

Сафоник А.П., Куницький С.О.*Національний університет водного господарства та природокористування
(вул. Соборна, 11, Рівне, 3300, Україна; e-mail: a.p.safonyk@nuwm.edu.ua, s.o.kunytский@nuwm.edu.ua)***МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ КОНТАКТНОГО ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ ВОДИ КРИЗЬ ПОРИСТЕ
ЗАВАНТАЖЕННЯ ВОДООЧИСНОГО ФІЛЬТРА**

Розглянуто проблему очистки підземної води для потреб питного водопостачання. Проаналізовано просторово-одновимірний процес очищення рідини шляхом фільтрування у шарі полістирольного фільтруючого завантаження, на цій основі побудовано математичну модель, що дозволяє описати фізико-хімічний процес знезалізнення води. Досліджено технологічні особливості процесу водопідготовки та особливості споруд, що його забезпечують.

Розроблена математична модель процесу знезалізнення води перевірена на природній воді експериментальним методом. Для моделі встановлено масообмінні коефіцієнти, побудовано графічні залежності зміни втрат напору та якості фільтрату від часу фільтрування. Побудовано алгоритм розв'язку відповідної нелінійної регулярно збуреної задачі типу «конвекція-масообмін». Проведено комп'ютерний експеримент й підтверджено адекватність розробленої моделі експериментальними даними досліджень.

Ключові слова: математична модель, пінополістирольний фільтр, технологія водопідготовки, фільтруюче завантаження, втрати напору, контактне знезалізнення води.

Вступ. В сучасному суспільстві раціональне використання водних ресурсів, в умовах дефіциту води, погіршення її якості є складною науково-технічною проблемою [1, 2]. Очищення природних вод, вдосконалення технологій підготовки води та розроблення нових ефективних ресурсозберігаючих методів стає все більш актуальним в останні роки.

На сьогоднішній день близько 30% всієї питної води в Україні забирається із підземних джерел. На фізико-хімічний склад таких вод має вплив контакт та його тривалість із різними породами та ґрунтами, глибина їх залягання, зіткнення їх з атмосферою та поверхневими водами і багато інших явищ [3-6].

Для водопідготовки існує досить велика кількість методів, проте їх можна згрупувати на безреагентні; реагентні; катіонообмінні; біохімічні [6-12].

Одним з простих і дешевих методів водопідготовки є безреагентний метод, що ґрунтується на технології контактного знезалізнення води, яка включає спрощену аерації води з наступним її фільтруванням через пористі завантаження. Даний метод можна використовувати, якщо вміст заліза становить до 10 мг/дм³ і рН вище 7 [3, 11, 12].

Контактне знезалізнення – це процес знезалізнення води фільтруванням при високих значеннях рН та лужності, що передбачає подачу аерованої води відразу на фільтри без попереднього її відстоювання [3, 4, 6].

Процес знезалізнення може здійснюватися за допомогою фільтра різної конструкції з різноманітним зернистим завантаженням – гравієм, щебенем, кварцовим піском, антрацитом, пінополістиролом, тощо [5-8].

В кожному конкретному випадку технологія контактного знезалізнення потребує уточнення, залежно від фізико-хімічних показників води [11-14].

Головною метою даної статті є дослідження фізико-хімічного процесу знезалізнення підземної води та побудова математичної моделі, що описує ефективність водопідготовки з врахування параметрів, що мають вплив на процес.

Матеріали і методи досліджень. Підготовка підземних вод до вимог питної якості забезпечується на водоочисних станціях, на яких досить ефективно себе зарекомендували пінополістирольні фільтри. Одним з напрямків оптимізації роботи пінополістирольних фільтрів є розробка фі-

льтрів з крупногранульованим завантаженням, що одержується на підприємствах по виготовленню пінополістирольних плит. Перевагами таких фільтрів є малогабаритність та економічність конструкції та високий ступінь очищення підземних вод [6].

