

УДК 621.3

Б.В. Приходченко, В.П. Тарасюк

Донецький національний технічний університет, м. Донецьк

Кафедра електронної техніки

E-mail: Bob_21@list.ru**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АЕРОТЕНКУ КОРИДОРНОГО ТИПУ, ЩО ПРАЦЮЄ В УМОВАХ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ БІОЛОГІЧНОГО ЕТАПУ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД****Анотація**

Приходченко Б.В., Тарасюк В.П. Математична модель аеротенку коридорного типу, що працює в умовах проведення технологічного процесу біологічного етапу очищення стічних вод. У роботі наведено результати побудови математичної моделі технологічного процесу біологічного етапу очищення стічних вод включно до етапу біохімічних перетворень, що відбуваються у аеротенку. Був детально розглянутий математичний апарат для визначення гідродинамічної структури потоків у аеротенках коридорного типу. Були визначені основні елементи структурної схеми комп'ютерної інформаційно-вимірювальної системи.

Ключові слова: аеротенк, технологічний процес, математична модель, гідродинамічна структура потоків, очищення стічних вод.

Вступ. На сьогоднішній день більше 80% очисних споруд в Україні не працюють або не забезпечують необхідну якість очищення через недостатню надійність при тривалій експлуатації аераційного обладнання. Це призводить до погіршення та повного припинення процесу біологічної очистки в холодну пору року, швидкої загибелі активного мулу при наявних проблемах у подачі електроенергії та роботі в аварійному стані.

Обмежені можливості бюджетного фінансування не дозволяють у повному обсязі нормалізувати роботу систем водовідведення шляхом будівництва ефективних споруд для очищення стічних вод. У той самий час удосконалення вже існуючих споруд за рахунок впровадження комп'ютерних, інформаційно-вимірювальних та автоматизованих систем управління технологічним процесом біологічного етапу очищення стічних вод може істотно поліпшити якість очищення стічних вод, знизити витрати електроенергії та оптимізувати кількість активного мулу, що приймає участь у процесі очищення.

Постановка проблеми. Управління технологічним процесом біологічного етапу очищення стічних вод в аеротенках здійснюється в умовах інформаційної невизначеності, пов'язаної зі складністю протікання біохімічного процесу очищення стічних вод [1]. За даних обставин застосування традиційних методів управління не є достатньо ефективним.

Для відображення механізму роботи об'єкту досліджень, побудови алгоритму керування технологічним процесом, необхідно розробити математичну модель об'єкту досліджень, яка дасть можливість визначити найкращі засоби управління при заданих цілях та прогнозування наслідків управління об'єктом. У цій роботі буде розглянуто удосконалення математичної моделі аеротенку коридорного типу до етапу біохімічних перетворень, що відбуваються у ньому.

Аналіз існуючих досліджень. Аналіз робіт [2-3] показує, що для підтримки заданого експлуатаційного режиму комп'ютерна інформаційно-вимірювальна система повинна мати в своєму складі досить складний механізм прийняття рішень, що робиться можливим лише з використанням стратегічного підходу до подолання локальних невизначеностей та обмежень в завданні управління технологічним процесом. В даний момент на об'єкті досліджень - ко-

мунальному підприємстві «Донецькміськводоканал» всі аеротенки, що працюють побудовані за типовим проектом ТП 902-2-178. До основних його недоліків можна віднести: відсутній оперативний контроль ключового параметру, що характеризує ступінь забрудненості стічних вод на вході в аеротенк; немає постійного контролю за приростом активного мулу; відсутність оперативного реагування при зміні обсягу поступаючих стічних вод та ступеня їхньої забрудненості. Існуюча нині модель не враховує зазначених вище параметрів та не відповідає вимогам оперативного контролю, які ставляться до сучасних автоматизованих систем.

Основна частина. Об'єктом досліджень є аеротенк коридорного типу, що використовується для очищення стічних вод на комунальному підприємстві «Донецькміськводоканал».

