

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 51.76

САНГІНОВА О. В., доцент; ТОЛСТОПАЛОВА Н. М., доцент; БОНДАРЕНКО С. Г., доцент;
ЯНКАУСКАЙТЕ В. К., аспірантка

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

Формалізовано задачу оптимізації процесом керування біологічним очищенням стічних вод: запропоновано критерій оптимізації, обґрунтовано вибір змінних стану технологічного процесу, складено цільову функцію та визначено математичні обмеження на змінні з урахуванням сучасних вимог до якості очищеної води, сформульовано задачу оптимізації. Для вирішення задачі оптимізації розроблено програмний модуль, який дозволяє отримати набір технологічних впливів для забезпечення оптимального результату відповідно до обраного критерію. Проведені імітаційні дослідження показали, що розраховані значення керуючого впливу забезпечують зниження концентрації полутантів до нормативних значень протягом 6-10 годин, а відхилення розрахункових значень від даних нормальної експлуатації не перевищують 5%.

Ключові слова: біологічне очищення стічних вод, критерій оптимізації, цільова функція, оптимізація.

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2021.228092

© Сангінова О. В., Толстопалова Н. М., Бондаренко С. Г., Янкаускайте В. К., 2021.

Постановка проблеми. Біологічне очищення широко застосовується для видалення органічних забруднювачів зі стічних вод як промислового, так і побутового походження, і є порівняно дешевим і ефективним методом очищення великих обсягів забрудненої води. В Україні біологічні методи запроваджені на багатьох станціях водоочищення, однак незважаючи на посилення вимог до якості очищеної води, рівень забруднення водою продовжує зростати [1], тому існуючі підходи до керування процесами водоочистки потребують перегляду і вдосконалення.

Аналіз попередніх досліджень. Питанням оптимізації та керування процесів очищення стічних вод присвячено велику кількість публікацій в українських і закордонних наукових журналах. Поряд з традиційним підходом до синтезу систем програмного керування процесами водоочищення, розглянутих, наприклад, у [2], ряд авторів розвивають більш сучасні методи керування. Зокрема, у роботі [3] розглянуто застосування гібридних нейронних мереж до оптимального керування процесом очищення стічних вод, у роботі [4] виконано огляд еволюційних алгоритмів, методів оптимізації теорії штучного інтелекту та їх застосування у водній галузі. Загальний огляд наукових проблем та практичних завдань, пов'язаних з оптимальним керуванням та проектуванням систем керування біологічним очищенням стічних вод, наведено у роботі [5]. Серед найбільш важливих проблем автори виділяють складність визначення оптимальної робочої стратегії керування через високу нелінійність та різноманітність основних біохімічних явищ та їх потенційну взаємодію, а також через суперечливість цілей, з якими стикається оператор (наприклад, підвищення ефективності очищення та мінімізація експлуатаційних витрат). Вибір оптимальних технологічних впливів на процес біологічного очищення стічних вод з урахуванням економічних та екологічних аспектів, значно спрощується при застосуванні програмних модулів, які працюють у режимі порадики оператора.

Метою роботи є визначення критерію оптимізації процесу керування біологічним очищенням стічних вод, обґрунтування вибору змінних стану технологічного процесу, формування цільової функції та математичних обмежень з урахуванням сучасних вимог до якості очищеної води, постановка та розв'язання задачі оптимізації. Для вирішення задачі оптимізації розроблено програмний модуль, який дозволяє отримати набір технологічних впливів для забезпечення оптимального результату відповідно до обраного критерію.

Виклад основного матеріалу. У задачах оптимізації процесів водоочищення основна увага приділяється економічній ефективності. У роботі Хрейза та його колег [5] показано, що для діючих станцій водоочищення

цільова функція часто включає витрати, пов'язані з експлуатацією, такі як споживання енергії аераторами та насосами. Деякі автори також враховують витрати на обладнання [6-8], обслуговування конструкцій/обладнання [7, 8] та заробітну плату персоналу [7].