Мета дослідження полягає в розробленні математичної моделі підготовки підземних вод її адаптації для фільтрів з пінополістирольним завантаженням.

При виконанні досліджень використовувалося фізичне моделювання процесу знезалізнення води в лабораторних умовах на пінополістирольному фільтрі. Визначалися втрати напору в зернистому завантаженні, концентрація заліза у вхідній воді та в очищеній, лужність, рН, температура та ряд інших показників.

Результати досліджень. Для створення математичної моделі, що дозволить описати фізико-хімічний процес знезалізнення води, розглянемо просторово-одно-вимірний процес очищення рідини шляхом фільтрування у шарі полістирольного фільтруючого завантаження товщиною L (ото-тожнюється з відрізком $[0, L]$ осі $0x$. Припустимо, що частинки забруднення (сполуки заліза) можуть переходити з одного стану в інший, тобто відбуваються процеси захоплення-відриву. Відповідний процес фільтрування крізь пористе гранульоване середовище доцільно описати наступною модельною задачею:

$$\left[\frac{\partial \sigma(\rho)c(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial vc(x,t)}{\partial x} = - \frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} \right], \quad (1)$$

$$\left[\frac{\partial \rho(x,t)}{\partial t} = \beta(\rho)c(x,t) - \alpha(\rho)\rho(x,t), \right]$$

$$c|_{x=0} = c^*(t), \quad c|_{x=L} = 0, \quad \rho|_{x=0} = 0, \quad \rho|_{x=L} = 0, \quad (2)$$

$$v = \kappa(\rho) \cdot \text{grad } p, \quad (3)$$

$$\alpha(t) \int_0^L \rho(\tilde{x}, t) d\tilde{x} = \mu(t), \quad (4)$$

де $c(x,t)$ – концентрація домішок в рідкому середовищі, що фільтрується; $\rho(x,t)$ – концентрація домішок, осаджених у фільтруючому матеріалі; $\beta(\rho) = (\beta_0 - \beta \cdot \rho(x,t))v^{\gamma_1}d^{\gamma_2}$ – функція, що ха-

рактеризує масові обсяги осадження домішкових частинок за одиницю часу (β_0 – масообмінний коефіцієнт, β^* – нормуючий коефіцієнт; v – швидкість фільтрування; d – еквівалентний діаметр завантаження; γ_1, γ_2 – емпіричні коефіцієнти, що залежать від фізико-хімічних властивостей вод, що подається на очищення [4, 15]); $\alpha(t)$ – шукана функція, яка характеризує масовий об'єм, який відірвався від гранул завантаження; $\mu(t)$ – функція, що характеризує масовий розподіл осаду з часом (знаходиться дослідним способом), умова прийме вигляд (4) й призначена для знаходження $\alpha(t)$ ([4, 5, 15]); $c^*(t) = C_{\rho x}$ – концентрація домішкових частинок на вході фільтра; $\sigma(\rho) = \sigma_0 - \gamma^{-1}\rho$ – пористість фільтруючого матеріалу (σ_0 – пористість чистого завантаження, γ – масова концентрація твердих частинок в одиниці об'єму); $\kappa(\rho)$ – функція, що характеризує фільтрацію;

$$\kappa(\rho) = \begin{cases} \kappa_0 - \lambda\rho(x,t), & \rho < \rho_0, \\ \kappa_0 - \lambda\rho(x, T_F), & \rho \geq \rho_0, \end{cases} \quad (5)$$

де λ – нормуючий коефіцієнт; $\rho_0 = \rho(L, T_F)$; p – тиск.

В більш загальному випадку тиск $p = p(x,t)$ раціонально було б визначати в результаті розв'язання рівняння:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\kappa(\rho) \frac{\partial p}{\partial x} \right) = \frac{\partial \sigma(\rho)p}{\partial t}, \quad (6)$$

Рівняння (6) отримане на підставі записаного вище рівняння руху і рівняння стану:

$$\text{div } v = \frac{\partial \sigma(\rho)p}{\partial t}, \quad (7)$$

Крайові умови рівняння: $p(0,t)=p^*(t)$; $p(L,t)=p^*(t)$, $(0 < t < \infty)$.

