених місць) неухильно ростуть обсяги водоспоживання й утворення стічних вод. За ХХ століття обсяг вживання води збільшився у сім разів. Це спричиняє небезпеку масового забруднення природних водойм і ускладнює використання їх для питних потреб. Підприємства металургійної і хімічної промисловості України щорічно скидають мільйони кубічних метрів стоків, внаслідок чого порушуються процеси самоочищення водойм. Посилений антропогенний вплив на довкілля, що зумовлює порушення водних екосистем.

Стійка тенденція погіршення якості джерел питного водопостачання, що супроводжується зниженням гігієнічних характеристик води, викликає особливу занепокоєність світової громадськості. І не випадково ВООЗ серед комплексу найважливіших питань на перший план ставить вирішення проблеми питного водопостачання як невід'ємної частини реалізації програми охорони здоров'я людини [5].

Як було відзначено на засіданні Ради національної безпеки та оборони України, що розглядала питання безпеки водних ресурсів, сьогодні в Україні не залишилося жодної поверхневої водойми, яка б належала до класу I – “чиста вода”. Всі водойми належать до другого або третього класу. Методи контролю якості води, регламентовані в чинних нині стандартах, розраховані на воду саме першого класу. Звідси деяка невідповідність у оцінюванні якості води. Тому необхідно посилити контроль за якістю води.

**Постановка проблеми.** Згідно із державним законодавством (Водним кодексом України, Законом України “Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення”, “Про охорону навколишнього природного середовища”) повинні розроблятися та погоджуватися з територіальними органами державного санітарно-епідеміологічного нагляду організаційно-технічні заходи та наукові праці та дослідження для підвищення надійності якості водопостачання, а також системний контроль за їх виконанням.

Якість питної води – це сукупність хімічних та біологічних складових, а також фізичних властивостей води, яка дає змогу визначити ступінь її чистоти та придатність до споживання.

Критерієм якості води є знаходження значень відповідних показників її якості в заданих державними стандартами інтервалах.

Згідно із Державними санітарними правилами і нормами “Вода питна. Гігієнічні вимоги до якості води централізованого господарсько-питного водопостачання” існують такі типи контролю за якістю питної води:

- а) повний – визначення всіх регламентованих державними правилами і нормами показників якості води;
- б) загальний фізико-хімічний контроль – визначення концентрацій речовин, які характеризують нешкідливість хімічного складу води;
- в) скорочений контроль – передбачає визначення лише деяких показників якості води, зокрема:
  - контроль епідемічної безпеки води: показник загальної кількості мікроорганізмів (бактерій) ЗМЧ в 1см<sup>3</sup>

води, індекс БГКП – кількість бактерій групи кишкових паличок (коліформних мікроорганізмів) в 1см<sup>3</sup> води;

– контроль нешкідливості хімічного складу води: водневий показник рН, окислюваність перманганатна, концентрація нітратів, заліза, залишкового активного хлору, ТГМ – тригалометани (сума) – хлороформ, дібромхлорметан, тетрахлорвуглець тощо;

– органолептична оцінка: каламутність, кольоровість, присмак, запах;

г) спеціальний контроль епідемічної безпеки питної води;

д) спеціальний токсикологічний контроль та біотестування;

е) спеціальний контроль радіаційної безпеки води.

Важливим в оцінюванні якості питної води є математичне моделювання якості. Воно дає змогу контролювати та прогнозувати якість питної води, що є дуже важливим у водопідготовці.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Сьогодні математичне моделювання якості здійснюється лише для річкової води [1]. У цій статті описується математична модель оцінювання якості саме питної води.

При плануванні водоохоронних заходів контроль якості води зводиться до оцінювання концентрації шкідливих речовин у водному об'єкті щодо граничнодопустимої концентрації. Для такого контролю можуть використовуватися математичні моделі, які описують формування якості води. Сучасні математичні моделі формування якості води, будучи багатокомпонентними, описують трансформацію забруднювальних речовин [4].

Математичне моделювання є сенс здійснювати лише для основних фізико-хімічних та бактеріологічних показників якості питної води. Це зумовлено тим, що в державних стандартах найбільша увага приділяється вимірюванню саме цих показників якості, а органолептичні та біологічні показники є до деякої міри похідними від них.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Математична модель, що розробляється, повинна адекватно віддзеркалювати процеси, які проходять у воді. Її можна було б надалі використовувати для створення законів управління якістю води.

Значення показника якості води (позначимо його через  $X$ ) повинні задовольняти такі основні вимоги:

1) значення  $X$  не повинні бути від'ємними;

2) більше значення  $X$  означає більше забруднення вододжерела, менше значення – менше забруднення;

3) значення  $X$  не повинні збільшуватися в часі;

4) усталене значення  $X$  повинно дорівнювати нулеві, тобто для часу  $t \rightarrow \infty$ :  $X = 0$ . [1]

Побудуємо модель, яка описує зміну значень показника якості води у час  $t$  в якійсь точці вододжерела.

Зменшення значень будь-яких хімічних показників якості води, наприклад, концентрації якоїсь хімічної речовини, спричиняють багато різних процесів (наприклад, попереднє хлорування, аерація, висвітлення, дезінфекція, адсорбція).

На кожен хімічну речовину, яка є показником якості питної води, діє свій набір процесів, де кожен наступний перетворює продукти попереднього і лише останній призводить до зменшення концентрації хімічної речовини. Ці процеси проходять з різними швидкостями і через це їх взаємодію треба розглядати як послідовно-одночасне проходження. Послідовний – тому, що наступний починається лише тоді, коли вже почався попередній і з'явилися результати його дії, а одночасний – тому, що наступний починається тоді, коли попередній ще не закінчився.

Існування таких наборів послідовно-одночасних процесів для кожної хімічної речовини, що є у вододжерелі, і є першою вихідною передумовою методики побудови моделі вододжерела.

Другою вихідною передумовою є упорядкування основних процесів очищення за їх причинно-наслідковим взаємовпливом і поділ їх на групи. До першої групи зараховуємо ті процеси, які починають діяти на хімічну речовину одразу. До другої – ті процеси, що діють на результат дії першої (“попередньої”) групи і так далі. Процеси кожної групи, крім останньої, або спричиняють перетворення хімічних речовин з одних форм в інші (хімічна трансформація), або розкладають складні речовини на простіші (хімічний та біохімічний розклад) або інше. Процеси ж групи, яка вважається останньою, приводять до повного вилучення з води речовин, які моделюються.

Аналіз всіх процесів, які відбуваються у вододжерелі, дав змогу встановити, що здебільшого можна обмежитись трьома групами, а іноді й двома.

Характер процесів, які впливають на хімічні речовини, є подібним до характеру процесів, які впливають на вміст бактерій та мікроорганізмів, тому встановлені для хімічних показників закономірності можна перенести на показники бактеріологічні. Це є третьою вихідною передумовою.

Побудуємо математичну модель зміни значень хімічних та бактеріологічних показників якості води, враховуючи ці три вихідні передумови.

Процес будемо описувати в часі, зважаючи на постулат, як загальноприйнято, що швидкість зміни значення показника якості води в будь-який момент часу пропорційна до самого значення показника, тобто:

$$\frac{dX_1}{dt} = -k_1 X_1(t), \quad X_1(0) = X(0), \quad (1)$$

де  $X_1$  – величина показника якості води, яка б відзначалася, якщо б на речовину діяли процеси тільки першої групи;  $k_1$  – коефіцієнт пропорційності між швидкістю проходження процесів першої групи та значенням показника, на який вони діють.

Розв’язок рівняння (1) має вигляд:

$$X_1(t) = X(0) \times e^{-k_1 t}. \quad (2)$$

Модель для урахування двох чи трьох груп послідовно-одночасних процесів необхідно будувати відповідно до другої передумови, тобто з урахуванням їх причинно-наслідкового взаємовпливу. А саме з урахуванням впливу швидкості проходження процесів першої групи на процеси другої і процесів першої і другої груп на процеси третьої.

Математичний опис кожного набору груп послідовно-одночасних процесів, згідно з трьома вихідними передумовами, пропонується здійснювати у вигляді:

$$\frac{dX(t)}{dt} = G_l(t) \times X(t), \quad l = 1 \cup 2 \cup 3 \quad (3)$$

$$X(0) = X_0 \quad (4)$$

$$G_1(t) = -k_1 \quad (5)$$

$$G_2(t) = -k_2(1 - e^{-k_1 t}) \quad (6)$$

$$G_3(t) = -k \left[ 1 - e^{-k_2(1 - e^{-k_1 t})t} \right] \quad (7)$$

де  $X$  – це значення показника якості води (наприклад, концентрації будь-якої хімічної речовини), що моделюється;  $G_l(t)$  – функція, яка враховує вплив  $l$ -ї ( $l=1,2,3$ ) кількості груп послідовно-одночасних процесів на зміну значення показника  $X$ ;  $X_0$  – це значення концентрації  $X(t)$  в початковий момент часу  $t=0$ ;  $k_2$  – коефіцієнт пропорційності між швидкістю проходження процесів другої групи, за умови їх ізолюваного проходження, та значенням показника, на який вони діють; множенням  $k_2$  на коефіцієнт  $(1 - e^{-k_1 t})$

враховується вплив процесів першої групи на процеси другої;  $k_3$  – коефіцієнт пропорційності між швидкістю проходження процесів третьої групи, за умови їх ізолюваного проходження, та значенням показника, на який вони діють; множенням  $k_3$  на додатковий коефіцієнт враховуються впливи процесів першої та другої груп на процеси третьої.

Математична модель (3), (5), (6) для процесів двох груп враховує такі головні фізичні положення:

1) в початковий момент часу  $t=0$ , коли процеси першої групи лише починаються, процеси другої групи ще зовсім не почалися, оскільки вони діють на результати дії процесів першої групи, яких ще немає; коефіцієнт  $(1 - e^{-k_1 t})$  в функції (6) з  $t=0$  якраз дорівнює нулю, тому  $dX_2(t)/dt=0$ , отже  $X_2(t)=const$ , яка за наших умов є нулем;

2) коли час прямує в нескінченність  $t \rightarrow \infty$ , процеси першої групи вже практично закінчилися і процеси другої групи, теж наближаючись до закінчення, діють на ту концентрацію речовин чи вміст мікроорганізмів, які залишилися після дії процесів першої групи.

Коефіцієнт пропорційності між величиною  $X_2$  та її похідною  $dX_2(t)/dt$ , як відомо, вже не залежить від коефіцієнта  $k_1$ , а дорівнює лише коефіцієнту  $k_2$ . Коефіцієнт  $(1 - e^{-k_1 t})$  в функції (6) з  $t \rightarrow \infty$  дорівнює одиниці, отже  $dX_2(t)/dt = -k_2 X_2$ . Тобто значення коефіцієнта  $k_2(1 - e^{-k_1 t})$  в разі зміни часу  $t$  від 0 до  $\infty$  змінюється від 0 до  $k_2$ , правильно відображаючи динаміку процесів. З рівняння (7) видно, що для трьох груп процесів, аналогічно, значення швидкості проходження процесів в разі зміни часу  $t$  від 0 до  $\infty$  змінюється від 0 до  $k_3$ , правильно відображаючи динаміку процесів всіх трьох груп.

Розв’язки моделі (3) з функціями (5) для двох груп процесів і (7) для трьох груп процесів мають вигляд, відповідно:

$$X_2(t) = X_0 \cdot e^{-\frac{k_2}{k_1} [e^{-k_1 t} + k_1 t - 1]} \quad (8)$$

$$X_3(t) = X_0 e^{-\int_0^t e^{-k_2(1 - e^{-k_1 q})q} dq} \quad (9)$$

де  $q$  – проміжна змінна інтегрування.

**Висновки.** За допомогою математичної моделі динаміки якості води, описаної в цій статті, можна визначити ступінь її очищення, відповідність нормам питного водопостачання, що є дуже важливим для до-

сягнення безпеки життєдіяльності та здоров'я людини. Збільшення антропогенного навантаження на довкілля одночасно з підвищенням вимог до якості питної води зумовлює актуальність проблеми, яка розглядається.

1. Мокін В.Б., Мокін Б.І. Математичні моделі та програми для оцінювання якості річкових вод. – Вінниця, 2000. 2. Державні санітарні правила і норми “Вода питна.

Гігієнічні вимоги до якості води централізованого господарсько-питного водопостачання”. 3. Айтсам А.М., Кельнер Х.А., Пааль Л.Л. Расчеты изменений концентраций загрязняющих веществ в реках. // Гигиена и санитария. – 1968. – №11. – С. 12–16. 4. Контроль качества природных и сточных вод Сборник статей. 5. Доан С., Бондаренко В. та ін. Характеристика вірусного забруднення водопровідної води // Стандартизація, сертифікація, якість. – № 4. 2003.

УДК 621.317

## ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ: КОНЦЕПЦІЇ, ПРИНЦИПИ, СИСТЕМИ

© Володимир Погребенник, Мирослав Мельник, Мирослав Бойчук, 2005

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України,  
відділ електричних вимірювань фізичних величин,  
вул. Наукова, 5, 79601, Львів, Україна

*Розглянуто концепції, принципи та системи екологічного моніторингу в Україні. Розроблено структуру станції фонових екологічного моніторингу Шацького національного природного парку.*

*Рассмотрено концепции, принципы и системы экологического мониторинга в Украине. Разработана структура станции фоновых экологического мониторинга Шацкого национального природного парка.*

*Conception, principle and systems for ecological monitoring in Ukraine is proposed. The structure of the background ecological monitoring of the Shatsk's National Park are elaborated.*

**Вступ.** Під моніторингом середовища, що оточує людину розуміють “... стеження за станом оточуючого людину природного середовища і попередження про кризові ситуації, шкідливі для здоров'я людей та інших живих організмів” [1]. В інших визначеннях моніторингу, наведених у словнику “Природокористування” (а їх 10), звернено увагу або на просторовий аспект (від фоновий до імпактного), або на методи його реалізації: космічний, авіаційний, біологічний тощо. За таким підходом зміст моніторингу полягає у здійсненні двох взаємопов'язаних функцій – спостереження (стеження) і попередження. Такий моніторинг націлений на фіксацію негативних наслідків господарських дій та їх вторинних ефектів і, отже, має низький прогностичний потенціал. Це означає, що виконувани дії повинні мати характер рятівних робіт.

Подібну концепцію екосистемного моніторингу розвиває Б.В. Виноградов: як об'єкт розглядають екосистеми, основний метод – аерокосмічний. Питання керування, регулювання, нормування та оптимізації не обговорюються. Відзначимо, що аерокосмічний моніторинг користується популярністю не тільки серед природодослідників, але й на урядовому рівні.

**Формулювання мети і розв'язання задачі.** Мета роботи – розглянути основні концепції екологічного моніторингу, проаналізувати принципи та його системи, розробити структуру станції фонових екологічного моніторингу.

**Концепції екологічного моніторингу.** У першій половині сімдесятих років у СРСР було розроблено дві альтернативні концепції екологічного моніторингу – Ю.А. Израелем та І.П. Герасимовим (рис. 1). У концепції, розробленій Ю.А. Израелем, отримав розвиток натуралістичний, або природно-науковий підхід. Сильною стороною цієї концепції є її спрямованість на фіксацію антропогенних змін природного середовища.

“Моніторингом правильніше називати систему спостережень, які дозволяють виділити зміни стану біосфери під впливом діяльності людини [2]. Основні блоки цієї системи – спостереження, оцінка та прогноз стану природного середовища”. “Екологічний моніторинг .... включає спостереження, оцінку та прогноз антропогенних змін стану абіотичної складової біосфери (зокрема зміни рівнів забруднення природних