Серед неекономічних цілей оптимізації найбільш живаними є мінімізація концентрації забруднюючих речовин в очищеній воді та максимізація продуктивності установки [5, 9]. Як докладно описано в роботі [5], загально визнаних формувань цільової функції для систем з активним мулом не існує, і запропоновані в літературі вирази часто призводять до різних результатів, які іноді відрізняються на кілька порядків для тих самих умов експлуатації. Враховуючи посилення природоохоронних норм, в роботі запропоновано обрати мінімізацію концентрації забруднюючих речовин в очищеній воді в якості головної мети оптимізації.

Обґрунтування вибору змінних стану процесу біологічного очищення стічних вод.

Розглянемо процес біологічного очищення води на прикладі Бортницької станції аерації ПАТ "АК Київводоканал", на очисних спорудах якої здійснюється обробка стічних вод м. Києва та прилеглих населених пунктів. Загальна проектна добова потужність трьох блоків станції становить 1,8 млн м³ стічних вод; фактичний об'єм стічних вод, що надходять на очистку, - від 700 тис. до 1000 тис. м³ на добу [10]. Відповідно до технологічної схеми очищення, стічні води послідовно проходять механічне та біологічне очищення; після вторинних відстійників очищена вода поступає у р. Дніпро. Якість очищеної води контролюється за показниками, зазначеними у Табл. 1.

Таблиця 1 – Показники якості очищеної води

Найменування показника	Нормативне значення, мг/дм ³	Найменування показника	Нормативне значення, мг/дм ³
Завислі речовини	15	Нітриди	3,3
Хімічне споживання кисню (ХСК)	80	Нітрати	45
Біологічне споживання кисню (БСК ₅)	15	Розчинений кисень	4
Азот загальний	10	Ентерококи	400
Фосфор загальний	1	Кишкова паличка	1000

На станції встановлено 5 автоматичних пробовідбірників на основні точки контролю якості стічних вод: стічна вода, що надходить на споруди I блоку, II та III блоків та очищена зворотна вода I, II та III блоків, тому в якості змінних стану технологічного процесу можуть бути обрані показники, які вимірюються автоматично.

Ділянка біологічного очищення показана на Рис. 1: стічна вода після первинного відстійника потрапляє до аеротенку, де відбувається взаємодія забрудненої води з активним мулом; після аеротенку суміш поступає у відстійник, з якого частина активного мулу повертається до аеротенку, а освітлена вода – на доочищення.

Інтенсифікація процесу аерації здійснюється шляхом подачі повітря через фільтросні труби, які дозволяють рівномірно розподіляти повітря в аеротенку, збільшити масообмін кисню в муловій суміші та покращити якість очистки. Отже, в якості параметру керування може бути обрана витрата повітря до аеротенку.

Формування цільової функції та постановка задачі оптимізації. Оскільки основною метою оптимізації є мінімізація значень концентрації забруднюючих речовин в очищеній воді, то в якості цільової функції можна обрати квадратичне відхилення поточних значень концентрації від нормативних:

$$J = \int_0^t (C_i(t) - C_i^N)^2, \quad (1)$$

де $C_i(t)$ – поточне значення концентрації i полютанта, мг/дм³, C_i^N – нормативне значення i полютанта, мг/дм³.

Математичну модель процесу біологічного очищення стічних вод отримано із застосуванням підходів, запропонованих М.Хенце [11]:

$$C_i(t) = \left(k_1 C_{i \text{ забр}}(t) + k_2 C_{i \text{ рец}}(t) \right) \left(1 - e^{-t/T} \right) + C_{i \text{ ноч}}, \quad (2)$$