Початкові умови рівняння: $p(x,0) = p^*(x)$ $(0 < x < L)$ $(p^*(t),$

$p^*(t), p^*(x)$ – задані досить гладкі й погоджені в кутових точках області $G = \{(x,t): 0 < x < L, 0 < t < \infty\}$ функції.

При цьому, в процесі розв'язання задачі, можемо визначати відповідне значення

grad p , зокрема – різницю тисків $\Delta P = p^*(t) - p_*(t)$ на вході й виході з фільтра.

Обговорення результатів дослідження. Апробацію моделі проведемо в комп'ютерній програмі, призначеній для розв'язання крайових задач для систем параболічних і еліптичних диференціальних рівнянь в частинних похідних (PDE). За результатами досліджень побудуємо графіки залежності масообмінного коефіцієнта $\alpha(t)$ – (a) з часом та масообмінного коефіцієнта $\beta(\rho)$ і $\alpha(t)$ – (b).

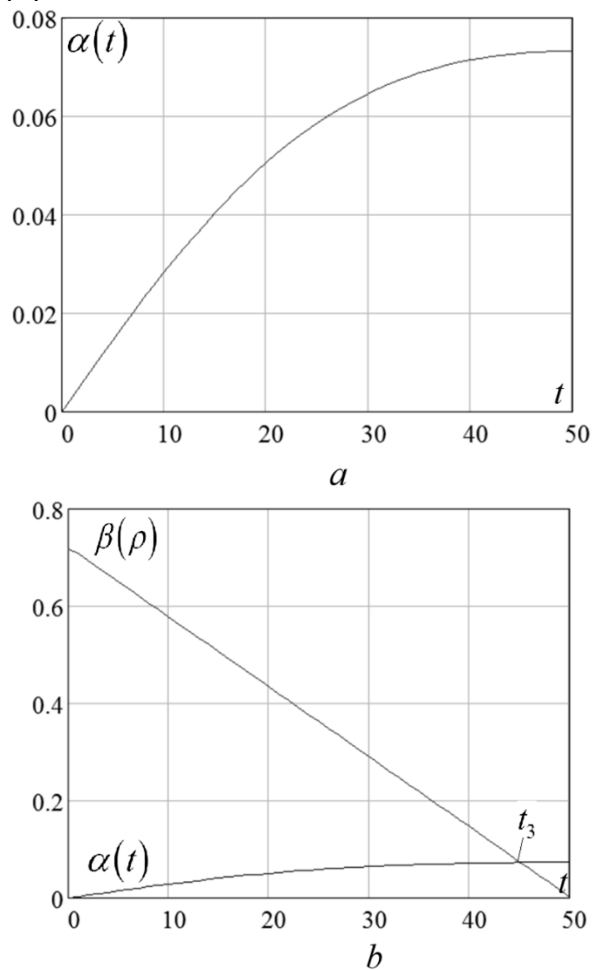


Рис. 1. Залежність масообмінного коефіцієнта $\alpha(t)$ – (a) з часом та масообмінного коефіцієнта $\beta(\rho)$ і $\alpha(t)$ – (b)

Часову залежність масообмінного коефіцієнта $\alpha(t)$ зображено на рис. 1a. Зростання масообмінного коефіцієнта з часом пояснюється осадженням часточок гранули пористого завантаження й максимальним насиченням домішковими частинками. Ймовірність відриву частинок від гранул

зростає до часу t_3 ефективної роботи фільтра. Залежність $\beta(\rho)$ на виході з фільтра з часом, а також $\alpha(t)$ дає можливість визначити t_3 (див. рис. 1b).

З метою підтвердження теоретичних досліджень було здійснено експериментальні дослідження процесу знезалізнення води на лабораторній установці. Як фільтруючий матеріал використовувалося крупнозернисте пінополістирольне завантаження промислового виробництва.

