

- Vіsник budivnitstva. Harkiv: HNUBA, 2012. #70. s. 363-367.
- Otoplenie tsehov i zalov. Energetika: RZh VINITI. 2004. # 11. 04.11–22 S. 302. Ref. st.: Werdie Wahlhat, hat hier nicht die Qual. Stahlmarkit. 2004. Bd. 54. N 2. S. 54-55.
  - Bloh A.G., Zhuravlev Yu.A., Ryzhkova L.N. Teploobmen izlucheniem. Spravochnik. M.: Enegoatomizdat, 1991. 431 s.
  - Bloh A.G. Osnovyi teploobmena izlucheniem. M.: Gosenergoizdat, 1967. 331 s.
  - Sperrou E.M., Sess R.D. Teploobmen izlucheniem. L.: Energiya, 1971. 356 s.
  - Hudenko A.A. Ratsionalnoe ispolzovanie energii v stroitelstve. K.: Budivelnik, 1980. 143 s.
  - Skanavi A.I. Otoplenie. 2-e izd. M.: Stroyizdat, 1988. 416 s.
  - SNiP 41-01-2003. Otoplenie, ventilyatsiya i konditsionirovanie. M.: FGUP TsNS, 2004. 25 c.
  - Cherednik A.D. Modelirovanie i optimizatsiya parametrov luchistyyih vodyanyih panelnyih sistem otopleniya: dissertatsiya kand. tehn. nauk.: 05.23.03. Harkiv: HNUBA, 2017. 125 s.
  - [Zehnder](http://www.zehnder-systems.com). URL: <http://www.zehnder-systems.com>

**Cherednik A., Burda U., Pivnenko U., Redko I. MODELING AND OPTIMIZATION OF RADIANT HEATING SYSTEMS ON THE CRITERION OF MINIMUM ENTROPY PRODUCTION.** The paper deals with the problem of energy saving. One of the promising ways to reduce energy costs is the use of radiant water ceiling heating. This type of heating has a number of significant advantages over other types and reduces the cost of heating up to 50 percent compared to traditional systems. A review of recent materials and publications in this topic was conducted and objectives and goals for further research were identified. This paper presents the results of modeling and optimization of systems for ceiling water radiant heating by the criterion of the minimum production of entropy. The main tasks of optimization of the panel heating system and the specified limitations for the design of such systems are formulated. When these restrictions are met, a turbulent mode of water flow in the pipe and uniform heating along the length of the panel tape are guaranteed. The paper presents the simulation results of a heating system using radiant ceiling panels produced by Zehnder using a specific room as an example. A graph was constructed with the results of minimizing the production of entropy for a given thermal power of the panel heating system. And a graph with level lines for a given heat output. The mathematical model of the system was applied to optimize the cooling of the same room. As a result, a graph was drawn up based on the results of minimizing the production of entropy at a given thermal power and intervals of variation of the panel area and the temperature of the water in the supply pipe. A comparison was made of the heat capacities of various types of panels calculated for a mathematical model with their values given in the technical documentation. The result of this work is the development of a method for optimizing the parameters of a radiant water heating system. As well as the use of optimization as the optimization criterion is the minimum production of entropy. The prospect of future research is the development of recommendations for the design of radiant panel systems.

**Key words:** radiant heating, criterion of the minimum of entropy production, thermal power, mass flow of water, temperature pressure, panel cooling.

doi.org/10.29295/2311-7257-2018-101-3-197-212

УДК 628.34

**Епоян С.М.<sup>1</sup>, Сізова Н.Д.<sup>1</sup>, Мовчан С.І.<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Харківський національний університет будівництва та архітектури  
(вул. Сумська, 40, Харків, 61002, Україна, e-mail: [ykg.knuca@ukr.net](mailto:ykg.knuca@ukr.net), [sizova@ukr.net](mailto:sizova@ukr.net);  
[orcid.org/0000-0003-4551-1309](http://orcid.org/0000-0003-4551-1309), [orcid.org/0000-0002-0103-1939](http://orcid.org/0000-0002-0103-1939))

<sup>2</sup> Таврійський державний агротехнологічний університету імені Дмитра Моторного  
(пр. Б. Хмельницького, 18, Мелітополь, 72312, Україна, e-mail: [msi.movchan@gmail.com](mailto:msi.movchan@gmail.com),  
[orcid.org/0000-0001-8665-482X](http://orcid.org/0000-0001-8665-482X))

## **МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ РОБОТИ СИСТЕМ ОБОРОТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ**

Представлено розробки з інтенсифікації роботи систем оборотного водопостачання. Розглянуті питання моделювання процесу обробки стічних вод при інтенсифікації роботи оборотних систем водопостачання. Математичне моделювання окремих елементів (складових одиниць) у системах оборотного водопостачання досліджує процеси обробки стічних вод гальванічного виробництва, що дозволяє оцінити якість очищення

стічних вод і зневоднювання рідких відходів, які утворюються від попередніх процесів промислового водопостачання. Метою даної роботи є розробка математичних і імітаційних моделей для дослідження процесів обробки стічних вод промислових підприємств, визначення оптимальних параметрів, які визначають ефективну роботу на окремих ділянках і по всьому технологічному обладнанню систем оборотного водопостачання. У роботі використані методи фізичного й математичного моделювання процесів обробки, очищення й знезаражування стічних вод від важких металів у системах промислового водопостачання, оптичні методи лазерної інтерферометрії, чисельно-аналітичні методи оптимізації основних параметрів робіт водоочисного встаткування. Інтенсифікація роботи систем оборотного водопостачання з використанням імітаційного моделювання дозволяє, з урахуванням логіко-імітаційного наповнення, визначити оптимізаційні режими й параметри очищення стічних вод, якості їхньої обробки та зневоднення осадів, що утворюються від попередніх процесів обробки стічних вод. Розроблена імітаційна модель визначає гідродинамічні характеристики стічних вод у трьох взаємозалежних між собою напрямках дослідження: очищення стічних вод, визначення якості обробки стічних вод і зневоднювання осадів, внаслідок проведення попередніх процесів. Імітаційна модель базується на логіко-імітаційному наповненні, що використовує побудовану математичну модель і алгоритми режиму функціонування технологічного об'єкта й ураховує умови формування й протікання процесів у роботі як складових частин систем промислового водопостачання, так і всієї системи оборотного водопостачання. Використання сучасних інформаційних технологій і обчислювальних засобів дозволяє одержувати чисельно-аналітичні співвідношення для визначення гідромеханічних параметрів у системах оборотного водопостачання.

**Ключові слова:** оборотне водопостачання, інтенсифікація, стічні води, математичне моделювання, фізичне моделювання, очищення стічних вод, обробка рідких відходів.

**Вступ.** Водогосподарський комплекс промисловості України є одним з найбільших споживачів якісної води з її водних об'єктів. Водогосподарське підприємство – це підприємство або установа, які в якості основної сировини чи робочого тіла використовують воду. Вироблений ними продукт може бути водою, яку оброблено чи використовується без оброблення, а також мати іншу природу чи стан, наприклад проводити послуги водовикористання [1, 2].

Сучасне промислове виробництво характеризується високим рівнем процесів інтенсифікації на всіх його ділянках. Особливо це відноситься до роботи оборотних систем водопостачання в цілому й ефективній роботі її складових частин. Стічні води із важкими металами та іншими супутніми речовинами утворюються на переважній більшості промислових підприємств.

Особливе місце в системі водовідведення промислових підприємств займають схеми з повторним (багаторазовим) застосуванням відпрацьованих стічних вод, технологічних розчинів і продуктів. Найпростіше використовувати в обороті таку відпрацьовану воду, яка проходячи технологічний цикл, суттєво не змінює свого хімічного складу (охолоджуюча вода) або забруднена лише механічними домішками (стоки газоочисток, гідротранспорту, змиву окалини в прокатних станах [3-5].

Системи оборотного водопостачання промислових підприємств є складовою частиною промислових підприємств будь – якої галузі господарського комплексу країни. Рівень інтенсифікації окремих складових й елементів оборотних систем водопостачання вирішує не лише коло технічних питань, а й соціально – економічних. Питання соціально – екологічного спрямування, які в останній час висувуються на перше місце, відіграють важливе значення у водогосподарському комплексі країн [6, 7].

Крім того, необхідно враховувати умови формування процесів очистки стічних вод в роботі систем оборотного водопостачання, які наведено в табл. 1.

З наведених технічних умов формування процесів очистки стічних вод в роботі систем оборотного водопостачання (табл.1), яким підпорядковані складові одиниці та

елементи промислового водопостачання: очищення стічних вод, оцінка якості їх оброблення та зневоднення осадів, які використовуються при утилізації рідинних відходів.

Тому, розробка комплексних методів є актуальною науково-прикладною задачею, спрямованою на удосконалення у водогосподарському комплексі країни, в частині забезпечення екологічної безпеки водних об'єктів.

Комплексний підхід до систем оборотного водопостачання дозволяє оптимізувати використання водних ресурсів в технологічних процесах сучасного промислового виробництва, підвищити рівень інтенсивності роботи складових частин оборотних систем водопостачання при очищенні стічних вод, оцінку їхньої якості й утилізацію осаду, що утворюється при цьому.

Таблиця 1 – Умови формування процесів очистки стічних вод в роботі систем оборотного водопостачання

Технічні умови про- ведення	Очищення СВ	Оцінка якості очищення СВ	Утилізація, утвореного осаду
Основні закони	Гідродинамічні процеси. Масообмінні (дифузійні). Хімічні (реакційні)	Гідродинамічні процеси. Масообмінні (дифузійні).	Гідродинамічні процеси. Масообмінні (дифузійні). Хімічні (реакційні)
Спосіб організації процесу	Безперервні – основних стічних вод виробництва. Періодичні – для окремих видів стоків.	Безперервні - постійний контроль гідродинамічних параметрів частинок водних розчинів.	Періодичні по мірі накопичення відходів промисловості та їх подальшого оброблення.
Зміна параметрів процесу протягом часу	Постійні (або стаціонарні) процеси	Постійні (або стаціонарні) процеси	Змінні (нестационарні) процеси. Реальні процеси завжди змінні.
Умови реалізації гідродинамічних характеристик апаратів (установок, обладнання)	Ідеального змішування. Проміжного типу	Ідеального змішування.	Ідеального змішування.

**Об'єктом дослідження** є процес інтенсифікації роботи систем оборотного водопостачання (ІРСОВ).

**Предмет дослідження** – інтенсифікація роботи систем промислового водопостачання.

**Методами дослідження** є фізичне і математичне моделювання процесів обробки, очищення, вилучення та знезаражування стічних вод із важкими металами в оборотних системах промислового водопостачання, імітаційне моделювання та чисельно-аналітичні методи оптимізації основних параметрів роботи водоочисного обладнання.

**Аналіз останніх досліджень.** Питання інтенсифікації роботи окремих складових оборотних систем водопостачання розглядаються в наукових працях багатьох фахівців і вчених, що розглядають питання підвищення надійності й ефективності систем у цілому й комплексу питань, що забезпечують їхню надійність і ефективність, що визначають рівень інтенсифікації процесів, що відбуваються, в оборотних системах водопостачання [8].

Теоретичне обґрунтування розроблення методів інтенсифікації роботи систем водопостачання та водовідведення розглядаються в роботах [9, 10]. В роботі [11] теоретично й

експериментально обґрунтовані методи інтенсифікації при подачі й розподіленні води в системі централізованого господарсько-питного водопостачання .

Математичний апарат широко використовується для оптимізації параметрів роботи оборотних систем водопостачання при вивченні гідродинамічних процесів і експлуатації систем обробки стічних вод. Це дозволяє досягти істотного ефекту на стадії проектування окремих складових систем обробки стічних вод і в наступній експлуатації систем у цілому.

Моделювання широко використовується в різних галузях виробничої діяльності. Особливо це стосується наукової сфери, де моделювання суттєво скорочує час на підготовку та впровадження результатів наукових досліджень. Найбільш поширеним і різноманітним є використання моделювання у водогосподарському комплексі країни [12, 13].

Результати чисельного експерименту з очищення стічних вод в аноксидних та аеробних біореакторах з врахуванням інгібування синтетичними детергентами процесів окиснення органічних забруднюючих речовин наведено в роботі [14]. Запропоновано вирази, які дозволяють розраховувати кінетичні показники окиснення органічних забруднюючих речовин в аноксидних та аеробних біореакторах із активним мулом, враховуючи лімітування за субстратом, концентрацією розчиненого кисню в муловій суміші, інгібування синтетичними детергентами та лізис клітин бактерій активного мулу

Моделювання технологічних процесів при очищенні питної води з використанням активованого розчину коагулянту сульфату алюмінію розглянуті в роботі [15]. Встановлено математичні залежності ефективності освітлення питної води, які можуть бути використані в розрахунках при проектуванні споруд централізованого водопроводу.

Питання дослідження процесу очищення стічних вод при інтенсифікації роботи систем оборотного водопостачання із застосуванням апарату експериментально-статистичного моделювання розглянуті в роботі [16].

Створено методику та програмне забезпечення для проведення чисельного розрахунку при дослідженні процесу нейтралізації кислих стічних вод в спеціальних пристроях [17]. Моделювання процесу нейтралізації здійснюється шляхом вирішення двох задач: гідродинамічної – по визначенню поля швидкості водного потоку, в середині установки, задачі масопереносу про рух стічних вод, що містить кислоту та лужний розчин. Для чисельного інтегрування використовується метод Лімбама і неявна різницева схема. Проведено ряд чисельних експериментів для оцінки рівня концентрації кислоти і реагенту (лужного розчину) з урахуванням їх хімічної взаємодії.

Запропоновано нелінійну кінетичну модель трансформації та іммобілізації для двох форм заліза при фізико-хімічному знезалізненні підземних вод. Отримано її строгі та наближені розв'язки стосовно вхідного перерізу завантаження фільтра. Проаналізовано можливість використання різних способів спрощення математичної моделі із застосуванням динамічного осереднення [18].

Таким чином, математичні моделі, в переважній своїй більшості при їх використанні, забезпечують рівень інтенсифікації на певних ділянках водогосподарського комплексу.

**Метою даної роботи** є розробка математичної й імітаційної моделей процесів обробки стічних вод промислових підприємств, визначення оптимальних параметрів, які визначають ефективну роботу на окремих ділянках і по всьому технологічному обладнанню систем оборотного водопостачання.

У зв'язку з поставленою метою вирішені наступні задачі:

– проведено аналіз існуючих технологічних і конструктивних рішень, спрямованих на інтенсифікацію роботи систем промислового водопостачання, за рахунок очищення

стічних вод, дослідження стану водних середовищ і утилізації рідких відходів промислового виробництва;

– обґрунтовано за допомогою математичного моделювання конструктивно–технологічні параметри та характеристики водоочисного обладнання при обробці стічних вод реагентами;

– розроблено та удосконалено математичні та імітаційні моделі процесів обробки стічних вод в апаратах напірної флоатації за рахунок визначення гідромеханічних параметрів частинок домішок водних розчинів;

– визначено та досліджено напрями інтенсифікації роботи систем оборотного водопостачання за рахунок раціонального використання води в системах промислового водопостачання за умови визначення параметрів частинок водних розчинів та емульсійного стану рідких відходів промисловості.

**Матеріали і методи досліджень.** Особливе місце в системі водопостачання промислових підприємств займають схеми з повторним (багаторазовим) застосуванням відпрацьованих стічних вод, технологічних розчинів і продуктів. Найпростіше використовується в обороті така відпрацьована вода, яка проходячи технологічний цикл, суттєво не змінює свого хімічного складу (охолоджуюча вода) або забруднена лише механічними домішками (стоки газоочисток, гідротранспорту, змиву окалин в прокатних станах [3- 5, 8, 19- 22].

Характеристика розповсюджених систем оборотного водопостачання та водовідведення на промислових підприємствах наведена в роботах [23, 24].

Застосування однієї з трьох розглянутих [3-5, 23, 24] технологічних схем в оборотних замкнених циклах використання водних ресурсів промислових підприємств вирішує поставлені технічні задачі й технологічні завдання, які в самому широкому розумінні визначають рівень інтенсифікації роботи систем оборотного водопостачання.

Системи оборотного водопостачання являють собою максимально замкнені системи, із оптимальною кількістю забиранням «свіжої» води та мінімальним скиданням неочищених стоків, до яких висуваються наступні вимоги:

– системи водопостачання й водовідведення необхідно розглядати у єдності процесів, які відбуваються в межах даного підприємства, окремого виробництва або ділянки, підпорядкованих одному напрямку технологічних операцій;

– результатом обробки промислових стоків є забезпечення екологічної безпеки при очищенні стічних вод та утилізації відходів виробництва, а саме осадів, які при цьому утворюються;

– рівень очищення стічних вод промислових підприємств повинен забезпечувати такий рівень, який дозволяє її багаторазове повторне використання в оборотному водопостачанні;

– проектування і експлуатація очисних споруд систем оборотного водопостачання повинно відповідати сучасним вимогам до якості води та зниження екологічної загрози до водних об'єктів країни.

Тому, розроблення й впровадження в систему промислових підприємств водопостачання оборотних систем, систем повторно – обігового використання води й водних ресурсів на всіх етапах промислового виробництва є актуальною **науко-прикладною задачею**, яка підвищує рівень інтенсифікації, надійності та ефективності в роботі систем промислового водопостачання підприємств різних галузей виробничої діяльності.

Використання хімічних речовин в якості реагентів дозволяє інтенсифікувати процес оброблення стічних вод. Хімічні компоненти, які входять до складу відпрацьованих миючих розчинів  $\text{Cr}^{6+}$  : ПАР :  $\text{NaOH}$  :  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  :  $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$  :  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  :  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$  дозволяють оптимізувати питомі витрати електричного струму. Відбувається повне руйнування забруднень, за рахунок прискорення окиснювально-відновлювальних реакцій та ін.[8,21,23].

Використання оптичних способів, що ґрунтуються на застосуванні ефекту Доплера і призми Дове дозволяє проводити визначення гідродинамічних параметрів частинок водних розчинів. В залежності від розробленої оптичної схеми оптимізовано отримані значення параметрів частинок водних розчинів: електрокінетичного дзета-потенціалу, електрофоретичної швидкості  $V$ , ефективного діаметру  $D$ , кількості частинок та параметри оптичної схеми: відстань до зондуємої зони, розміри електрофоретичної комірки тощо [23].

З метою підвищення рівня інтенсифікації роботи систем, напрямки оброблення рідких відходів, які утворюються при обробці стічних в системах промислового водопостачання знезаражування технологічних розчинів гальванічних відділень, що дозволяє зниження використання реагентів у 5-6 разів і зменшення об'ємів утворення осадів до 10 разів; очищення стічних вод від іонів важких металів відбувається з використанням кислих електrolітів і отримання коагуляту та згідно технології утилізації осадів стічних вод гальванічних виробництв відбувається з використанням мінеральних добавок і гідроксидів важких металів [8, 21, 23, 24].

Для забезпечення ефективності з інтенсифікації роботи системи оборотного водопостачання (ІРСОВ) передбачено комплексний підхід до дослідження процесів у системі і в її елементах і складових .

**Результати досліджень.** Системи оборотного водопостачання представляють собою об'єкт  $\Omega(x_1, x_2, x_3)$ , в якому рух висхідних і низхідних водних потоків всередині моделюється як нестационарний [25]. Потоки рідини розглядаються як динамічний рух безперервного середовища з домішками (частинками), який визначає в будь – який момент часу  $t$  поле швидкостей середовища  $v(x, t)$  в будь - якій точці  $x(x_1, x_2, x_3)$  об'єму  $\Omega$ . Стан середовища характеризується густиною  $\rho(x, t)$ , тиском  $P(x, t)$ , температурою  $T(x, t)$ . Важливою задачею в розрахунках систем оборотного водопостачання є визначення швидкості водного потоку, оскільки рух частинок (домішок) є конвекційний.

Процеси, що відбуваються в системах оборотного водопостачання, представляються наступним чином: потоком рідини забруднені домішки переносяться зі швидкістю  $v$  і в процесі дифузії обробляються. Зв'язок між потоком рідини і його концентрацією розглядається на основі законів Фіка [26] для бінарних сумішей.

Математична модель роботи систем оборотного водопостачання складається із взаємозв'язаних рівнянь:

- гідродинамічних рівнянь руху рідини (1) – (2) і рівняння нерозривності потоку для осесиметричного тіла

$$Q = \omega \cdot v, \tag{1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + a \cdot \frac{\partial v}{\partial r} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial z} = - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{\text{Re} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right)} \tag{2}$$

де  $Q$  – витрата, л/с;  $\omega$  – площа живого перерізу, м<sup>2</sup>;  $v$  – швидкість руху водного потоку, м/с;  $p$  – тиск, Па;  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;

- рівнянь матеріального і енергетичного балансу, які записуються відносно концентрації забруднень домішками співвідношеннями (3) – (4)

$$\sum G_i = 0, \sum G_n = \sum G_k + \sum G_b, \quad (3)$$

$$\sum Q_i = 0, \sum Q_n = \sum Q_k + \sum Q_b, \quad (4)$$

де  $\sum G_i, \sum Q_i$  – загальна маса і енергії речовин, котрі відбуваються у відповідних процесах;  $\sum G_n, \sum Q_n$  – маса речовин і енергії у вхідних потоках відповідних процесів;  $\sum G_k, \sum Q_k$  – маса речовини і енергії у вихідних потоках відповідних процесів;  $\sum G_b, \sum Q_b$  – маса і енергії незворотних втрат речовин відповідних процесів;  
- а також з рівняння перенесення кількості руху (5)

$$\frac{u}{r} + \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

До системи рівнянь (1) – (5) додаються початкові і граничні умови. Початковими умовами є завдання в початковий момент стан руху рідини. Граничні умови залежать від вигляду границь області дослідження.

В математичній моделі (1) – (5) враховані наступні припущення та передумови:

- фізична сутність процесів, які відбуваються, представлена у вигляді **безперервного процесу очищення** виробничих стічних вод в роботі систем оборотного водопостачання;
- фази, які складають комплексну систему з інтенсифікації роботи оборотних систем водопостачання, мають поверхню розділу і механічно розділені одна від одної (очищення стічних вод, оцінка якості їх обробки та утилізація осадів);
- **визначення гідромеханічних параметрів** частинок стоків та **обробка осадів** відбувається як результат попередньої обробки стічних вод, тобто процес ітераційний;
- **урахування** кількості частинок вилучених забруднень;
- **визначається** оцінка якості очищення стічних вод.

Складові рівняння матеріального балансу, структура розрахунку окремих складових процесів в апаратах напірної флотації представляються схемою (рис. 1).

**Рух рідинного середовища** в апаратах напірної флотації-коагуляції визначається з використанням основного закону збереження маси й енергії, який має місце в роботі систем оборотного водопостачання. Загальний вигляд рівнянь матеріального (3) і енергетичного (4) балансів використовується або для процесу у цілому або для будь – якої стадії, у разі необхідності складаються рівняння матеріального (3) і енергетичного (4) балансів для всього апарату або для його окремої частини [27–29].

При відсутності втрат рівняння матеріального балансу (5) має наступний вигляд:

– для загальної маси речовини:

$$G_c = G_p + G_o, \quad (6)$$

– для маси дисперсної фази (частинки) речовини:

$$G_c x_c = G_p x_p + G_o x_o, \quad (7)$$

де  $G_c, G_p, G_o$  – відповідно, маси вихідного потоку (водного розчину, стічних вод, суміші тощо), стічних вод (рідини), що обробляються, і рідкого осаду, утвореного внаслідок попередніх процесів;  $x_c, x_p, x_o$  – вміст речовини  $R$  у вихідному потоці (водного розчину, стічних вод, суміші тощо), стічних вод (рідини), що обробляються, і рідкого осаду, утвореного наслідок попередніх процесів.



Рис. 1. Схема розрахунку окремих складових процесів в апаратах напірної флотації

У випадку незначних кількісних втрат водного потоку (величина гідравлічних опорів не враховується), що знаходяться в системах промислового водопостачання, рівняння матеріального балансу приймає наступний вигляд:

– для загальної маси речовини:

$$G_{CB} = G_{CB}^{OЧ} + G_{CB}^{ОПТ} + G_{CB}^{P.B.}, \quad (8)$$

– для маси дисперсної фази (частинки) речовини:

$$G_{CB} \cdot x_{CB} = G_{CB}^{OЧ} \cdot x_{CB}^{OЧ} + G_{CB}^{ОПТ} \cdot x_{CB}^{ОПТ} + G_{CB}^{P.B.} \cdot x_{Ж.О.} \quad (9)$$

Рівняння матеріального балансу (9) враховує загальну масу **дисперсної фази частинок речовини**, які входять до складу стічних вод і мають однакову кількісну величину (об'єм, вагу тощо). Остання обставина обумовлює використання **оптичних методів** контролю й визначення гідромеханічних параметрів частинок домішок водних розчинів, як такі, що не вносять кількісні і якісні зміни в загальний об'єм стічних вод [28]. Це дозволяє визначати гідромеханічні параметри частинок водних розчинів, які впливають на ефективність очищення стічних вод у процесах електрофорезу і седиментації часток водних розчинів. Тому необхідно враховувати їх математичну й фактичну рівність:

$$G_{CB}^{OЧ} \cdot x_{CB}^{OЧ} = G_{CB}^{ОПТ} \cdot x_{CB}^{ОПТ}. \quad (10)$$

В системі оброблення стічних вод рівняння (10) спрощується (11):

$$G_P \cdot x_P = G_{CB}^{OЧ} \cdot x_{CB}^{OЧ}, \quad G_P \cdot x_P = x^1 \cdot (G_{CB}^{ОПТ} \cdot x_{CB}^{ОПТ}), \quad (11)$$

де  $x^1$  - коефіцієнт, який враховує стан рідких відходів на стадії їх оброблення, перероблення, нейтралізації і т. п.

Обробка водних розчинів в системах оборотного постачання передбачає визначення гідродинамічних параметрів частинок, таких як електрокінетичний  $\xi$  потенціал, діаметр, електрофоретичну швидкість частинок тощо.

Рух частинки в електричному полі [26], розглядається як результат дії на її поверхневий заряд сили Кулона  $\vec{F}_k$  з боку електричного поля і сили в'язкості  $\vec{F}_C$  у горизонтальній площині, у вертикальній площині – сили тяжіння  $\vec{F}_m$  та сили Архімеда  $\vec{F}_A$ .

За формулою Стокса в цьому випадку записуються співвідношення



$$\vec{F}_k = 6\pi r\eta V_{\Gamma}, \quad \vec{F}_m = \frac{1}{6}rD^3\rho\vec{g}, \quad \vec{F}_A = -\frac{1}{6}\pi D^3\rho_1\vec{g}, \quad \vec{F}_C = -6\pi\frac{D}{2}\eta V_B, \quad (12)$$

де  $V_{\Gamma}, V_B, \eta, \rho, \rho_1, D$  відповідно – швидкість обробки стічних вод у горизонтальній і вертикальній та горизонтальній площинах, коефіцієнт в'язкості середовища  $\eta$ , густина рідини  $\rho$  і густина  $\rho_1$  матеріалу домішки (частинки),  $D$  – ефективний діаметр для частинок сферичної форми.

Із рівняння (12) випливають співвідношення для визначення параметрів ( $V_{\Gamma}, V_B, \xi, D$ )

$$V_B = \frac{D^2 \cdot g \cdot (\rho - \rho_1)}{18 \cdot \eta}, \quad V_{\Gamma} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E \cdot \xi}{\eta}, \quad \xi = \frac{3}{2} \cdot \frac{\vec{V}_{\Gamma} \cdot \eta}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot E}, \quad D = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta \cdot V_B}{g \cdot (\rho - \rho_1)}} \quad (13)$$

де  $\xi$  – електрокінетичний потенціал,  $\varepsilon$  – діелектрична проникливість середовища,  $\varepsilon_0$  – електрична стала;  $E$  – напруженість. Швидкість електрофорезу визначається формулою Гельмгольца – Смолуховського

$$V = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 E \xi}{K \pi \eta l}, \quad (14)$$

де  $K$  – коефіцієнт, значення якого залежить від форми частинок (для сферичних  $K=6$ , для циліндричних  $K=4$ ),  $l$  – відстань між електродами. Формула Ейнштейна – Смолуховського визначає залежність між середньоквадратичним зсувом (переміщенням)  $\Delta$  частинок за час  $\tau$  у визначеному напрямку і коефіцієнтом дифузії  $DD$

$$\Delta = \sqrt{2DD\tau}. \quad (15)$$

**Рівняння турбулентної дифузії** враховує фізико – хімічну взаємодію забруднень і дає можливість визначити зміну концентрації забруднюючих домішок і визначити параметри і характеристики частинок у стічних водах.

Кількісною характеристикою поля частинок (домішок) є концентрація [26, 27]. З часом її розподіл у рідині змінюється за рахунок переносу рідини і турбулентної дифузії домішок. Турбулентний потік зважених частинок пропорціональний градієнту середньої за висі, що є коефіцієнтом турбулентної дифузії. Осереднене рівняння переносу для нестисненого потоку у разі знехтування молекулярною дифузією приводить до рівняння для концентрації

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( K_{i,j} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right), \quad (16)$$

де  $C$  – осереднена концентрація дифузії домішок,  $K_{i,j}$  – тензор турбулентної дифузії,  $u_i$  – компоненти швидкості вздовж координатних осей  $x_i$ . Для рівняння (16) необхідно знати величину  $K_{i,j}$ . Як правило, для оборотних систем водопостачання не враховують недіагональні компоненти тензора  $K_{i,j}$  і приймають

$$K_{xy} = K_{yx} = K_{xz} = K_{zx} = K_{yz} = K_{zy} = 0, \quad K_{xx} = K_x, \quad K_{yy} = K_y, \quad K_{zz} = K_z. \quad (17)$$

Для більшості практичних задач рівняння з постійними коефіцієнтами  $K_x = \text{const}$ ,  $K_y = \text{const}$ ,  $K_z = \text{const}$  рівняння (16) приводить до наступного запису

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial C}{\partial x} + K_y \frac{\partial C}{\partial y} + K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (18)$$

де  $u=u(x,y,z)$ ,  $v=v(x,y,z)$ ,  $w=w(x,y,z)$  – компоненти поля швидкостей вздовж декартових осей  $x, y, z$ .

Ліва частина рівняння (18) без складової  $\frac{\partial C}{\partial t}$  представляє конвективний перенос маси, пов'язаної з полем швидкості рідини, тоді як права частина – турбулентний перенос маси.

Рівняння (18) враховує концентрацію забруднень на початку обробки стічних вод і після їх очистки з урахування турбулентної дифузії.

У разі визначення джерела  $Q(x, y, z, t)$  забруднень рідини рівняння (18) матиме вигляд

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial C}{\partial x} + K_y \frac{\partial C}{\partial y} + K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + Q(x, y, z, t). \quad (19)$$

Наступне рівняння (20) характеризує процес **очищення** стічних вод

$$n_{ei} \cdot \frac{\partial C_i}{\partial t} + V \cdot \frac{\partial C_i}{\partial z} + \frac{\partial S_i}{\partial t} = 0, \quad (i=1 \div M), \quad (20)$$

де  $n_{ei}$  – ефективність вилучення  $i$  – ого забруднення (іонів) важких металів;  $V$  – швидкість обробки стічних вод;  $S_i$  – об'ємна концентрація (іонів) важких металів, вилучених із складу стічних вод;  $C_i$  – ефективність обробки стічних вод від іонів  $i$  – ого важкого металу;  $M$  – кількість забруднюючих елементів.

Гідродинамічні параметри частинки визначаються оптико механічними системами з урахування наступних граничних умов:

- кількість частинок  $n_{min} = 1$  кількість;  $n_{max}$  кількість.;
- швидкість руху частинки:  $v - 5_{min}$  м/с;  $v 2_{max}$  м/с;
- лінійний розмір (ефективний діаметр)  $D_{min}$  мкс;  $D_{max}$  мкс;
- розміри зондуємої зони становлять  $a \times b_{min}$  м;  $a \times b_{max}$  м;
- відстань до об'єкту досліджень  $L_{min}$  мм;  $L_{max}$  мм.

Умова потенційного руху [25] призводить до значних спрощень внаслідок змінювання концентрації водних розчинів (стічних вод), параметри і характеристики частинки домішок водних розчинів залишаються незмінними, а їх визначення можливо в будь - якому місці водного потоку.

Результати дослідження математичної моделі (1–20) представляються у вигляді функціонального співвідношення або числовим виглядом. Функціональні співвідношення, як правило, незручні для оцінювання складних фізичних процесів, тому наглядними є представлення в вигляді числа. В такому випадку створюється імітаційна (комп'ютерна) модель на основі імітаційної алгоритмічної моделі (рис. 2), яка подає змістовний опис об'єкта у формі алгоритму, що відбиває структуру й процеси функціонування об'єкта в часі, і враховує вплив випадкових факторів [30].

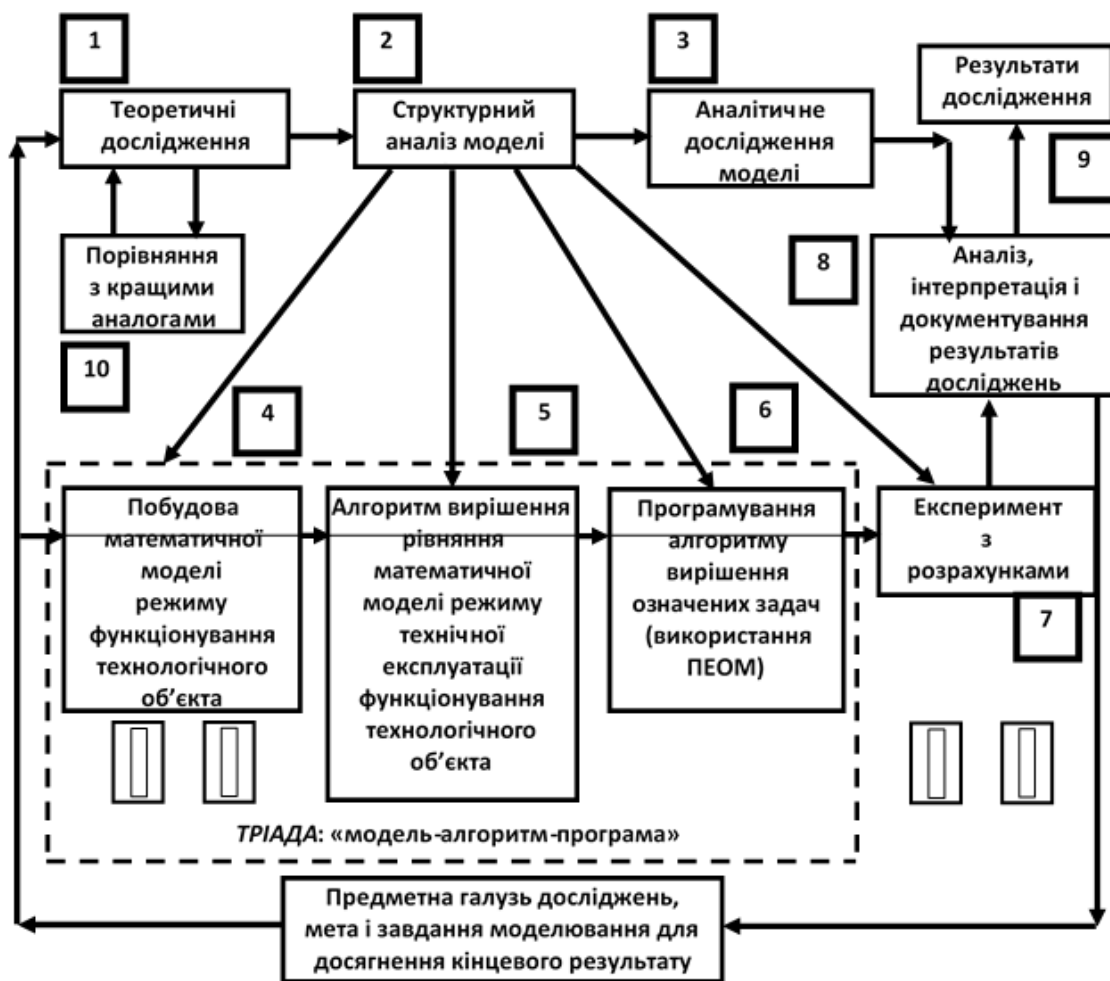


Рис. 2. Схема організації процесу імітаційного (комп'ютерного) моделювання

Виходячи з того, що комп'ютерне моделювання застосовується для дослідження, оптимізації й проектування реальних технологічних об'єктів (систем), можна виділити наступні етапи цього процесу:

- 1) визначення об'єкта – установлення границь, обмежень і вимірників ефективності функціонування об'єкта;
- 2) формалізація об'єкта (побудова моделі) – перехід від реального об'єкта до деякої логічної схеми (абстрагування);
- 3) підготовка даних – відбір даних, необхідних для побудови моделі, і подання їх у відповідній формі;
- 4) розробка моделюючого алгоритму й програми ЕОМ;
- 5) оцінка адекватності – підвищення до прийняттого рівня ступеня впевненості, з якого можна робити висновок щодо коректності висновків про реальний об'єкт, отриманих на підставі звертання до моделі;
- 6) стратегічне планування – планування обчислювального експерименту, що повинен дати необхідну інформацію;
- 7) тактичне планування – визначення способу проведення кожної серії випробувань, передбачених планом експерименту;
- 8) експериментування – процес здійснення імітації з метою одержання бажаних даних і аналізу чутливості;
- 9) інтерпретація – побудова висновків по даним, отриманим шляхом імітації;

10) порівняння теоретичних досліджень реалізації – практичне використання моделі й результатів моделювання;

11) документування – реєстрація ходу здійснення процесу і його результатів, а також документування процесу створення й використання моделі.

Наведемо результати визначення одного з параметрів частинки – ефективного діаметра  $D$  з використанням математичної моделі, а на її основі імітаційної (комп'ютерної) в порівнянні з експериментальними даними, одержаними оптичним способом (табл.2). Для порівняння результатів і їх оцінки обчислене середнє квадратичне відхилення  $\sigma$ .

Таблиця 2 – Значення ефективного діаметру за розрахунками і експериментом

Номер експерименту	Діаметр частинки, $D$ , мкм, (експериментальні)				Округлений діаметр частинки, $D$ , мкм	Середнє квадратичне відхилення, $\sigma$
	1	2	3	4		
1	4,95	4,90	5,00	4,95	5	0,071
2	9,95	9,90	9,85	9,90	10	0,015
3	14,90	14,95	15,00	15,00	15	0,00417
4	19,95	19,95	20,00	19,90	20	0,04225
5	24,90	24,95	24,95	25,00	25	0,005
6	29,90	29,90	29,95	29,90	30	0,01083
7	34,85	34,90	34,95	34,95	35	0,0125
8	39,95	39,90	39,85	40,00	40	0,00867
9	44,90	44,95	45,00	45,00	45	0,004157
10	49,80	49,85	50,00	49,90	50	0,0242

Отримані результати наочно свідчать, що відхилення середньоквадратичного значення ефективного діаметру частинки, яке отримано внаслідок експериментальних досліджень, і при чотирьох повторностях, не перевищує 5-7%. Що знаходиться в межах припустимої похибки вимірювань.

При цьому середньоквадратичне відхилення в двох-трьох випадках становить 0,01-0,02, а решта мають менші значення. Це свідчить, про їх незначний вплив значень цієї вибірки на результати експериментальних даних.

**Обговорення результатів.** Підвищення ефективності роботи систем оборотного водопостачання є важливою технічною задачею. Рівень інтенсифікації окремих складових й елементів оборотних систем водопостачання вирішує не тільки технічні, соціально – економічні, а і . соціально – екологічні питання.

Ці питання потребують обґрунтованих теоретичних та експериментальних досліджень, що передбачають розгляд трьох взаємопов'язаних між собою напрямів: очищення стічних вод; якість очищення стічних вод, обробка осадів.

Для аналізу цих напрямів необхідно мати обґрунтовані математичні моделі, які ще на стадії технологічних рішень. дозволять аналізувати і прогнозувати рівень ефективності роботи систем оборотного водопостачання.

В даній роботі наведені технічні розробки та теоретичні результати дослідження, які порівнюються з експериментальними даними.

**Висновки.** Проведено аналіз існуючих технологічних і конструктивних рішень, спрямованих на інтенсифікацію роботи систем промислового водопостачання, за рахунок

очищення стічних вод, дослідження стану водних середовищ і утилізації рідких відходів промислового виробництва;

Обґрунтовано за допомогою математичного моделювання конструктивно–технологічні параметри та характеристики водоочисного обладнання при обробці стічних вод реагентами;

Розроблено та удосконалено математичні та імітаційні моделі процесів обробки стічних вод в апаратах напірної флоатації за рахунок визначення гідромеханічних параметрів частинок домішок водних розчинів;

Досліджена імітаційна модель, що враховує умови формування й протікання процесів в роботі складових частин систем промислового водопостачання, дозволяє з використання ПЕОМ одержати чисельно – аналітичні співвідношення для визначення гідромеханічних параметрів.

Показано, що результати моделювання та експериментальних досліджень не перевищують 5-7%, що знаходиться в межах припустимої похибки вимірювань.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Василенко С.Л., Панов В.П. Стратегический водохозяйственный менеджмент в структуре централизованного водоснабжения и водоотведения. *Проблемы водоснабжения, водоотведения та гідравліки: Науково-технічний збірник*. К.: КНУБА, 2016. №27. С. 30– 38.
2. Рябчиков Б.Е. *Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования*. М.: ДеЛи принт, 2004. 328 с.
3. Мацнев А.І., Саблій Л.А. *Водовідведення на промислових підприємствах: навч. посібник*. Рівне: Українська державна академія водного господарства, 1998. 219 с.
4. Айрапетян Т.С. *Водне господарство промислових підприємств: навч. Посібник*. Харк. нац. акад.міськ. госп-ва. Харків: ХНАМГ, 2010. 280 с.
5. Орлов В.О., Литвиненко Л.Л., Орлова А.М. *Водопостачання промислових підприємств: навч. посіб.* К.: Знання, 2014. 278 с.
6. Demadis K. D., Mavredaki E., Stathoulopoulou A., Neofotistou E., Mantzaridis C. Industrial water systems: problems, challenges and solutions for the process industries. *Desalination: New Water Culture of South East European Countries-AQUA 2005: Materials of the International Conference, Athens, 21–23 October 2005*. Greece: Athens. Vol. 213 (1–3), 2007. P. 38-46.
7. Hartwick Darrell. Water Treatment In Closed Systems. *ASHRAE Journal*. 2001. P. 30–38.
8. Мешкова-Кліменко Н.А., Епоян С.М., Гомеля М.Д. та ін. *Інтенсифікація технологічних процесів комплексного очищення стічних вод від промислово-урбаністичних центрів: Монографія*. Харків: ІКХХВ ім. А.В. Думанського НАН України, ТОВ «ТО Ексклюзив», 2013. 240 с.
9. Кобылянский В. Я. *Методы и аппаратура биотестирования воды для интенсификации работы систем водоснабжения и канализации: дис. на получение ученой степени канд. техн. наук: 05.23.04 «Водоснабжение, канализация»*. Харьков: ХГТУСА, 1999. 145 с.
10. Черненко Я. Н. *Интенсификация работы городских очистных сооружений канализации путём улучшения их гидравлического режима: дис. на получение ученой степени канд. техн. наук: 05.23.04 «Водоснабжение, канализация»*. Харьков: ХГТУСА, 2001. 150 с.
11. Петросов В.А. *Теоретичне обґрунтування і розробка методів інтенсифікації роботи систем водопостачання: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук за спеціальністю 05.23.04 «Водопостачання, канализация»*. Харків: ХДТУБА, 2001. 35 с.
12. Беляев Н.Н., Козачина В.А. *Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках*. Днепр: Акцент ПП, 2014. 114 с.
13. Хомуцька Т.П. *Розвиток наукових і практичних засад енергоощадливого водопостачання із підземних джерел: дис. на здобуття наук. ступеня докт.техн. наук за спеціальністю 05.23.04 «Водопостачання, канализация»*. К.: КНУБА, 2020. 334 с.
14. Росінський В.М., Саблій Л.А. *Моделювання очищення стічних вод в аеробних та*

- аноксидних біореакторах в присутності синтетичних детергентів. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Науково-технічний збірник*. К.: КНУБА, 2016. №27. С. 302-311.
15. Эпоян С.М., Сизова Н.Д., Душкин С.С. Моделирование технологических процессов очистки питьевой воды при использовании активированного раствора коагулянта. *Науковий вісник будівництва*. Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2014. № 2(76). С. 125- 129.
  16. Сизова Н.Д., Эпоян С.М., Мовчан С.И. Использование моделирования в процессе очистки сточных вод для интенсификации работы оборотных систем водоснабжения. *Науковий вісник будівництва*. Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2014. № 2(76). С. 132-136.
  17. Беляев Н.Н., Русакова Т.И., Якубовська Т.Н. Численное моделирование в процессах массопереноса при нейтрализации сточных вод. *Науковий вісник будівництва*. Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2017. Т. 87, № 2. С. 159- 165.
  18. Поляков В.Л., Мартинов С.Ю. Математичне моделювання динаміки накопичення сполук заліза у вхідному перерізі завантаження фільтра. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Науково-технічний збірник*. К.: КНУБА, 2017. С. 272-280.
  19. Яковлев С.В., Карелин А.Я., Ласков Ю.М., Воронов Ю.В. *Очистка производственных сточных вод: учебное пособие для вузов*. М.: Стройиздат, 1995. 335 с.
  20. Запольський А. К., Мешкова-Кліменко Н.А., Астрелін І.М. та ін. *Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод*. К.: Лібра, 2000. 552 с.
  21. Яковлев С.В., Карелин А.Я., Ласков Ю.М., Воронов Ю.В. *Водоотводящие системы промышленных предприятий: Учебник для вузов*. М.: Стройиздат, 1990. 511 с.
  22. Куликов Н.И., Найманов А.Я., Омельченко Н.П., Чернышов В.Н. *Теоретические основы очистки вод: учебное пособие*. Донецк: Ноулидж, 2009. 298 с.
  23. Авторські права на твір. Свідоцтво № 58251 Оптичні способи визначення гідромеханічних параметрів частинок водних розчинів. / М.В. Морозов, С.І. Мовчан. Заявка № 58710. Від 25.11.2014 р. Дата реєстрації 23.01.2015 р.
  24. Авторські права на твір. Свідоцтво № 67544 Оптико-механічні системи визначення гідромеханічних параметрів частинок водних розчинів / С.І. Мовчан. Заявка № 68162. Від 04.07.2014 р. Дата реєстрації 02.09.2016 р.
  25. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. М.: Дрофа, 2003. 840 с.
  26. Кейс В.М. *Конвективный тепло и массообмен*. М.: Энергия, 1972. 448 с.
  27. Мовчан С.І. Дослідження гідродинаміки течії в'язкої рідини в замкнутому контурі апаратів напірної флотації. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. К.: КНУБА, 2017. №28. С. 227-235.
  28. Мовчан С. Обработка параметров частиц водных растворов при идентификации работы оборотных систем водоснабжения. *Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin-Rzeszow*, 2014. Vol. 16. № 6. P. 141-150.
  29. Эпоян С., Мовчан С., Шилин В. Исследование процесса движения частиц примесей в водных растворах. *Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin-Rzeszow*, 2016. Vol. 18. № 5. P. 91-101.
  30. Курочкин В.Е., Шарфпорец Б.П., Шарфпорец Е.Б. Обзор математических моделей, описывающих процесс транспорта примесей в потоке жидкости. *Научное приборостроение*. 2015. Т. 25, № 4. С. 36-42.

#### REFERENCES:

1. Vasilenko S.L., Panov V.P. Strategicheskij vodohozyajstvennyj menedzhment v strukture centralizovannogo vodosnabzheniya i vodootvedeniya. *Problemy` vodopostachannya, vodovidvedennya ta gidravliky`*: Naukovotexnichny`j zbirny`k. K.: KNUBA, 2016. Nr. 27. P. 30- 38.
2. Ryabchikov B.E. *Sovremennye metody podgotovki vody dlya promyshlennogo i bytovogo ispol'zovaniya*. M.: DeLi print, 2004. 328 p.
3. Macznev A.I., Sablij L.A. *Vodovidvedennya na promy`slovy`x pidpry`yemstvax: navch. Posibny`k*. Rivne: Ukrayins`ka derzhavna akademiya vodnogo gospodarstva, 1998. 219 p.
4. Ajrapetyan T.S. *Vodne gospodarstvo promy`slovy`x pidpry`yemstv: navch. Posibny`k*. Hark. nacz. akad.mis`k. gosp-va. Kharkiv: XNAMG, 2010. 280 p.
5. Orlov V.O., Ly`tvu`nenko L.L., Orlova A.M. *Vodopostachannya promy`slovy`x pidpry`yemstv: navch. posib*. K.: Znannya, 2014. 278 p.

6. Demadis K. D., Mavredaki E., Stathouloupoulou A., Neofotistou E., Mantzaridis C. Industrial water systems: problems, challenges and solutions for the process industries. *Desalination: New Water Culture of South East European Countries-AQUA 2005: Materials of the International Conference, Athens, 21–23 October 2005*. Greece: Athens. Vol. 213 (1–3), 2007. P. 38–46.
7. Hartwick Darrell. Water Treatment In Closed Systems. *ASHRAE Journal*. 2001. P. 30–38.
8. Myeshkova-Klimenko N.A., Epoyan S.M., Gomelya M.D. ta in. *Intensyfikaciya tekhnologichnyx procesiv kompleksnogo ochyshhennya stichnyx vod vid promy slovo-urbanistychnykh centriv: Monografiya* Kharkiv: IKXXV im. A.V.Dumanskogo NAN Ukrainy, TOV «TO Eksklyuzy», 2013. 240 p.
9. Kobyljanskij V. YA. Metody i apparatura biotestirovaniya vody dlya intensyfikacii raboty sistem vodosnabzheniya i kanalizacii: *dis. na polucheniya uchenoj stepeni kand. tekhn. nauk: 05.23.04 «Vodosnabzhenie, kanalizaciya»*. Kharkov: HGTUSA, 1999. 145 p.
10. CHernenko YA. N. Intensyfikaciya raboty gorodskih ochistnyh sooruzhenij kanalizacii putyom uluchsheniya ih gidravlicheskogo rezhima: *dis. na polucheniya uchenoj stepeni kand. tekhn. nauk: 05.23.04 «Vodosnabzhenie, kanalizaciya»*. Kharkov: HGTUSA, 2001. 150 p.
11. Petrosov V.A. Teoretichne obruntuvannya i rozrobka metodiv intensyfikacii roboti sistem vodopostachannya: avtoref. *dis. na zdobuttya nauk. stupenya dokt. tekhn. nauk za special'nisty 05.23.04 «Vodopostachannya, kanalizaciya»*. Kharkiv: HDTUBA, 2001. 35 p.
12. Belyaev N.N., Kozachina V.A. *Matematicheskoe modelirovanie massoperenosa v gorizontal'nyh otstojnikah*. Dnepr: Akcent PP, 2014. 114 p.
13. Xomuteczka T.P. Rozvytok naukovykh i praktychnykh zasad energooshadlyvogo vodopostachannya iz pidzemnykh dzherel: *dy's. na zdobuttya nauk. stupenya dokt. tekhn. nauk za special'nisty 05.23.04 «Vodopostachannya, kanalizaciya»*. K.: KNUBA, 2020. 334 p.
14. Rosinskyj V.M., Sablij L.A. Modelyuvannya ochyshhennya stichnyx vod v aerobnyx ta anoksydnyx bioreaktorax v pry'sutnosti syntetychnykh detergentiv. Problemy vodopostachannya, vodovidvedennya ta gidravliky: *Naukovo-tekhnichnyj zbirnyk*. K.: KNUBA, 2016. Nr. 27. P. 302–311.
15. Epoyan S.M., Sizova N.D., Dushkin S.S. Modelirovanie tekhnologicheskikh processov ochistki pit'evoj vody pri ispol'zovanii aktivirovannogo rastvora koagulyanta. *Scientific Bulletin of Civil Engineering*. Kharkiv: KhNUBa, KhOTV ABU, 2014. Nr 2(76). P. 125–129.
16. Sizova N.D., Epoyan S.M., Movchan S.I. Ispol'zovanie modelirovaniya v processe ochistki stochnyh vod dlya intensyfikacii raboty oborotnyh sistem vodosnabzheniya. *Scientific Bulletin of Civil Engineering*. Kharkiv: KhNUBa, KhOTV ABU, 2014. Nr 2(76). P. 132–136.
17. Biliaiev M. M. Numerical modeling of the mass transfer in the wastewater neutralization. *Scientific Bulletin of Civil Engineering*. Kharkiv: KhNUBa, KhOTV ABU, 2017. Nr 2 (87). P. 159–165.
18. Polyakov V.L., Marty'nov S.Yu. Matematy'chne modelyuvannya dy'namiky` nakopy`chennya spoluk zaliza u vxidnomu pererizi zavantazhennya fil'tra. Problemy` vodopostachannya, vodovidvedennya ta gidravliky`: *Naukovo-tekhnichnyj zbirnyk*. K.: KNUBA, 2017. P. 272–280.
19. YAKovlev S.V., Karelin A.YA., Laskov YU.M., Voronov YU.V. *Ochistka proizvodstvennyh stochnyh vod: uchebnoe posobie dlya vuzov*. M.: Strojizdat, 1995. 335 p.
20. Zapol's'kyj A. K., Myeshkova-Klimenko N.A., Astrelin I.M. ta in. *Fizyko-ximichni osnovy` tekhnologiyi ochyshhennya stichnyx vod*. K.: Libra, 2000. 552 p.
21. YAKovlev S.V., Karelin A.YA., Laskov YU.M., Voronov YU.V. *Vodootvodyashchie sistemy promyshlennyh predpriyatij: Uchebnyk dlya vuzov*. M.: Strojizdat, 1990. 511 p.
22. Kulikov N.I., Najmanov A.YA., Omel'chenko N.P., CHernyshov V.N. *Teoreticheskie osnovy ochistki vod: uchebnoe posobie*. Doneck: Noulidzh, 2009. 298 p.
23. Avtors`ki prava na tvir. Svidocztvo Nr 58251 Opty`chni sposoby` vy`znachennya gidromexanichnyx parametriv chasty`nok vodnyx rozchy`niv [tekst]: /M.V. Morozov, S.I. Movchan. Zayavka Nr 58710. Vid 25.11.2014 r. Date: 23.01.2015.
24. Avtors`ki prava na tvir. Svidocztvo # 67544 Opty`ko-mexanichni sy`stemy` vy`znachennya gidromexanichnyx parametriv chasty`nok vodnyx rozchy`niv / S.I. Movchan. Zayavka Nr 68162. Vid 04.07.2014 r. Date 02.09.2016.
25. Lojcyanskij L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza*. M.: Drofa, 2003. 840 p.
26. Kejs V.M. *Konvektivnyj teplo i massoobmen*. M.: Energiya, 1972. 448 p.
27. Movchan S.I. Doslidzhennya gidrody`namiky` techiyi v'yazkoyi ridy`ny` v zamknenomu

konturi aparativ napirnoyi flotaciji. *Problemy vodopostachannya, vodovidvedennya ta gidravliky*. K: KNUBA, 2017. Nr. 28. P. 227- 235.

28. Movchan S. Obrabotka parametrov chastic vodnih rastvorov pri identifikacii raboty oborotnih sistem vodosnabzheniya. *Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture*.

Lublin-Rzeszow, 2014. Vol. 16, № 6. P. 141- 150.

29. Epoyan S., Movchan S., Shilin V. Issledovanie processa dvizheniya chastic primesej v vodnih rastvorah. *Motrol. Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin-Rzeszow*, 2016. Vol. 18. №5. P. 91-101.

**Epoyan S., Sizova N., Movchan S. SIMULATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR INTENSIFICATION RECYCLING WATER SUPPLY SYSTEMS.** This article is shown the developments for intensification recycling water supply systems. The issues of modeling the process of wastewater treatment during the intensification of the work of recycling water supply systems are considered. Mathematical model of individual elements (constituent units) in recycling water supply systems investigates the processes of wastewater treatment in galvanic production. It allows assessing the quality of wastewater treatment and dehydration of rare waste that are formed from previous industrial water supply processes. The purpose of this work is to develop mathematical and simulation models for the study of wastewater treatment processes in industrial enterprises, definition, optimal parameters that determine effective work in individual areas and throughout the technological equipment of recycling water supply systems. In the work, the methods of physical and mathematical modeling of the processes of processing, purification and disinfection of wastewater from heavy metals in industrial water supply systems, optical methods of laser interferometry, numerical and analytical methods for optimizing the main parameters of the work of water treatment equipment. Intensification of recycling water supply systems using simulation modeling is taken and the logical-simulation filling is taken into account to determine the optimization modes and parameters of wastewater treatment. The quality of their treatment and dehydration of sludge that are formed from the previous processes during wastewater treatment is shown. The developed simulation model determines the hydrodynamic characteristics of wastewater in three interrelated areas of research: wastewater treatment, determination of the quality of wastewater treatment and sludge dehydration due to the previous processes. The simulation model is based on a logical-simulation content, which uses the constructed mathematical model and algorithms for the operation mode of a technological object and takes into account the conditions for the formation and course of processes in the operation of both components of industrial water supply systems and the entire recycling water supply system. The use of modern information technologies and computational tools allows obtaining numerical and analytical relationships for determining hydromechanical parameters in recycling water supply systems.

**Keywords:** recycling water supply, intensification, wastewater, physical modeling, mathematical modeling, wastewater treatment, rare waste treatment.

doi.org/10.29295/2311-7257-2018-101-3-212-221

УДК 621.31, 628.12, 330.13

**Епоян С.М.<sup>1</sup>, Славута О.І.<sup>2</sup>, Жук В.М.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Харківський національний університет будівництва та архітектури

(вул. Сумська, 40, Харків, 61002, Україна, e-mail: [vkgnuca@ukr.net](mailto:vkgnuca@ukr.net), [orcid.org/0000-0003-4551-1309](https://orcid.org/0000-0003-4551-1309))

<sup>2</sup>Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова

(вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002, e-mail: [boderad@ukr.net](mailto:boderad@ukr.net), [orcid.org/0000-0002-3597-9816](https://orcid.org/0000-0002-3597-9816))

<sup>3</sup>Державне агентство водних ресурсів України

(вул. Вел. Васильківська, 8, Київ, 01004, e-mail: [hark.to@davr.gov.ua](mailto:hark.to@davr.gov.ua), [orcid.org/0000-0003-3132-9661](https://orcid.org/0000-0003-3132-9661))

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ВОДОГОСПОДАРСЬКИХ СИСТЕМ ПО ПРОВЕДЕННЮ ВОДООБМІНУ КРАСНОПАВЛІВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА**

Краснопавлівське водосховище є складовою частиною водогосподарської системи Східної України та призначене для господарсько-питного водозабезпечення Харкова та населених пунктів Харківщини, а також підтримання водності річки Сіверський Донець. Водосховище має сезонний вид регулювання стоку, та служить для забезпечення безперебійної роботи каналу в разі аварії, а також як резервуар прісної води для водопостачання населених пунктів. Робота передбачає розроблення заходів щодо оптимізації затрат на проведення водообміну у Краснопавлівському водосховищі. Економічне обґрунтування функціонування