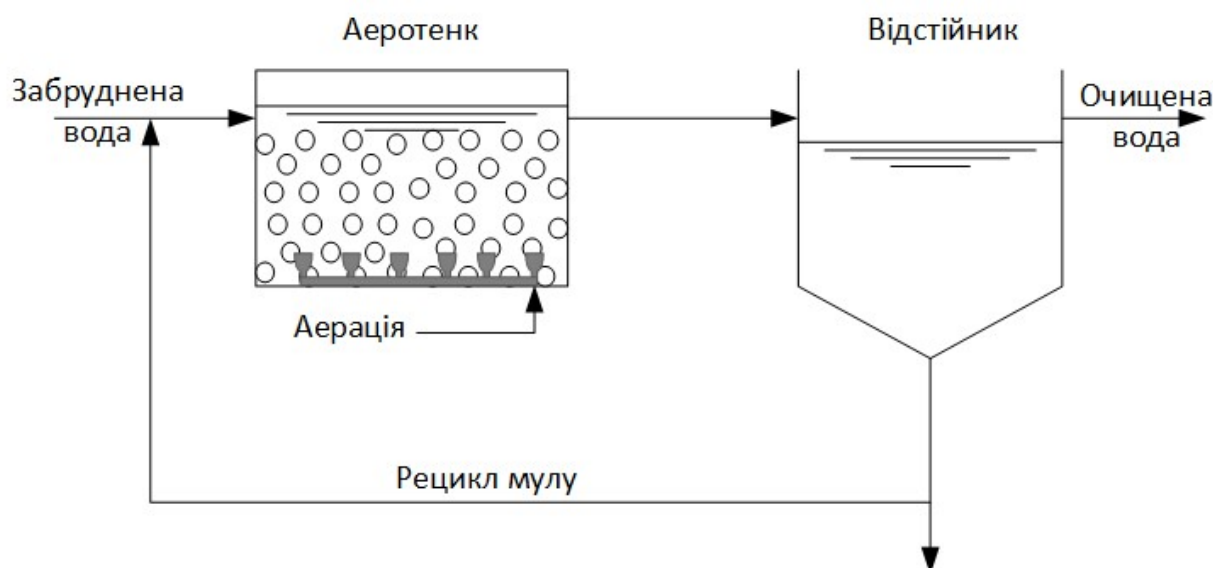


Рис. 1 – Ділянка біологічного очищення стічних вод

де $k_1 = \frac{Q_{забр}(B_x - r_{x,s})}{(Q_{забр} + Q_{реци})B_x}$, $k_2 = \frac{Q_{забр}}{(Q_{забр} + Q_{реци})}$, $T = \frac{V_a}{(Q_{забр} + Q_{реци})}$, $Q_{забр}$ – витрата забрудненої води на вході в аеротенк, м³/год, $Q_{реци}$ – витрата потоку з рециклу активного мулу, м³/год, $C_{i\ забр}(t)$ – концентрація i поліюванта у воді на вході в аеротенк, мг/дм³, $C_{i\ реци}(t)$ – концентрація i поліюванта у потоку, що потуває з рециклу, мг/дм³, B_x – навантаження на активний мул, $r_{x,s}$ – швидкість видалення i поліюванта, V_a – об'єм аеротенку м³, $C_{i\ поч}$ – початкова концентрація i поліюванта, мг/дм³.

Початкові умови:

$$C_{i\ поч} = C_{i\ поч}(0). \quad (3)$$

Зв'язок між швидкістю видалення органічної речовини $r_{x,s}$ і концентрацією кисню описує подвійне рівняння Моно [11]:

$$r_{x,s} = \frac{\mu_{\max}}{Y_{\max}} \cdot \frac{S_a}{S_a + K_s} \cdot \frac{S_{O_2,a}}{S_{O_2,a} + K_{O_2,s}}, \quad (4)$$

де μ_{\max} – максимальна питома швидкість росту при видаленні органічного поліюванта (S), Y_{\max} – максимальний коефіцієнт приросту біомаси на одиницю органічної речовини (S), S_a – концентрація органічної речовини в аеротенку, $S_{O_2,a}$ – концентрація кисню в аеротенку, $K_s, K_{O_2,s}$ – константи насичення по субстрату та по кисню відповідно.