Для виявлення статистичної взаємодії контрольованих параметрів проведено ряд фільтроциклів з різною вхідною концентрацією заліза у модельному розчині (1,0...2,0 мг/дм³). Дослідження втрат напору проводилося в діапазоні швидкостей фільтрування від 4,0 до 7,0 м/год.

На рис. 2 показано зміни втрат напору в фільтруючому пінополістирольному завантаженні в діапазоні швидкостей фільтрування 4-7 м/год та концентрації заліза у воді 1.5 мг/дм³. Дані отримані експериментально на лабораторній установці та в результаті комп'ютерного експерименту на основі знайденого розв'язку (1)-(3).

Якість фільтрату після процесу знезалізнення відповідала нормативним вимогам до питної води.

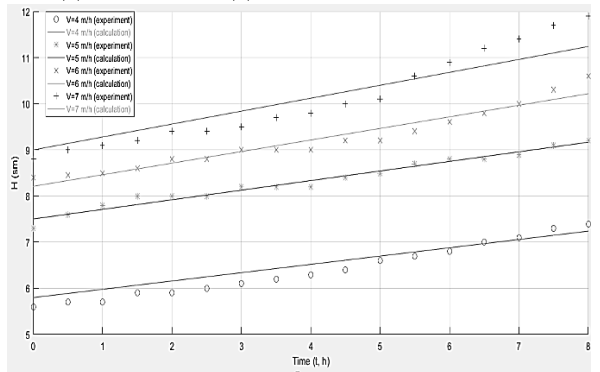


Рис. 2. Залежність втрати напору від тривалості фільтрування при швидкості 4-7 м/год та концентрації заліза у вихідній воді 1.5 мг/дм³

Залежність якості фільтрату від тривалості фільтрування в діапазоні швидкостей 4-7 м/год при концентрації заліза у вихідній воді 1.5 мг/дм³ отримані експериментально на лабораторній установці та в результаті комп'ютерного експерименту на основі знайденого розв'язку (1)-(3) представлено на рис. 3.