Для більшої наглядності на рис. 1 наведено технологічну схему роботи аеротенку коридорного типу з позначеними на ній контрольно-вимірювальними пристроями, що використовуються у технологічному процесі біологічного етапу очищення стічних вод.

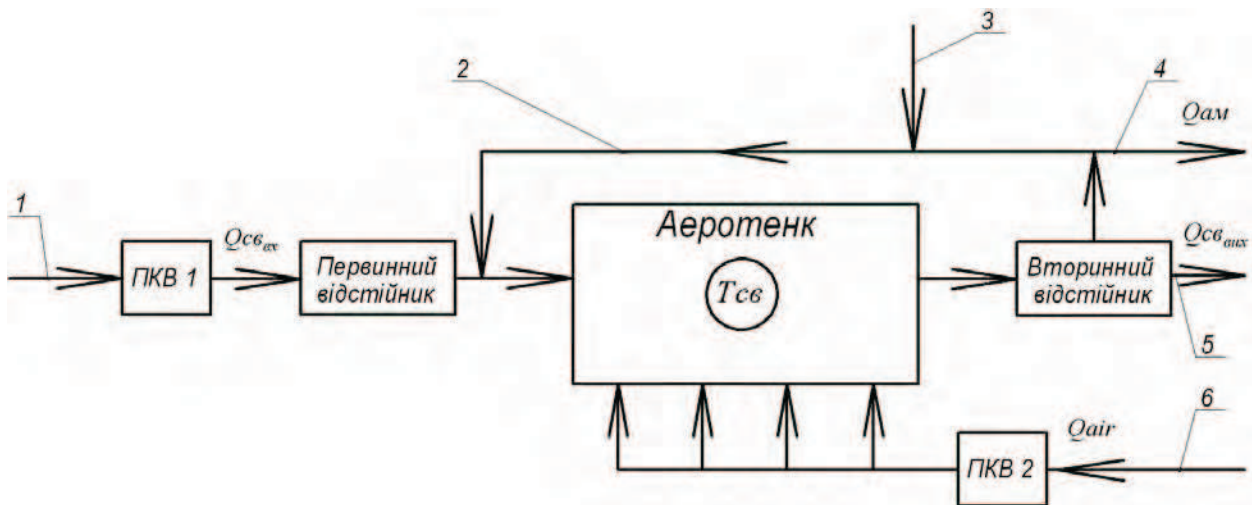


Рисунок 1 - Технологічна схема роботи аеротенку з позначеними на ній контрольно-вимірювальними пристроями.

На рисунку 1 позначено: 1 - трубопровід подачі стічних вод; 2 - трубопровід подачі активного мулу для повторного використання; 3 - трубопровід подачі активного мулу для використання у перший раз; 4 - трубопровід відведення відпрацьованого мулу; 5 - трубопровід відведення очищеної стічної води; 6 - трубопровід подачі повітря для аерації; ПКВ 1 - прилад для контролю витрати стічних вод; t води - прилад для виміру температури стічних вод; ПКВ 2 - прилад для контролю витрати повітря для процесу аерації стічних вод.

Для створення математичної моделі процесу біологічного етапу очищення стічних вод необхідно визначити гідродинамічну структуру потоків у спорудах станції. У промислових аеротенках коридорного типу з розосередженої подачею води по довжині коридору гідродинаміка потоків суспензії займає проміжне положення між ідеальним витісненням і повним змішанням. У роботі [4] розглядалася гідродинамічна структура потоків у вигляді сукупності секції повного змішання з байпасуючими і рециркуляційними потоками.

Один із методів визначення гідродинамічної структури потоків - проведення трасерного експерименту. У серпні 2010 року на комунальному підприємстві «Донецькміськводоканал» були проведені трасерні експерименти радіоактивним індикатором йод-131 для ряду промислових аеротенків. За характером нормованих функцій щільності розподілу часу перебування для окислювальних коридорів аеротенків можна висунути дві альтернативні гіпотези - гідродинаміка потоків описується:

1. Секційною моделлю без зворотних та байпасуючих потоків;
2. Секційною моделлю з прямими байпасуючими потоками та зворотними рециркуляційними потоками.

Одним із способів їх перевірки є спосіб, що полягає в наступному:

- проведення трасерного експерименту або у наявному аеротенку, або в аеротенку з аналогічними конструктивними розмірами і системою аерації, витратою суспензії, близьким до витрати стічних вод за проектом;

- порівняння кривих вимивання трасерної речовини з теоретичними кривими для кожної гіпотези і прийняття тієї з них, для якої сума квадратів відхилень розрахункових значень концентрації трасерної речовини від реально виміряних має мінімальне значення.

Для перевірки першої гіпотези експериментальна крива функції вимивання трасерної речовини для i -го коридору аеротенках порівнюється з теоретичною, апроксимованою функцією Ерланга [5]:

$$c_i(t, m_i) = \frac{M_i}{V_i} \frac{m_i}{(m_i - 1)!} \left(\frac{t}{\bar{t}_i} \right)^{m_i - 1} \exp \left(-m_i \frac{t}{\bar{t}_i} \right), i = \overline{1, K}, \quad (1)$$

де $c_i(t, m_i)$ - концентрація трасерної речовини на виході i -го коридору, мг/л; M_i - маса трасерної речовини, що подається миттєво у вигляді δ імпульсу в початок i -го коридору, мг; V_i - об'єм i -го коридору, л; m_i - кількість секцій повного змішування для i -го коридору; \bar{t}_i - середній час перебування рідини в i -му коридорі $\bar{t}_i = V_i/Q$, діб; Q - витрата стічних вод л/доб; K - число коридорів в аеротенку.

Визначення оптимального m_i для i -го коридору здійснимо на основі рішення задачі параметричної оптимізації:

$$\varphi_i = \arg \min \left\{ \sum_{r=1}^{N_i} \left(c_{i,r}^T(t_r, m_i) - c_{i,r}^E \Big|_{Q=Q_i} \right)^2 \right\}, i = \overline{1, K}, \quad (2)$$

де $c_{i,r}^T(t_r, m_i)$ - теоретичні значення $c_i(t, m_i)$ у момент часу t_r , мг/л; $c_{i,r}^E \Big|_{Q=Q_i}$ - значення концентрації трасерної речовини на виході з i -го коридору, отримані в ході трасерного експерименту при витраті стічних вод Q_i , мг/л; N_i - кількість тимчасових точок від моменту запуску трасера.

При перевірці другої гіпотези використано наступний алгоритм. Для i -го коридору аеротенку запишемо систему рівнянь матеріального балансу:

$$\frac{dc_{i,j}}{dt} = \frac{m_i}{V_i} \left[R_{i,j-1} c_{i,j-1} + R_{i,j-(2+n_{\beta_i})} c_{i,j-(1+n_{\beta_i})} \beta_i + R_{i,j+(1+n_{\alpha_i})} c_{i,j-(1+n_{\alpha_i})} \alpha_i - (R_{i,j-1} \alpha_i + R_{i,j} + R_{i,j-1} \beta_i) c_{i,j} \right];$$

$$\alpha_i = \frac{R_{i,l}^\alpha}{R_{i,j}}; \beta_i = \frac{R_{i,l}^\beta}{R_{i,j}}; i = \overline{1, K}; j = \overline{1, m_i}; \quad (3)$$

$$c_{i,l}, R_{i,l}, R_{i,j}^\alpha, R_{i,j}^\beta = 0 \text{ при } l < 1, l > m_i$$

де $c_{i,j}$ - концентрація трасерної речовини в j -й секції i -го коридору, мг/л; $R_{i,j}$ - об'ємні витрати у потоках, що надходять з j -ої секції і потрапляють до $(j+1)$ -ої секції i -го коридору, л/добу; α_i - коефіцієнт міжсекційної рециркуляції потоків i -го коридору; $R_{i,j}^\alpha$ - об'ємні витрати в зворотних рециркуляційних потоках з l -ої в j -у секцію i -го коридору, л/добу; n_{α_i} - число секцій i -го коридору, охоплених потоками міжсекційної рециркуляції; β_i - коефіцієнт байпасування для i -го коридору; $R_{i,j}^\beta$ - об'ємні витрати у прямих байпасуючих потоках, що

прямують з l -ої в j -у секцію i -го коридору, л/добу; n_{β_i} - кількість секцій i -го коридору, охоплених байпасуючими потоками; l - допоміжний індекс.