Сформулюємо задачу оптимізації наступним чином:

$$\min_{S_{O_2,a}, t} J(C_i(t), S_{O_2,a}, t) \quad (5)$$

за умови:

$$\begin{cases} |C_i(t) - C_i^N| \leq \varepsilon \\ Q_{O_2,a} \leq Q_{O_2,max} \end{cases}, \quad (6)$$

де $Q_{O_2,a}$ – витрата кисню, м³/с, $Q_{O_2,max}$ – максимальна витрата кисню, м³/с, ε – допустиме відхилення концентрації поліютанта від нормативного значення.

Концентрацію кисню в аеротенку визначають з урахуванням витрати повітря до аеротенку, часу подачі повітря та об'єму аеротенку.

Розв'язання задачі оптимізації. З метою вирішення задачі оптимізації підставимо рівняння (2) та (4) у (1) та візьмемо похідну від отриманого виразу по концентрації кисню в аеротенку:

$$\frac{dJ}{dS_{O_2}} = \frac{-C_{забр} Q_{забр} \mu_{max} S_a}{B_x Y_{max} (Q_{забр} + Q_{реци})(S_a + K_s)} \left(\frac{1}{S_{O_2,a} + K_{O_2}} - \frac{S_{O_2,a}}{(S_{O_2,a} + K_{O_2})^2} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right). \quad (7)$$

Дослідження (7) на наявність екстремуму показало, що дане рівняння не має глобального екстремуму, отже, рішення задачі оптимізації шукатимемо із застосуванням чисельних методів.

Результати і обговорення. Для вирішення задачі оптимізації розроблено програмний модуль мовою JavaScript з використанням архітектури клієнт-сервер, який працює в режимі реального часу і дозволяє отримати такі значення витрати кисню в аеротенк, які забезпечують мінімальне відхилення концентрації поліютанів від нормативного значення. На Рис. 2 показано зміну загального солевмісту у часі: значення загального солевмісту знижується до нормативного протягом 5.5 – 6 годин, що відповідає реальним даним.

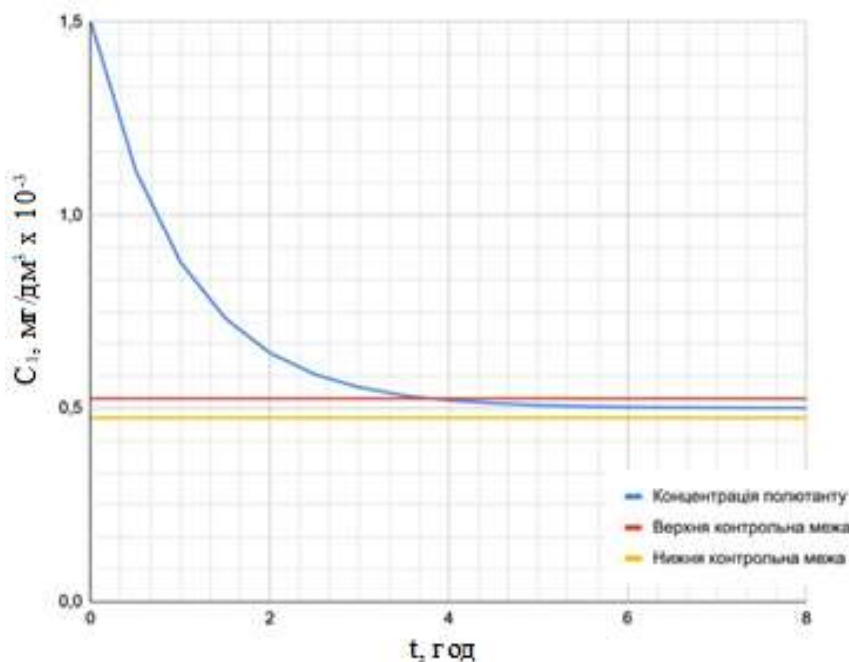


Рис. 2 – Результати розрахунку зміни загального солевмісту у часі

Аналогічні результати отримано для інших показників, зазначених у Табл.1. Отримані результати відповідають нормативним значенням та даним нормальної експлуатації. Проведені імітаційні дослідження показали, що різниця між розрахунковими і реальними даними не перевищує 5%.