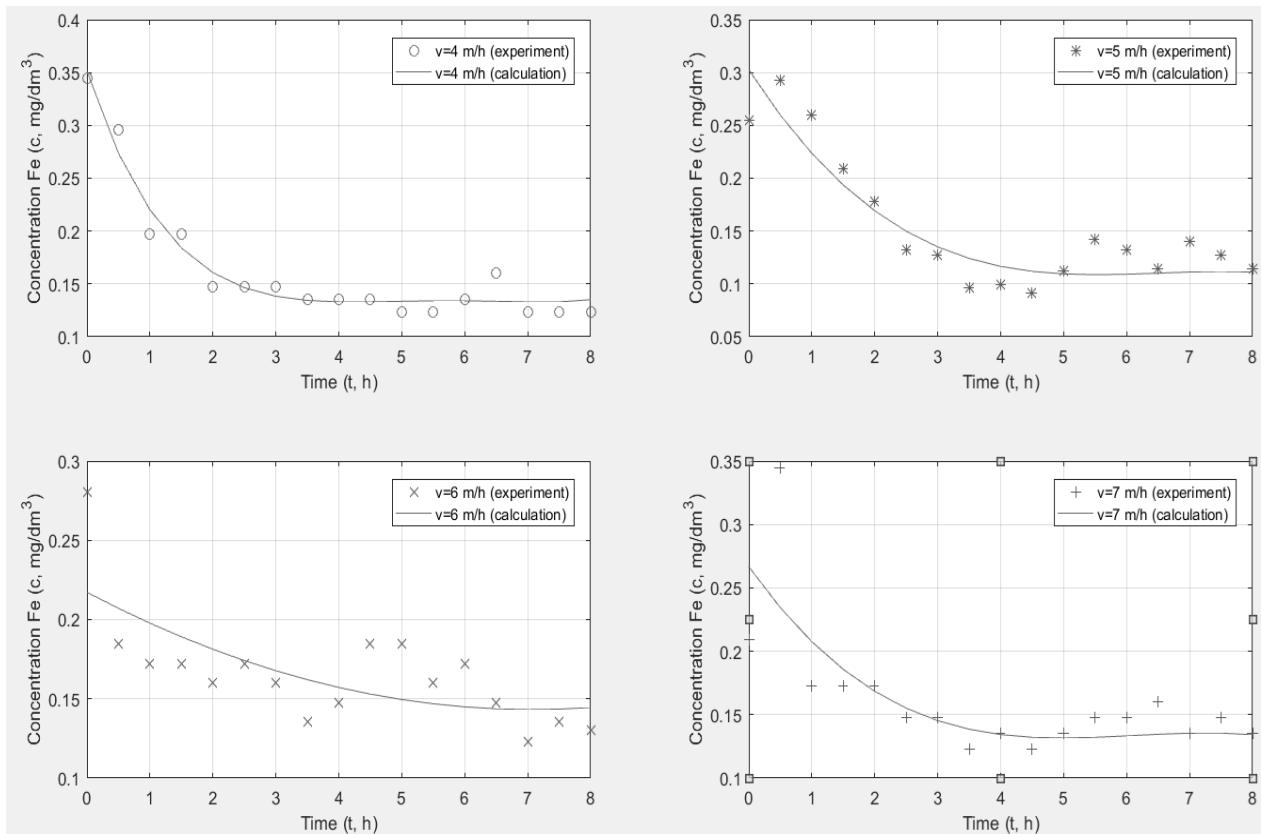


Рис. 3. Графік залежності якості фільтрату від тривалості фільтрування при швидкості 4-7 м/год та концентрації заліза у вихідній воді 1.5 мг/дм³

Висновки. Проаналізовано просторово-одновимірний процес очищення рідини шляхом фільтрування у шарі полістирольного фільтруючого завантаження, на цій основі побудовано математичну модель, що дозволяє описати фізико-хімічний процес знезалізнення води. Досліджено технологічні особливості процесу водопідготовки та особливості споруд, що його забезпечують. Розроблена математична модель процесу знезалізнення води перевірена на природній воді експериментальним методом. Для моделі встановлено масообмінні коефіцієнти, побудовано графічні залежності зміни втрат напору та якості фільтрату від часу фільтрування. Побудовано алгоритм розв'язку відповідної нелінійної регулярно збуреної задачі типу «конвекція-масообмін». Розроблена математична модель описує закономірності затримання сполук заліза в пористому завантаженні фільтра з урахуванням параметрів якості води, яка подається на фільтр.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Державні санітарні норми і правила. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною: ДСанПіН 2.2.4-171-10 – К. – 2010. (Нормативні директивні правові документи).
2. ДСТУ 7525:2014. Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості (Наказ Мінекономрозвитку України від 23.10.2014 № 1257. – К. – 2014).
3. Orlov V. Energy saving in water treatment technologies with polystyrene foam filters / V. Orlov, S. Martynov, S. Kunitskiy // Journal of Water and Land Development. – PAN in Warsaw, 2016. – Vol. 31 (X-XII). – P. 119-122.
4. Orlov V.O., Safonyk A.P., Martunov S. Yu., Kynutsky S.O. Simulation the process of iron removal the underground water by polystyrene foam filters // International Journal of Pure and Applied Mathematics - IJRAM – 2016. – V. 90, N. 2. – P. 87-91.
5. Минц Д. М. Теоретические основы технологии очистки воды. / Д. М. Минц. – М.: Стройиздат, 1964. – 155 с.
6. Orlov V. Water defferrization in polystyrene foam filters with sediment layer / V. Orlov, S. Martynov, S. Kunitsky. – Saarbrucken,

- Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. – 94 с.
7. Николадзе Г. И. Обезжелезивание природных и оборотных вод / Г. И. Николадзе. – М.: Стройиздат, 1978. – 161 с.
 8. Станкявичус В. И. Обезжелезивание воды фильтрованием (основы теории и расчет установок) / В. И. Станкявичус. – Вильнюс: Мокелас, 1978. – 120 с.
 9. Żurek A. Environmental flow as an area of potential conflict between the role of groundwater in the supply and its environmental function [Text] / Anna Żurek // Acta Scientiarum Polonorum. 2014. – Issue 13 (4). – P. 301–314.
 10. Denisov S.E. Analysis of the Effectiveness of Sorption and Membrane Technologies and Water Purification Equipment with Increased α -Activity for Domestic Water Supply [Text] / S.E. Denisov, M.V. Shirokova // Procedia Engineering. 2016. – Vol. 150. – P. 2364–2368.
 11. Орлов В.О. Дослідження процесу знезалізнення підземної води на зернистих фільтрах з підвищеною крупністю гранул / В.О. Орлов, С.Ю. Мартинов, С.О. Куницький, М.М. Меддур // Вісник НУВГП: Збірник наукових праць. – Рівне: НУВГП, 2012. – Випуск 4(60). – 268 с.
 12. Schöntag J. M. Water quality produced by polystyrene granules as a media filter on rapid filters [Text] / J. M. Schöntag, B. S. Pizzolatti, V. H. Jangada // Journal of Water Process Engineering. 2015. – Vol. 5. – P. 118–126.
 13. Бомба А.Я. Моделювання нелінійно-збурених процесів очищення рідин від багатоконпонентних забруднень : [монографія] / А. Я. Бомба, А. П. Сафоник. – Рівне: НУВГП, 2017. – 296 с.
 14. Safonyk A. P. Modelling the filtration processes of liquids from multicomponent contamination in the conditions of authentication of mass transfer coefficient / A. P. Safonyk // International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, Vol. 9, 2015, pp. 189-192.
 15. Safonyk A. Mathematical modeling process of liquid filtration taking into account reverse influence of process characteristics on medium characteristics / A. Safonyk, A. Bomba // International Journal of Applied Mathematical Research, Vol. 4, No. 1, 2015, pp. 1-7.

Сафоник А.П., Куницький С.О. МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА КОНТАКТНОГО ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ВОДЫ СКВОЗЬ ПОРИСТУЮ ЗАГРУЗКУ ВОДООЧИСТНОГО ФИЛЬТРА. Рассмотрена проблема очистки подземной воды для нужд питьевого водоснабжения. Проанализированы пространственно одномерный процесс очистки жидкости путем фильтрования в слое полистирольного фильтрующей загрузки на этой основе построена математическая модель, позволяющая описать физико-химический процесс обезжелезивания воды. Исследовано технологические особенности процесса водоподготовки и особенности сооружений, его обеспечивают.

Разработана математическая модель процесса обезжелезивания воды проверена на природной воде экспериментальным методом. Для модели установлен массообменный коэффициент, построены графические зависимости изменения потерь напора и качества фильтрата от времени фильтрации. Построен алгоритм решения соответствующей нелинейной регулярно возмущенной задачи типа «конвекция-массообмен». Проведен компьютерный эксперимент и подтверждена адекватность разработанной модели экспериментальными данными исследований.

Ключевые слова: математическая модель, пенополистирольный фильтр, технология водоподготовки, фильтрующая загрузка, потери напора, контактное обезжелезивание воды.

Safonyk A., Kunitsky S. MODEL OF THE PROCESS OF CONTACT DETERGENT OF WATER DRAINAGE OF THE PORTABLE OF DOWNLOADING OF WATER-EQUIVALENT FILTER. The problem of underground water purification for drinking water supply needs is considered. The spatially one-dimensional liquid purification process was analyzed by filtration in a layer of polystyrene filter loading, on this basis a mathematical model was developed that allows to describe the physico-chemical process of non-freezing of water. The technological features of the process of water preparation and the features of the structures providing it are investigated.