Об'ємні витрати $R_{i,j}$ отримаємо з рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь

$$R_{i,j} + R_{i,j-1}(\alpha_i + \beta_i - 1) - R_{i,j-(2+n_{\beta_i})}\beta_i - R_{i,j+n_{\alpha_i}}\alpha_i = R_{i,j}^0, \quad i = \overline{1, K}, j = \overline{1, m_i}, \quad (4)$$

де $R_{i,j}$ - об'ємні витрати потоків стічних вод, що надходять до j -ї секції i -го коридору крізь систему впускних регульованих засувок, л/добу.

Початкові умови для виразу (3) були прийняті у вигляді:

$$c_{i,l} \Big|_{t=0} = \frac{M_i}{V_i} \delta(0), \quad c_{i,l} \Big|_{t=0} = 0, \quad l = \overline{2, m_i}, \quad i = \overline{1, K}. \quad (5)$$

Інтегрування системи (3) та (4) при певних значеннях $m_i, n_{\beta_i}, n_{\alpha_i}, \alpha_i, \beta_i$ здійснимо за методом Рунге-Кутта. Теоретичну криву вимивання трасерної речовини наведемо у вигляді

$$c_i(t, m_i) = c_{i, m_i}(t, m_i), \quad t \geq 0, \quad i = \overline{1, K}.$$

Оптимальні значення $m_i, n_{\beta_i}, n_{\alpha_i}, \alpha_i, \beta_i$ для i -го коридору знайдемо в результаті мінімізації критерію (1), доповнюючи його обмеженнями, отриманими, виходячи з умов фізичної реалізації процесів в аеротенку:

$$0 \leq \beta_i \leq 1; \quad 0 \leq \alpha_i \leq 1; \quad m_i > 1; \quad 1 \leq n_{\beta_i} \leq (m_i - 2); \quad 1 \leq n_{\alpha_i} \leq (m_i - 2).$$

Специфіка даної задачі полягає в тому, що $m_i, n_{\beta_i}, n_{\alpha_i}$ - цілі, а α_i, β_i - дійсні числа. Для її рішення скористаємося модифікованим комплекс-методом.

Трасерний експеримент проводився не для кожного коридору окремо - запуск трасерної речовини здійснювався у початок першого коридору, а фіксація його результатів проводиться в кінці 1-го, 2-го і так далі коридорів. Для такого випадку оптимальні значення параметрів теоретичних кривих вимивання знайдемо в результаті рішення задачі:

$$\varphi_{i \rightarrow i+1} = \arg \min \left\{ \sum_{r=1}^{N_{i \rightarrow i+1}} \left[\psi \left(c_{i,r}^T(t_r, m_i) - c_{i,r}^E \Big|_{Q=Q_1} \right)^2 + (1-\psi) \left(c_{i \rightarrow i+1, r}^T(t, m_i, m_{i+1}) - c_{i \rightarrow i+1, r}^E \Big|_{Q=Q_1} \right)^2 \right] \right\},$$

де ψ - ваговий коефіцієнт.

На та Рис.2 наведено теоретичні криві вимивання трасерної речовини. При побудові залежностей кривих вимивання були використані результати роботи [5].

Відомо, що при зміні витрати змінюється характер розподілу часу перебування рідини в аеротенку [6]. Тому, якщо б трасерний експеримент проводився при витраті стічних вод, що відрізняється від витрати стічних вод за проектом, а також у разі зміни витрати при проведенні реконструкції діючих станцій біологічного очищення, необхідна була б корекція.

З цією метою здійснимо перерахунок експериментальних кривих вимивання трасерної речовини при новому значенні витрати, використовуючи наступне співвідношення [7]

$$c_{i,r}^E \Big|_{Q=Q_2} \left(\frac{Q_1 t}{Q_2} \right) = c_{i,r}^E \Big|_{Q=Q_1} (t) \frac{Q_2}{Q_1}, \quad i = \overline{1, K}, \quad r = \overline{1, N_i}.$$

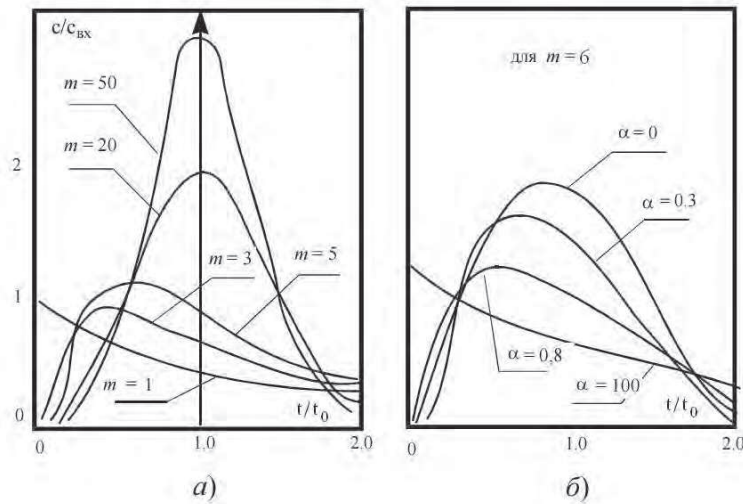


Рисунок 2 - Теоретичні криві вимивання трасерної речовини для розглянутих гіпотез

На рисунку позначено: m - кількість секції, α - коефіцієнт міжсекційної рециркуляції гідродинамічної структури потоків в аеротенку при новому значенні витрати Q_2 .

Ефективність роботи коридорних аеротенків можна підвищити шляхом розділення об'єму коридору на секції. У аеротенку такої конструкції відбувається повне змішування рідини в кожній камері. Як правило, коридор поділяється на 6-8 секцій. У нашому випадку – це 6 секцій. Коефіцієнт міжсекційної рециркуляції показує наскільки близьким є даний процес до повного змішання.

Перевірка гіпотез щодо гідродинамічної структури потоків в аеротенку дала наступні результати:

- для першої гіпотези не було знайдено жодної кількості секцій для кожного коридору, за якої значення середньої квадратичної відносної похибки було б меншим за 27% ;
- для другої гіпотези були отримані наступні значення $n_\beta, n_\alpha, \beta, \alpha$, що наведені на Рис. 3. Значення середньої квадратичної відносної похибки становило 13%.

У результаті приходимо до висновку, що гідродинамічна структура потоків в аеротенку може бути описана секційною моделлю з прямими байпасуючими та зворотніми рециркуляційними потоками.

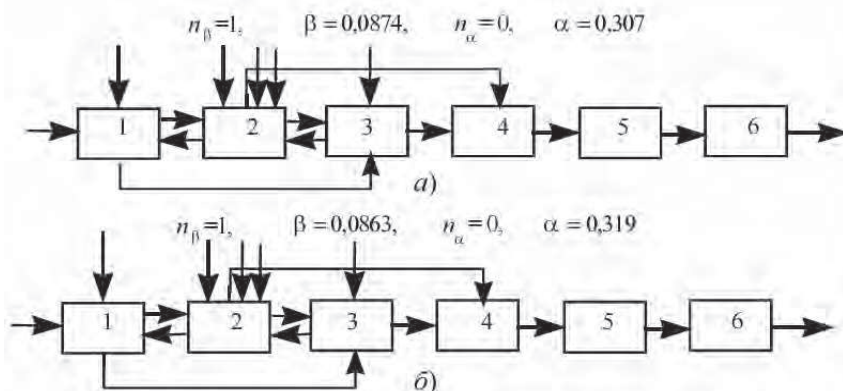


Рисунок 3 - Гідродинамічна структура потоків у аеротенку за умов різних показників витрати стічних вод

Нормовані функції щільності розподілу часу за умов різних показників витрати стічних вод наведено на Рис. 4. З цих графіків можна зробити висновок, що експериментальні та теоретичні дані співпадають, значення похибки не перевищує 13%. Це підтверджує адекватність моделі.

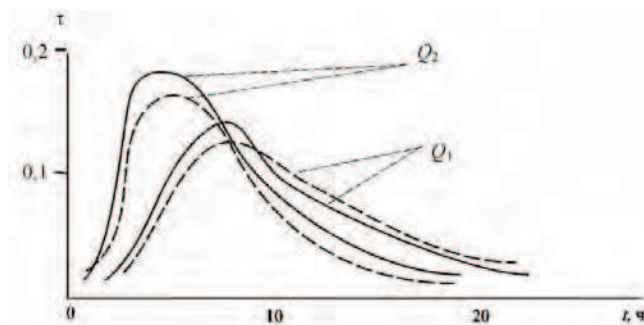


Рисунок 4 - Графіки нормованих функцій щільності розподілу часу: суцільна лінія - експериментальні дані, а пунктирна - теоретичні

Структурна схема комп'ютерної інформаційно-вимірювальної системи, що розроблюється з вказаними на ній параметрами має наступний вигляд.

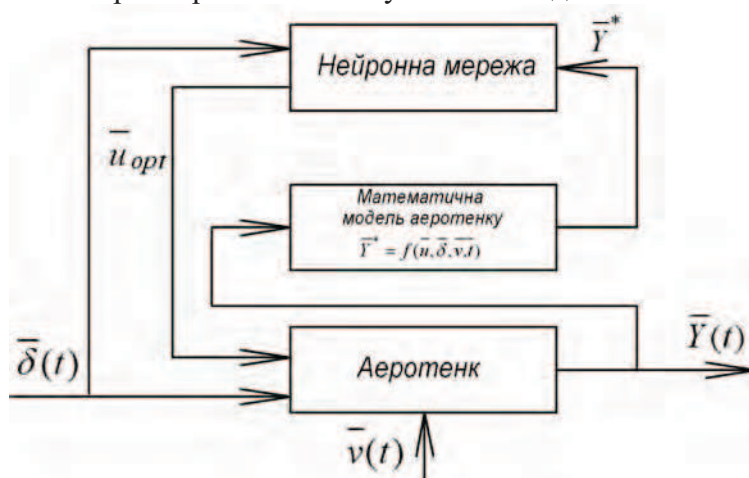


Рисунок 5 - Структурна схема комп'ютерної інформаційно-вимірювальної системи

Де $\bar{\delta}(t)$ - вимірювані параметри системи, а саме:

- витрата стічних вод на вході в аеротенк $Q_{св_{вх}}$; - ступінь забруднення стічних вод на вході в аеротенк $БПК_{вх}$; - температура стічних вод на вході в аеротенк $T_{св_{вх}}$; - концентрація кисню у суміші C_{O_2} ; - рівень рН стічних вод $PH_{св}$;

$\bar{v}(t)$ - зовнішні фактори, що мають вплив на роботу системи, а саме:

- температура навколишнього середовища T ; - результати математичного моделювання технологічного процесу \bar{Y}^* ;

\bar{u}_{opt} - управляючі сигнали, що подаються після обробки параметрів технологічного процесу нейронною мережею для оптимального проведення технологічного процесу, а саме:

- відкрити-закрити засувки для подачі та відведення стічних вод;
- відкрити-закрити засувки для подачі та відведення активного мулу;
- увімкнути-вимкнути насоси для подачі повітря;

$\bar{Y}(t)$ - вихідні результуючі показники проведення технологічного процесу, а саме:

- витрата стічних вод на виході з аеротенку $Q_{св_{вих}}$; - ступінь забруднення стічних вод на виході з аеротенку $БПК_{вих}$; - витрата активного мулу $Q_{ам}$; - витрата повітря Q_{air} ; - температура стічних вод на виході з аеротенку $T_{св_{вих}}$; - час проведення технологічного процесу $t_{проц}$; t - час.

Висновки. 1. В результаті проведених досліджень було визначено, що гідродинамічна структура потоків в аеротенку може бути описана секційною моделлю з прямими байпасую-

чими потоками та зворотними рециркуляційними потоками. З наведених графіків можна зробити висновок, що експериментальні та теоритичні дані співпадають, значення похибки не перевищує 13%. Це підтверджує адекватність моделі.

2. Визначена модель дала підстави для формування структури комп'ютерної інформаційно-вимірювальної системи, яка буде враховувати усі фактори та показники, що мають вплив на проведення даного технологічного процесу, що дозволяє за рахунок здійснення оперативного контролю та прийняття своєчасних управляючих рішень усунути недоліки існуючих систем.

Література

1. Комиссаров Ю.А. Анализ и синтез систем водообеспечения химических производств / Ю.А. Комиссаров, Л.С. Гордеев, Нгуен Суан Нгуен. - М.: Химия, 2002. - 496 с.
2. В.В.Солдатов. Управление проектами автоматизации предприятий / В.В.Солдатов. - М.:Научтехлитиздат, 2008. - №4. - С.1-3.
3. Лапицкая М.П. Очистка сточных вод / М.П. Лапицкая. - Минск: Высшая школа, 1983. - С. 132-145.
4. Кафаров В.В. Моделирование и системный анализ биохимических производств / В.В. Кафаров, А.Ю. Винаров, Л.С. Гордеев. - М.: Лесная промышленность, 1985. - 280 с.
5. Zvirin Y., Shinnar R. Interpretation of Internal Tracer Experiments and Local Sojourn Time Distributions // Int J of Multiphase Flow. 1976. V 2. N 5/6. P 495-520.
6. Яковлев С.В. Биологическая очистка производственных сточных вод: Процессы, аппараты и сооружения / С.В. Яковлев, И.В. Скирдов, В.Н. Шевцов. - М.: Стройиздат, 1985. - 208 с.
7. Бодров В.И. Определение гидродинамической структуры водных объектов в нестационарных условиях / В.И. Бодров, Н.С. Попов, А.А. Арзамасцев. // Химия и технология воды. - 1984. - Т. 6. - № 5. - С. 394-398.

Надійшла до редакції:
01.03.2011

Рекомендовано до друку:
д-р техн. наук, проф. Зорі А.А.

Abstract

Prihodchenko B.V., Tarasyuk V.P. Mathematical model of aerotank the corridor type working in the conditions of course of technological process of a biological stage of sewage treatment. In this work there are results of development mathematical model of technological process of a biological stage of sewage treatment are resulted up to a stage of the biochemical transformations occurring in aerotank. The mathematical instrument for definition of hydrodynamic structure of streams in aerotanks corridor type has been in details considered here. The basic elements of flow diagram of the computer informative-measuring system are certain.

Keywords: aerotank, technological process, mathematical model, hydrodynamic structure of streams, sewage treatment.

Аннотация

Приходченко Б.В., Тарасюк В.П. Математическая модель аэротенка коридорного типа, работающего в условиях протекания технологического процесса биологического этапа очистки сточных вод. В работе приведены результаты построения математической модели технологического процесса биологического этапа очистки сточных вод вплоть до этапа биохимических превращений, происходящих в аэротенке, детально рассмотрен математический аппарат для определения гидродинамической структуры потоков в аэротенках коридорного типа. Были определены основные элементы структурной схемы компьютерной информационно-измерительной системы.

Ключевые слова: аэротенк, технологический процесс, математическая модель, гидродинамическая структура потоков, очистка сточных вод.

© Приходченко Б.В., Тарасюк В.П., 2011