Відповідно до розробленого інтерфейсу, на робочій станції користувач має можливість переглядати, додавати та редагувати результати вимірювань. В якості робочої станції користувач використовує додаток у операційній системі Android (Рис. 3).

Дані лабораторних вимірювань, уведені користувачем, автоматично порівнюються з нормативними показниками і звіряються з результатами автоматичного контролю (за наявності), із застосуванням технологій хмарних обчислень. У випадку виявлення розбіжностей між нормативними і уведеними/розрахованими значеннями більше, ніж на 5%, змінюється колір з комірок, в яких представлені дані, з зеленого на червоний, як показано на Рис. 3.

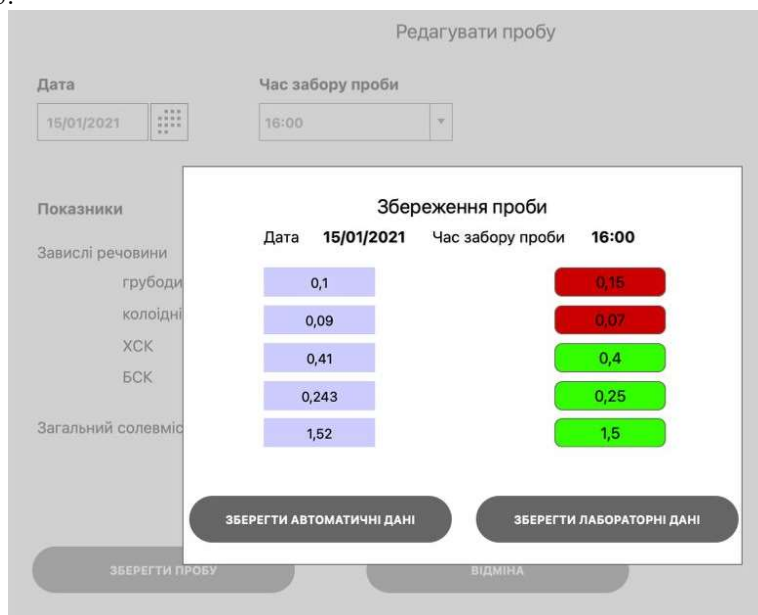


Рис. 3 – Вікно редагування вимірюваних показників якості води

Застосування хмарних технологій дозволяє пришвидшити обробку даних і надати доступ до контрольованих параметрів та розрахованих значень як оперативному персоналу, так і керівному складу станції водоочищення. Приклад представлення результатів розрахунку представлено на Рис. 4.

Робоче місце оператора

Дата	Час	Показники				
		грубодисперсні	колоїдні	ХСК	БСК	загальний солевміст
14.01.2021	16:00	0,15	0,07	0,4	0,25	1,5
14.01.2021	24:00	0,147	0,068	0,395	0,271	1,53
15.01.2021	08:00	0,151	0,071	0,401	0,263	1,49
15.01.2021	16:00	0,16	0,069	0,42	0,234	1,55
15.01.2021	24:00	0,154	0,067	0,387	0,252	1,62
16.01.2021	08:00	0,148	0,072	0,362	0,269	1,51
16.01.2021	16:00	0,153	0,073	0,431	0,236	1,39
16.01.2021	24:00	0,159	0,071	0,388	0,254	1,62
17.01.2021	08:00	0,153	0,065	0,376	0,231	1,64
17.01.2021	16:00	0,155	0,068	0,424	0,244	1,47
17.01.2021	24:00	0,162	0,069	0,375	0,229	1,54
18.01.2021	08:00	0,159	0,074	0,39	0,271	1,58
19.01.2021	16:00	0,149	0,064	0,415	0,265	1,52



Рис. 4 – Приклад візуалізації даних на робочому місці оперативного персоналу

Результати розрахунків зберігаються на сервері у текстовому файлі, який оновлюється з інтервалом 8 годин. Накопичені дані та результати розрахунків дають можливість спостерігати за зміною концентрації поллютантів та прогнозувати показники якості води на наступний період часу.

Висновки. Запропоновано критерій оптимізації процесом керування біологічним очищенням стічних вод, який враховує посилення вимог до якості очищеної води, обґрунтовано вибір змінних стану технологічного процесу, цільової функції та обмеження, сформульовано задачу оптимізації процесом керування біологічним очищенням стічних вод. Розроблено програмний модуль, який працює в режимі поради оператора і дозволяє отримати набір технологічних впливів – витрати повітря до аеротенку – для забезпечення оптимального результату відповідно до обраного критерію. Результати імітаційних досліджень показали, що значення нормативних показників досягаються протягом 6-10 годин, а відхилення розрахункових значень від даних нормальної експлуатації не перевищують 5%.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження у напрямку оптимізації процесів керування біологічним очищенням стічних вод передбачають розроблення системи керування та перевірку отриманих рішень на інших станціях водоочищення.

Список використаної літератури

1. Митченко Т.Е. Загрязнение водоемов Украины. Кто виноват и что делать? // Вода и водоочистные технологии. 2019. № 3(93). С. 22-24.
2. Найденова Т.В., Федун Р.А. Синтез САУ процессом биохимической очистки // Наукові праці ДонНТУ. 2014. № 1(26). С. 41-50.
3. Choi D.-J. and Park H. A hybrid artificial neural network as a software sensor for optimal control of a wastewater treatment process // Water Research. 2001. Vol. 35, iss 16. P. 3959-3967.
4. Janda Reddy M., Nagesh Kumar D. Evolutionary algorithms, swarm intelligence methods, and their applications in water resources // H2Open Journal. 2020. 3(1). P.135-188.
5. Hreiz N., Latifi M.A., Roche N. Optimal design and operation of activated sludge processes: State-of-the-art // Chemical Engineering Journal, Elsevier. 2015. P. 900 - 920.
6. J. Hakanen, K. Miettinen, K. Sahlstedt Wastewater treatment: New insight provided by interactive multiobjective optimization // Decision Support Systems. 2011. Vol. 51, Issue 2. P. 328-337.
7. Walid El Shorbagy, Nawras Nabil and Ronald L. Droste Optimization of A2 O BNR processes using ASM and EAWAG Bio-P models: model formulation // Water Quality Research Journal of Canada. 2011. P. 13-27.
8. I.A.C.P. Espírito-Santo, E.M.G.P. Fernandes, M.M. Araújo, E.C. Ferreira Wasted sludge treatment contributions in the WWTP total cost // WSEAS Transactions on Information Science and Applications. 2007. P. 655-662.
9. B. Chachuat, N. Roche, M.A. Latifi Optimal aeration control of industrial alternating activated sludge plants // Biochemical Engineering Journal. 2005. Vol. 23, Issue 3. P. 277-289.
10. Офіційна інтернет-сторінка Бортницької станції аерації // URL: <https://vodokanal.kiev.ua/bortniczkastancz%D1%96ya-aeracz%D1%96%D1%97> (дата звернення: 15.02.2021)
11. Хенце М., Армозс П., Ля-Кур-Янсен Й., Арван Э. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы / Пер. з англ. Т.П. Мосоловой під ред. С.В. Каложного. 2006. 480 с.

Надійшла до редакції 14.03.2021

Sanginova O., Tolstopalova N., Bondarenko S., Yankauskaite V.

SECONDARY WASTEWATER TREATMENT PROCESSES OPTIMIZATION

Introduction. *The level of water pollution in Ukraine continues to grow, despite the strengthening of requirements for the treated water, so the existing approaches to the water treatment processes control need to be revised and improved.*

Materials and methods. *Mathematical Programming methods for formalization and solving the optimization problem are used. Computer simulation research using the program developed by the authors are applied to verify the compliance of the obtained results with the normative values and data of normal operation.*

Results and discussion. The optimization of processes control was performed on the example of a typical process of secondary wastewater treatment, which is used for wastewater treatment in Kyiv and nearby settlements. The secondary treatment unit consists of an aeration tank, into which air is forcibly supplied and evenly distributed, and a secondary settling tank with recycling. The problem of optimization of biological wastewater treatment control process is formalized: minimization of pollutant concentration in treated water is chosen as the main aim of optimization, air flow to aeration tank is chosen as control parameter, quadratic deviation of current concentration values from normative ones is chosen for target function. To solve the optimization task, a software module in JavaScript was developed using a client-server architecture that works in real time and allows to obtain such values of oxygen consumption in the aeration tank, which provide a minimum deviation of the concentration of pollutants from the normative values. The simulations showed that the calculated control values provide a reduction in the concentration of pollutants to the normative values within 6-10 hours, which corresponds to the data of normal operation, and the difference between the calculated and actual data does not exceed 5%.

Conclusions. The obtained results allow to find a set of technological influences to ensure optimal control according to the selected criterion, and are also the basis for calculating the control system. The results of calculations can be used for short-term - up to 8 hours - forecasting of water quality indicators.

Keywords: wastewater, secondary treatment, optimization.

References

1. Mitchenko, T.E. (2019), "Pollution of reservoirs of Ukraine. Who is responsible and what to do?", *Voda i vodoocistnye tehnologii*, no 3(93), pp. 22–24.
2. Naidenova, T.V. and Fedyun, R.A. (2014), "Synthesis of ACS by biochemical treatment process", *Naukovi pratsi DonNTU*, no 1(26), pp. 41–50.
3. Choi, D.-J. and Park, H. A. (2001), "Hybrid artificial neural network as a software sensor for optimal control of a wastewater treatment process", *Water Research*, Vol. 35, iss 16, pp. 3959-3967.
4. Janda, Reddy M., Nagesh, Kumar D. (2020), "Evolutionary algorithms, swarm intelligence methods, and their applications in water resources", *H2Open Journal*, no 3(1), pp.135-188.
5. Hreiz, N., Latifi, M.A. and Roche N. (2015), "Optimal design and operation of activated sludge processes: State-of-the-art", *Chemical Engineering Journal*, pp. 900 - 920.
6. Hakanen, J., Miettinen, K. and Sahlstedt K. (2011), "Wastewater treatment: New insight provided by interactive multiobjective optimization", *Decision Support Systems*, Vol. 51, iss. 2, pp. 328-337.
7. Shorbagy, W. E., Nabil, N. and Droste, R. L. (2011), "Optimization of A2 O BNR processes using ASM and EAWAG Bio-P models: model formulation", *Water Quality Research Journal of Canada*, no 46.1. pp. 13-27.
8. Espirito-Santo, I.A.C.P., Fernandes, E.M.G.P., Araújo, M.M. and Ferreira E.C. (2007), "Wasted sludge treatment contributions in the WWTP total cost" *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*, pp. 655-662.
9. Chachuat, B., Roche, N. and Latifi, M.A. (2005) "Optimal aeration control of industrial alternating activated sludge plants", *Biochemical Engineering Journal*, Vol. 23, iss. 3, pp. 277-289.
10. Official website of Bortnytsia aeration station (2021), URL: <https://vodokanal.kiev.ua/bortniczka-stancz%D1%96ya-aeracz%D1%96%D1%97> (access date: 15.02.2021).
11. Henze, M., Harremoës, P., Jansen, J.C. and Arvin, E. Wastewater treatment. Biological and Chemical Processes (2006), Moskva, Mir.