

В.М. СІВАК, кандидат технічних наук

Л.А. ШИНКАРУК, кандидат технічних наук

М.І. ПИЛИПЕЙ, аспірант

Національний університет водного господарства та природокористування

м. Рівне

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ ОЧИСНИХ СПОРУД

Розглянуті теоретичні основи та практичний досвід щодо особливостей використання функцій відгуку при конструктивно-технологічному удосконаленні очисних споруд. Запропонована степенево-експоненціальна функція для апроксимації та інтерпретації кривих розподілу часу перебування води в спорудах. Представлено експериментальні дослідження відстійників та аеротенків.

Ключові слова: аеротенк, відстійник, функція відгуку, математична модель, інтерпретація, індикаторні дослідження.

Рассмотрены теоретические основы и практический опыт относительно особенностей использования функций отклика при конструктивно-технологическом совершенствовании очистных сооружений. Предложена степенно-экспоненциальная функция для апроксимации и интерпретации кривых распределения времени пребывания воды в сооружениях. Представлены экспериментальные исследования отстойников и аэротенков.

Ключевые слова: аэротенк, отстойник, функция отклика, математическая модель, интерпретация, индикаторные исследования.

The theoretical bases and practical experience concerning the features of the use of response functions at the structural and technological improvement of the treatment facilities are considered. The exponential-exponential function is proposed for approximation and interpretation of the distribution curves of the water residence time in buildings. Experimental studies of sedimentation and aerotanks are presented.

Key words: aerotank, reservoir, response function, mathematical model, interpretation, indicator research.

Постановка проблеми. Найважливішою характеристикою функціонування очисних споруд (ОС) для очищення природних стічних вод є ступінь повноти завершеності процесу в даній споруді (аеротенк, відстійник, флотатор, метантенк і т.п.) .

Процесам технології водоочищення властива детерміново-стохастична природа, яка складається із детермінованої та стохастичної складової

[1,с.24]. Детермінована складова визначається за фундаментальними законами гідравліки, фізичної хімії, ферментативної кінетики, мікробіології тощо.

В основному методологія та методика розрахунків ОС побудована на концепції детермінованої складової процесу водоочищення [2,4]. Стохастична складова в ДБН [2, с.43] і в класичних курсах водоочищення зазвичай не розглядається.

Детермінована складова дає можливість строго теоретично визначити швидкість здійснення того або іншого процесу, а отже і кінетичний час t_k , який необхідний для досягнення кінцевого стану або завершеності процесу. Однак, як показує практика водоочищення у виробничих умовах, дійсний час завершеності процесу t_d може не відповідати часу t_k , який отриманий на основі кінетичних законів, оскільки t_d залежить від характеру розподілу потоків в ОС, від їх структури, яка безпосередньо зв'язана з конструкцією споруди, зовнішнім підведенням енергії, наявністю в споруді перегородок різної структури потоків окремих фаз в багатофазних потоках і т.п. Звідси очевидно, що розрахунок очисних споруд зводиться до визначення та порівняння t_k , і t_d . При цьому завжди повинно виконуватися співвідношення $t_d \geq t_k$.

Якщо не враховується стохастична складова при дослідженні ОС, то безпосереднє перенесення результатів лабораторних досліджень на реальні об'єкти є неможливим.

Одним із основних питань, що виникають при розв'язку практичних задач щодо очищення стічних вод, є питання про необхідну точність математичного опису очисних споруд. Від правильності обґрунтування цих вимог залежить трудомісткість моделювання та адекватність отриманих результатів. Однаково часто зустрічаються як випадки неприпустимо грубого наближеного моделювання (іноді вимушеного, іноді невиправданого), так і випадки невиправданого завищення точності, надмірна, необґрунтована деталізація математичного опису, яка не узгоджена ні з точністю вихідних даних, ні з вимогами щодо точності кінцевого результату.

Задачі конструювання аеротенків, вторинних відстійників і фільтрів вимагають знання їх гідравлічних характеристик, а також методів, що дають змогу оцінити гідравлічну ситуацію в процесі експлуатації споруди та вибрати шляхи оперативного управління ними.

Зокрема, низький коефіцієнт корисного використання об'єму великої кількості очисних споруд (ОС) (біля 0,5) приводить до того, що малопроточні зони і застійні зони є джерелами вторинного забруднення. Тому, забезпечення більш повного використання об'єму ОС дає можливість значно інтенсифікувати процес очищення.

Приведений короткий огляд існуючих підходів щодо оцінки «гідравлічної ефективності» проточних очисних споруд і запропонований метод системного підходу дає можливість обґрунтовано змінювати конструктивно-технологічні параметри аеротенків, вторинних відстійників і фільтрів з метою підвищення ефективності їх роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні 40-50 років при дослідженні систем очищення природних і стічних вод використовуються методи, що базуються на різних типах індикаторів [3-9]. Найбільше поширення знайшли штучні ізотопи, фарбуючі та флуоресцентні речовини, електроліти і т.п. Суть індикаторних досліджень полягає у тому, що в об'єм водоочисної споруди вводиться в певній кількості та в просторово-часовому режимі індикатор. Після цього в певному просторово-часовому режимі спостерігають за розподілом індикатора. На основі цього розподілення судять про властивості і параметри водоочисної споруди, а також про процеси, що відбуваються в спорудах. При проведенні таких досліджень деяка кількість індикатора в певних місцях за визначеним часовим законом вводиться в досліджувану споруду. Все це визначає (з кібернетичної точки зору) так звані умови на «Вході». Далі в визначених точках простору споруди, що досліджуються, спостерігають за проходженням індикатора або в визначений момент фіксують просторове розподілення індикатора, або і те та інше одночасно. В результаті отримують так звані вихідні індикаторні криві розподілу.

Зарубіжний та вітчизняний досвід [4,5,6,8,9] показав, що використання індикаторів дає змогу вирішувати досить широке коло проблем в області розрахунку, проектування та експлуатації водоочисних систем і споруд. Крім цього, при індикаторних дослідженнях можна отримати об'єктивну інформацію про цілу низку властивостей та характеристик досліджуваних споруд, а саме: швидкість та напрямок руху води в спорудах; **дисперсії швидкостей** в них; **часові властивості** (час перебування, час дифузії, час затримки, час фізичної або фізико-хімічної чи біологічної реакції); **фільтраційні властивості** (швидкість фільтрації, (коефіцієнт фільтрації, повна ефективна провідність); **структурні властивості** (розмір пор, розподілення їх за розмірами, а також структура пористого простору, структура входу – виходу в ОС); **дифузійні та дисперсні властивості**: (коефіцієнти молекулярної само-, баро-, і термодифузії, турбулентна дифузія); **сорбційні (обмінні) властивості** (коефіцієнт сорбції, коефіцієнт розподілення, ємність поглинання, кінетичні коефіцієнти поглинання і т. ін.); **кінетичні властивості** (константи рівноваги, кінетичні константи реакції, контакти гідравлічного перенесення).

Мета роботи. Побудова наближеної теорії інтерпретації та апроксимації даних індикаторного дослідження в очисних спорудах. При побудові такої теорії природно виникає низка питань:

- а) що відображають вихідні індикаторні (трасерні) криві;
- б) як інтерпретувати зміну (кінетику) індикаторів;
- в) яку інформацію про досліджувану споруду можна отримати;
- г) як побудувати спостереження, щоб отримана інформація була найбільш достовірною для розв'язку конкретних наукових і практичних задач.

Постановка задач та їх розв'язок. В даний час побудувати математичну модель процесів в очисних спорудах на базі повної системи диференціальних рівнянь є складною задачею, а перевести таку модель в

реальний інженерний метод практично досить складно. Тому, для моделювання очисних споруд в даній роботі був використаний апарат теорії гідравлічного моделювання, який з розвитком засобів комп'ютерної технології представляється ефективним інструментом. Термін «гідравлічне моделювання» характеризує час перебування води, що очищується, в ОС.

Оцінка гідравлічної ситуації в ОС необхідна для розв'язку наступних задач: прогнозуванню гідравлічної ситуації в ОС в процесі експлуатації; вибору шляхів оперативного управління очисними спорудами; розробці конструктивно-технологічних заходів для зменшення коливань концентрації забруднюючих речовин, що надходять в очисні споруди з водою.

Вирішення цих задач дасть можливість збільшити коефіцієнт корисного використання об'єму значної кількості очисних споруд [10] (зараз цей коефіцієнт має значення 0,5) і уникнути появи в ОС малопроточних зон і зон застоювання, які є потенційними джерелами вторинного забруднення води .

Існуючі методи гідравлічного моделювання базуються на аналізі кривих розподілу часу перебування (функції РЧП) потоку води в споруді $r(t)$, які отримані при трасуванні ОС. Деякі з них [4,5,6,8,9] основані на характеристиках форми кривої РЧП) і дають змогу отримати якісну картину гідравлічної обстановки в ОС. Числові співвідношення між характеристиками форми кривої РЧП і ступенем ламінарності, турбуленості та зон застоювання потоку води при цьому не розглядаються і не визначаються .

Для кількісної оцінки гідравлічного моделювання ОС використовують в основному два методологічні підходи. Перший підхід [3] ґрунтується на тому, що функція РЧП описується дифузійною моделлю і характеризується двома параметрами: коефіцієнтом повздовжнього перемішування води в ОС D_n і критерієм Пекле $Pe = \frac{v \cdot L}{D}$, де v – швидкість руху води в споруді, м/с; L – довжина споруди, м; D – коефіцієнт турбулентної дифузії, m^2/c). Недоліком такого підходу є те, що він не відображає істинну структуру потоку, тобто не дає кількісних характеристик елементів потоку води, а виражає в основному тенденцію потоку води до того або іншого типу (ідеальне витіснення, ідеальне змішування, проміжний тип і т.п.). Однак, такий підхід набув широкого поширення при аналізі гідродинамічної структури потоку води в очисних спорудах.

Другий підхід [8,9] передбачає, що загальний об'єм споруди складається з наступних елементів: потоку «ідеального витіснення P ; потоку ідеального змішування m і мертвого простору d . Числові значення величин p , m , і d . визначаються графічним або графо-аналітичним методом на основі функції РЧП.

Методи кількісної оцінки гідравлічного моделювання передбачають, що функція РЧП є унімоїдальною і може бути описана однопараметричною моделлю (дифузійною або комірковою). Однак, у функції РЧП може з'явитися (і це підтверджено багатьма експериментами) декілька максимальних точок і довгий «шлейф». Наявність цих максимумів свідчить про те, що в реальних

потоках можуть виникнути такі явища, як: байпасування, рециркуляція, застійні зони тощо. Шлейф відображає той факт, що величина середнього часу перебування води в споруді, яка розрахована на основі функції РЧП, виявляється суттєво більшою від теоретичного значення перебування води в споруді (де V – об'єм споруди, m^3 ; Q – витрати води в $m^3/год.$)

Звідси можна зробити висновок, що для математичного опису реальних потоків води в ОС необхідно використовувати такі параметричні моделі, які більш точно враховували б особливості структури потоку в ОС.

Нами зроблена спроба оцінити процес руху води в очисних спорудах, використовуючи таку робочу гіпотезу .

На виході води із ОС з'являються елементи потоку, що мають більшу швидкість, а потім з'являються елементи з меншою швидкістю.

Індикаторна інформація разом із фізичною, фізико-хімічною та біохімічною повинна оброблятися та інтерпретуватися з використанням апарату та моделей, адекватних досліджуваних очисних споруд і процесів, що відповідають їхній динамічній та структурній складності. При цьому природнім є намагання уникнути побудови безмежної різноманітності спеціальних і невиправдано складних та громіздких математичних моделей, за якими втрачається предметність і сутність процесу, що вивчається. Уникнути цього допоможе системний підхід, якщо він реалізується на базі загальної теорії систем [10-12].

Поведінку досліджуваних водоочисних споруд описують за допомогою деякого набору змінних (функцій) стану [11,12]. Вважається, що поведінка споруди вивчена, якщо знайдені всі можливі стани споруд, які визначаються внутрішніми властивостями споруди та дією зовнішнього оточення [10-12]. Питання вибору вхідних, вихідних змінних та змінних стану визначаються специфічними особливостями водоочисної споруди, а також метою, методами її вивчення. Вдалий вибір цих величин суттєво спрощує постановку та розв'язок практичних задач.

Отже, на вхід споруди надходить збурення $X(C,g)$, яке викликає на виході реакцію $Y(C,g)$, що визначається законом (оператором) L [1]:

$$Y = L \cdot X, \quad (1)$$

де C , g – відповідно, концентрація індикатора (трасера) та витрата води на вході споруди, що досліджується, мг/л.

При повздовжньому змішуванні тривалість перебування окремих часток води може значно відрізнятись від середньої величини t . Знання істинного закону розподілу часу перебування часток води в реакційній зоні біоокислювача має велике значення для вибору його оптимальних розмірів і правильного технологічного режиму експлуатації.

Найбільш загальне уявлення щодо механізму повздовжнього змішування відображає дифузійна модель [1,7]. Згідно дифузійної моделі єдиним параметром, що визначає характер кривої $C(B)$, є безрозмірний

комплекс $Pe = \frac{v \cdot L}{D}$ (число Пекле).

В зв'язку з тим, що теоретична функція $C(B)$ є дуже складною, вона була отримана лише для обмеженого відрізка L у вигляді збіжного ряду. Із цієї залежності складно визначити коефіцієнт повздовжнього турбулентного змішування D у вигляді явної функції $C(B)$ і отримати критерії гомохроності ($H = \frac{vt}{L}$ де v – швидкість руху води в споруді м/с; t – тривалість перебування води в споруді, с; L – довжина споруди, м).

Повздовжня дифузія індикатора (фарбника), який імпульсно вводиться в точці x_0 в потік води, яка рухається в споруді з постійною швидкістю v , може бути описана таким диференціальним рівнянням [14]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + v \frac{\partial c}{\partial x} - D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = C_0 \delta(t) \delta(x_0 - x) \cdot L \quad (2)$$

за таких граничних умов $C = 0, t = 0, 0 \leq x < \infty$;

$$v C - D \frac{\partial c}{\partial x} = 0, t > 0, x = 0 \quad (3)$$

$$C = 0, t > 0, x \rightarrow \infty.$$

В рівняннях (2) і (3), C – концентрація індикатора (барвника), мгл; $\delta(t)\delta(x_0 - x)$ функція Дірака; $C_0 = \frac{Q}{V}$; Q – витрати барвника (м³/с), який вводиться в споруду в точці $x = x_0$; V – об'єм споруди від точки $x = x_0$ до точки $x = L$.

Розв'язок рівняння (2) при $x_0 = 0, x = L$, яке задовольняє граничним умовам (3), представляє собою функцію розподілу часу перебування частинок води на відрізку довжиною L – $C(B)$.

Для визначення цієї функції був використаний операційний метод перетворення рівняння (2) за Лапласом з урахуванням граничних умов (3).

$$\bar{C}(B) = L \left[\frac{v}{2} + \sqrt{pD + \frac{v^2}{4}} \cdot \exp\left(\frac{vx}{2D} - \sqrt{\frac{px^2}{D} + \frac{v \cdot x^2}{4 \cdot D^2}}\right) \right]. \quad (4)$$

Оригінал зображення (4) дорівнює:

$$\bar{C}(B) = \sqrt{\frac{B}{\pi \cdot H}} \exp\left(\frac{B}{2} - \frac{BH_1}{4} - \frac{B}{4 \cdot H}\right) - \frac{B}{2} \cdot \operatorname{erfc} \frac{\sqrt{B}}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{H}} + \sqrt{H}\right) \cdot e^B, \quad (5)$$

де $\operatorname{erfc}Z = 1 - \operatorname{erf}z = 1 - \Phi(z/\sqrt{2})\phi$ – інтеграл імовірності, чисельні значення якого беруться з таблиці [14].

Зазвичай, обробка результатів індикаторних (трасерних) досліджень і їх інтерпретація здійснюється на базі формальної фізико-математичної моделі, узагальнений вид якої в самому загальному виді представлено в співвідношенні (1). При цьому прямою задачею інтерпретації індикаторних (трасерних) даних є пошук реакції Y зміни індикатора на всі види збурення X , якщо оператор L є відомим. Обернена задача зводиться до знаходження оператора перетворення L за даними спостережень, Y і X за даними спостережень R , якщо відомий оператор L .

Другий підхід зв'язаний з пошуками апроксимаційних функцій. Так, зв'язок між розподілом концентрації індикатора і числом комірок m визначається на основі апроксимації функції Ерланга. Наприклад, для аеротенків вона може бути представлена в такій формі [3].

$$C_i(t, m_i) = \frac{M_i}{V_i} \frac{m_i}{(m_i - 1)!} \left(\frac{t}{\bar{t}_i} \right)^{m_i - 1} \exp \left[-m_i \frac{t}{\bar{t}_i} \right], \text{ при } i = \overline{1, k} \quad (6)$$

де $C_i(t, m_i)$ – концентрація трасера на виході із i -го коридору споруди, мг/дм³; M_i – маса трасера, що миттєво вводиться на початку i -го коридору аеротенку, мг; V_i – об'єм i -го коридору аеротенку, л; m_i – число комірок повного змішування для i -го коридору аеротенку, шт.; \bar{t}_i – середня тривалість перебування стічної води в i -му коридорі аеротенку ($\bar{t}_i = \frac{V_i}{Q}$, доба; Q – витрати стічних вод, л/добу; k – число коридорів в аеротенку).

Дисперсія розподілу σ^2 і число комірок m зв'язані між собою рівнянням:

$$\sigma^2 = \frac{1}{m}. \quad (7)$$

Перетворюючи рівняння (6) стосовно координат C_t/C_{\max} і τ (див. рис.1), отримуємо формулу (8), яка зв'язує зміну відносної концентрації індикатора від числа комірок m :

$$\frac{C_t}{C_{\max}} = \left[\frac{t}{\tau_i (m - 1)} \right]^{m - 1} \exp \left(m - 1 - \frac{t}{\tau_i} \right). \quad (8)$$

Апроксимація кривої відгуку $c(t)$ може бути представлена сумою степенево-експоненціальною функцією [3] в такій формі:

$$C(t) \approx \sum_{i=1}^n C_i(t) = \sum_{i=1}^n a_i (t - \tau_i)^{\alpha_i} e^{-\beta_i(t - \tau_i)}, \quad (9)$$

де $a_i, \alpha_i, \beta_i, \tau_i$ – числові значення параметрів, які визначаються методом найменших квадратів.

На основі гідродинамічних досліджень на моделі аеротенку були отримані криві відгуку (рис1.а,б,в), а на рис.2 представлені результати розрахунку об'ємів аеротенків та витрат повітря повітродувними станціями для аерації стічних вод від кількості впусків води в аеротенки.

Висновки

1. При індикаторному (трасерному) методі дослідити реальні швидкості потоків води в очисних спорудах є складною технічною задачею, тому поле швидкостей потоку води в спорудах залишається невідомим. Однак, переваги вказаного методу часто компенсують його недоліки.

2. Дані про розподіл часу перебування води в очисних спорудах отримати простіше, ніж виявити повну картину розподілу швидкості. Для цього досить провести відповідні вимірювання лише на вході та виході в очисних спорудах.

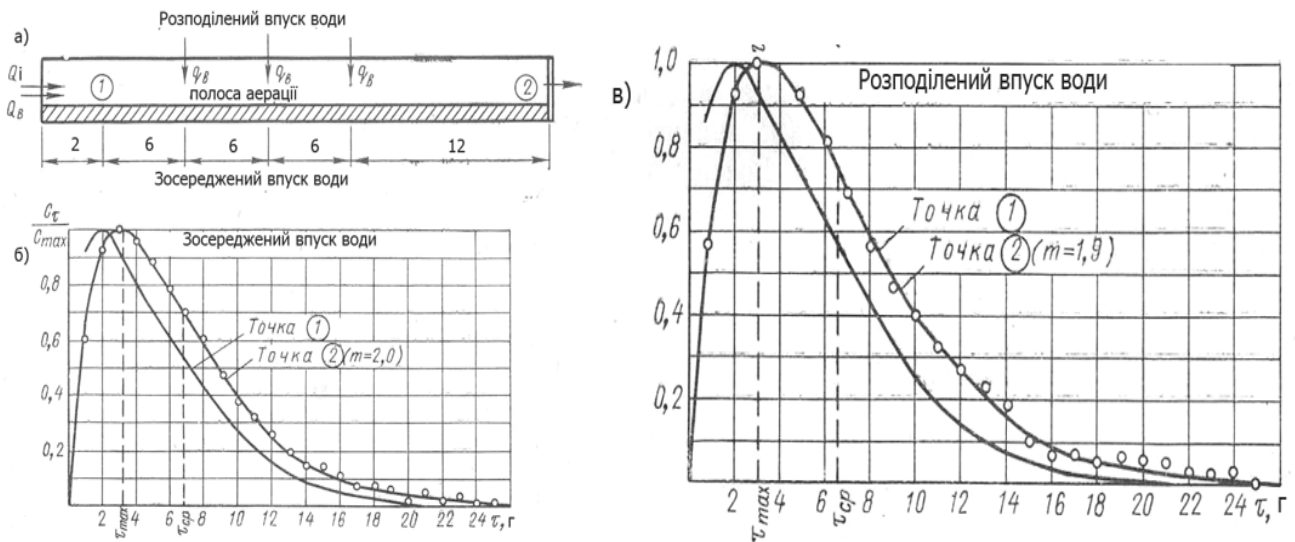


Рис. 1. Схема моделі аеротенку (а); б – криві відгуку при зосередженому пуску води; в – те ж при розподіленому впуску води

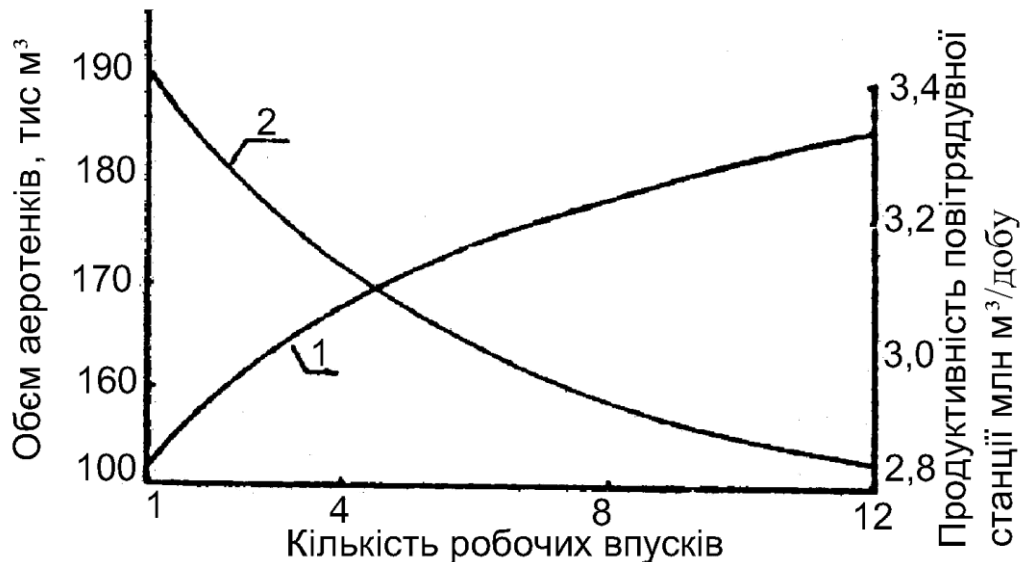


Рис. 2. Залежність продуктивності повітрядувних станцій (1) та об'ємів аеротенків від кількості впусків стічної води, що очищується (2)

3. Криві про розподіл часу перебування води в очисних спорудах дають змогу наближено судити і про сам механізм руху потоку води, тобто про його структуру в середині очисних споруд – виявити байпасні, циркуляційні потоки та застійні зони і т.п.

4. Основна маса моделей відноситься до моделей систем із зосередженими параметрами;

5. Із моделей з розподіленими параметрами найбільш часто використовуються моделі систем з поршневим витісненням, рідше використовуються системи з дифузійним перенесенням;

6. Інтерпретація кількісної індикаторної інформації на основі вказаних в даній статті моделей забезпечує підвищення точності, достовірності та інформативності гідродинамічних досліджень водоочисних споруд.

7. Найбільш перспективним в інтерпретації індикаторних досліджень є напрямок, що базується загальної теорії систем, в тому числі структурно складних, не тільки лінійних, але й нелінійних систем.

Список літератури

1. *Кафаров В.В.* Принципы создания безотходных химических производств. М.: Химия, 1982. 288 с. (С.24).
2. *ДБН В.2.5-75-2013* Каналізація. Зовнішні мережі і споруди. Київ 2013 р. Київ. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 96 с. Аеротенки С.43.
3. *Левеншпиль О.* Инженерное оформления химических процессов. М.: Химия, 1969. 621 с.
4. *Меликова О.Я.* Экспериментальное моделирование аэротенка с неравномерно рассредоточенным впуском сточной воды // В сб. Трудов МИСИ «Канализация и очистка сточных вод». М: МИСИ, 1977. №143. С 93-99.
5. *В.Н. Ambrose, E.R. Baumann, and E. Fowler.* Three tracer methods for determining detention times in primary clarifiers // Sewage and industrial wastes. January, 1957. Vol. 29, 21. pp.24-33.
6. *Захаров В.П., Шевляков Ф.Б., Минскер К.С.* Режимы работы малогабаритных турбулентных реакторов //Химия и химическая технология, 2005. Том 48. С.79-81.
7. *Кафаров В.В.* Методи кибернетики в хімії і хімічеської технології. М.:Химия, 1976. 464 с.
8. *Рамм В.М.* Абсорция газов. М.: Химия, 1976. 656 с.
9. *Rebhun M., Argaman Y.* Evalicion of hydraulic efficiency of sedimentation basins//I.Sanit. Engng Div. Proc. Amer. Soc Civil Engrs. 1965. №10. P.37
10. *Wolf D., Resnik W.* Residence time distributijn in real systems //Ind Engn Chem Fundam. 1963. V.2. №4. P.288.
11. *Національна доповідь* про стан техногенної та природної безпеки України у 2016 році. К., 2016. 432 с. (с.131).
12. *Азаров В.Л., Луничев Л.Н., Тавризов Г.А.* Математические методы исследования сложных физических систем (линейные системы). М. Наука 1975. 343 с.
13. *Бутковський А.Г.* Структурная теория распределенных систем. М. Наука, 1977. 320 с.
14. *Директор С. Рорер Р.* Введения в теорию систем (Пер с англ. М.: Мир, 1974. 464 с.
15. *И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев* Справочник по математике. М.:Гостехтеориздат, 1957. 470 с.

Стаття надійшла до редакції 8.12.17