The mathematical model of the process of water disinfection has been developed and tested on natural water by the experimental method. For the model mass exchange coefficients are established, graphic dependences of changes in pressure losses and filtrate quality from filtering time are constructed. The algorithm of the solution of a corresponding nonlinear regularly perturbed problem of convection-mass transfer type is constructed. A

computer experiment was carried out and the adequacy of the developed model with experimental data of the research was confirmed.

Key words: mathematical model, foam polystyrene filter, water treatment technology, filtering loading, pressure loss, contactless deironing of water.

УДК 504.4:628.194

Юрченко В. О.

*Харківський національний університет будівництва та архітектури,
(вул. Сумська, 40, Харків, 61002, Україна; e-mail: bjiieknuca@gmail.com)*

Волков В. М.

*КП «Харківводоканал»
(вул. Шевченко, 2, Харків, 61013, Україна; e-mail: office@hkov.kharkov.ua)*

Радіонов М. П.

*Український науково-дослідний інститут екологічних проблем,
(вул. Бакуліна, 6, Харків, 61166, Україна)*

ВПЛИВ НІТРИФІКАЦІЇ У ВОДОЙМАХ-ДЖЕРЕЛАХ ПИТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ НА РОЗВИТОК ЦЬОГО ПРОЦЕСУ В СПОРУДАХ ВОДОПІДГОТОВКИ

Результати дослідження води з Краснопавлівського водосховища та з р. Сів. Дінець на вміст сполук азоту показали наявність процесу нітритифікації в цих водних об'єктах. Контроль рН води до та після водопідготовки виявив нітритифікацію в цих спорудах, активність якої була пропорційною нітритифікації у відповідних водоймах – джерелах водопостачання.

Ключові слова: природна водойма, ступінь нітритифікації, водопідготовка, азотовмісні сполуки, рН, екологічна безпека.

Аналіз проблеми. Серед основних вимог, що забезпечують безпеку питної води – концентрація неорганічних азотовмісних сполук (табл. 1) [1, 2].

Таблиця 1- Нормативні вимоги до концентрації азотовмісних сполук в питній воді

Параметр	США	ЄС	ВООЗ	Швейцарія	Україна
Амонійний азот	0,2	0,5	1,5	0,05	0,5
Нітрати	44	50	50	25	50
Нітрити	3,5	0,5	3	0,01	0,1

Концентрація неорганічних азотовмісних сполук в природних водоймах (в тому числі тих, що використовуються для питного водопостачання) загалом незначна, в непроточних водоймах (озерах): N-NO₂ 0,001-0,004, N-NH₄ - 0,024-0,136, N-NO₃ - 0,003-0,009 мг/дм³; в проточних водоймах (ріках): N-NO₂ 0,001-0,04; N-NH₄ - 0,06-4,4; N-NO₃ - 0,03-3,5 мг/дм³ [3-6].

Азот належить до макроелементів живої матерії, і активно перетворюється (в

тому числі в окисно-відновних реакціях) при метаболізмі біоти. Підвищена кількість азоту в природній воді у вигляді органічних сполук або в амонійній формі свідчить про забруднення водного джерела побутовими або виробничими стічними водами. Присутність у природних водах неорганічних сполук азоту в окиснених формах свідчить про те, що у водному середовищі йдуть процеси «самоочищення» шляхом нітритифікації [7-9].

Нітритифікація – дві унікальні реакції циклу азоту у біосфері, які здійснюються хемолітоавотрофними нітритифікуючими бактеріями [10-15]. Амонійокислюючі бактерії (нітритифікатори I фази) здійснюють першу фазу нітритифікації, окислюючи амоній до нітриту:



$$\Delta G_0 = -270,7 \text{ кДж/моль} \quad (1)$$

Нітритокислюючі бактерії (нітритифікатори II фази) здійснюють другу фазу нітритифікації, окислюючи нітрити до нітратів:

