УДК 628.3

Грицина О. О., к.т.н., доцент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД ВІД СПОЛУК ФОСФОРУ В АЕРОТЕНКАХ З АНАЕРОБНИМИ ЗОНАМИ

Наведена математична модель процесу очищення стічних вод від сполук фосфору в аеротенку. Модель дозволяє визначити об'єм анаеробної зони та необхідну концентрацію органічних речовин.
Ключові слова: сполуки фосфору, аеротенк, анаеробні умови.

Приведенная математическая модель процесса очистки сточных вод от соединений фосфора в аэротенке. Модель позволяет определить объем анаэробной зоны и необходимую концентрацию органических веществ.
Ключевые слова: соединения фосфора, аэротенк, анаэробные условия.

The mathematical model of wastewater treatment from phosphorus compounds in aerotank is described. The model allows to determine the volume of anaerobic zone and required concentration of organic substances.
Keywords: phosphorus compounds, aerotank, anaerobic conditions.

Надлишок біогенних елементів у природних водоймах сприяє посиленому росту водоростей і макрофітів, що призводить до дефіциту кисню і загибелі риб та інших водних організмів. Діяльність людини прискорює цей процес і перетворює антропогенну евтрофікацію природних водойм в одну з найважливіших проблем сучасності. Найбільш доцільним шляхом боротьби з евтрофікацією водойм є зменшення надходження біогенних елементів. Адже, ці сполуки є токсичними, як для живих організмів, що населяють водні об'єкти, так і для організму людини.

Традиційні станції біологічної очистки стічних вод не забезпечують виконання вимог нормативних документів. Ефект видалення фосфору в спорудах біологічного очищення, по типу коридорних аеротенків не перевищує 40 % [1]. Залишковий вміст фосфору у стічних водах складає 2 г в розрахунку на одну людину за добу [2]. При нормі водоспоживання 250 – 300 л/(люд · добу), залишкові концентрації фосфору складають 3-4 мг/л. Такі значення концентрацій у 30-40 разів перевищують гранично – допустимі для водойм.

В зв'язку з цим актуальною задачею є не тільки очищення стічних вод від органічних речовин, але й від біогенних елементів. Це можливо здійснити на каналізаційних очисних станціях шляхом реконструкції існуючих аеротенків. Проте, впровадження технологій вилучення сполук фосфору гальмується відсутністю методик розрахунку аеротенків із анаеробними зонами.

В діючому СНиП «Канализация. Наружние сети и сооружения» [3] розрахунок споруд біологічного вилучення сполук фософору - відсутній. В технічній літературі «Справочное пособие к СНиП» [4], частково розглянуте питання вилучення сполук фосфору, проте лише за допомогою біолого-хімічної очистки стічних вод.

Суттєвий вклад в розроблення сучасних методів розрахунку споруд біологічної очистки з видаленням сполук фосфору виконаний вченими з Санкт-Петербурга [5]. В основу розрахунку покладене добове навантаження на мул по біологічній потребі в кисні (БПК) (кг/кг·добу), на базі якої визначається необхідна маса мулу в спорудах і об'єм аеротенка. Запропоновані авторами залежності, отримані емпірично по даним роботи існуючих станцій в Москві і Санкт-Петербурзі. Використовувати їх для розрахунку іших споруд буде некоректно, тому для отримання універсальної залежності загального вигляду, необхідні додаткові дослідження [6].

В напрямку біологічного очищення стічних вод в системах з активним мулом останнім часом розробляються складні моделі очистки, які, з однієї сторони, більш детально розглядають динаміку зміни мулового середовища мікроорганізмів, а з іншого боку, намагаються розглядати процеси комплексного видалення органічних забруднень, азоту й фосфору. У цьому плані здобувають популярність моделі, розроблені групою закордонних фахівців IAWQ. Так, моделі активного мулу № 2d, № 3 (ASM-2d, ASM-3) дозволяють розраховувати мулову систему, здатну на вуглецеве окислювання, нітрифікацію, денітрифікацію і біологічне видалення фосфору, тобто призначені переважно для очищення побутових стічних вод [7].

Як відзначають фахівці, складні моделі, що пропонуються в останній час, мають ряд недоліків [8]. Щоб використати ці моделі для обґрунтування роботи реальних очисних споруд, потрібно знати велику кількість вихідних коефіцієнтів і констант. Малоймовірно, що при вирішенні реальних задач ця інформація буде відома. Самі автори стверджують, що апробація запропонованих моделей буде трудомісткою й буде вимагати багато часу. Однак такі великі і складні моделі кінетики біологічного очищення, незважаючи на всю їх повноту і корисність в загальному розумінні системи, становлять великі проблеми для їх реалізації (висока розмірність, недостатня можливість ідентифікації параметрів, високі витрати на калібрування й обґрунтування моделей і т.д.).

Тому в умовах оптимізації системи, планування, керування й контролю виробничим процесом необхідна побудова спрощених моделей низького рівня. Удосконалення моделей біологічої стічних вод від сполук фосфору повинне здійснюватись шляхом комплексного і одночасного врахування основних факторів і особливостей процесів при очищенні стічних вод в аеротенках і розробленні на базі цих моделей раціональних конструкцій і методів розрахунку технологічних параметрів аеротенків.

При моделюванні процесів можна виділити такі основні положення та пе-

редумови: – при побудові моделей, якщо це спеціально не враховано і не обумовлено, лімітування та інгібіювання процесів вилучення сполук фосфору різними факторами і речовинами не відбувається; – в аеротенку, який працює в режимі змішувача, відбувається ретельне перемішування, тому можна вважати концентрації компонентів стічних вод в ємкості однорідними і рівними відповідним концентраціям на виході; – швидкості витиснення і поглинання фосфатів приблизно рівні, кількість поглинутого фосфору більша кількості витисненого [9].

При розрахунку зон, що використовуються для процесів біологічного очищення, необхідно встановити зв'язок між концентрацією забруднюючих речовин на вході в реактор C_0 і на виході з нього C_e, часом перебування стічної води в реакторі T і концентрацією мікроорганізмів X, що здійснюють очищення від даного забруднення, при фіксованій температурі t^0, тобто функцію

$$T = f\left(X, C_0, C_e, t^0, \alpha_1, \alpha_2, ...\alpha_k\right), \tag{1}$$

де $\alpha_1, \alpha_2, ...\alpha_k$ – коефіцієнти математичної моделі, що описують залежність швидкості споживання забруднюючих речовин $\rho(C)$ від їх концентрацій.

В світовій практиці з метою максимального використання потенціалу біологічної очистки, були розроблені технологічні схеми комплексного очищення стічних вод від біогенних елементів. До таких схем можна віднести A^2/O (Anaerobic Anoxic/Oxic), UCT (University of Cape Town), JHB (Johannesburg) і різні модифікації вже наведених вище схем.

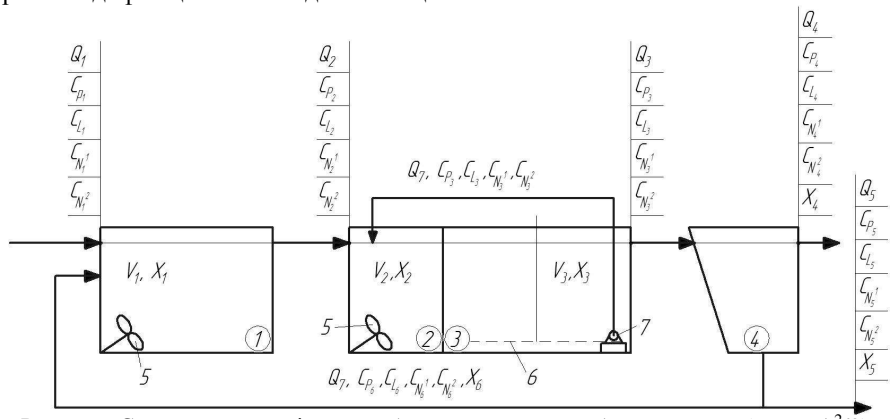

Рисунок. Схема аеротенка із анаеробно-аноксидно-аеробними зонами (схема $A^2/0$): 1 – анаеробна зона; 2 – аноксидна зона; 3 – аеробна зона; 4 – вторинний відстійник; 5 – пристрій для перемішування мулової суміші; 6 – система аерації;

7 – рециркуляційний насос. Q – витрата води в *i*-й зоні; C_{P_i} – концентрація фосфатів в *i*-й зоні; C_{L_i} – концентрація легкорозчинних органічних речовин в *i*-й зоні; $C_{N_i^1}$ – концентрація амонійного азоту в *i*-й зоні; $C_{N_i^2}$ – концентрація азот нітратів в *i*-й зоні; X_i – концентрація активного мулу

Для умов реакторів, що працюють по схемі змішувача, процеси видалення фосфатів та окиснення органічних речовин можуть бути описані системою рівнянь:

а) Нестандартне рівняння матеріального балансу маси речовини в реакторі:

$$V\frac{dC_{P_i}}{dt} = Q\cdot(C_{P_{Oi}} - C_{P_{ei}}) - V\cdot(R_{P_{2i}} - R_{P_{1i}}) \ , \qquad (2)$$

$$V\frac{dC_{L_i}}{dt} = Q\cdot(C_{L_{Oi}} - C_{L_{ei}}) - V\cdot(R_{L_{2i}} + R_{L_{1i}}) \ , \qquad (3)$$

б) Нестандартне рівняння матеріального балансу для мікробної біомаси

$$V\frac{dX_{P_i}}{dt} = Q\cdot(X_{P_{Oi}} - X_{P_{ei}}) + V\cdot R_{XP_i} - V\cdot b_{P_i}\cdot X_{P_{ei}} \ , \qquad (4)$$

де dC_{P_i}, dC_{L_i} – швидкість зниження концентрації відповідно фосфатів та легкорозчинних органічних речовин; dX_{P_i} – швидкість росту фосфоракумулюючих мікроорганізмів; V – об'єм зони; Q – об'ємна витрата стічної рідини; $C_{P_{Oi}}, C_{P_{ei}}, C_{L_{Oi}}, C_{L_{ei}}$ – відповідно концентрації фосфатів, легкорозчинних органічних речовин у вхідній і очищеній рідині; $X_{P_{oi}}, X_{P_{ei}}$ – відповідно, концентрації фосфоракумулюючих мікроорганізмів у вхідній і очищеній рідині; b_{P_i} – швидкість самоокислення, що характеризує відмирання фосфоракумулюючих мікроорганізмів; $R_{P_{1i}}, R_{P_{2i}}$ – швидкість витиснення фосфатів в анаеробних умовах, та швидкість споживання фосфатів в аеробних умовах; $R_{L_{1i}}, R_{L_{2i}}$ – відповідно, швидкість окислення органічних речовин в анаеробних та аеробних умовах; R_{XP_i} – швидкість росту фосфоракумулюючих мікроорганізмів активного мулу.

Приймемо, що $T = V/Q$ – максимальний час перебування стічної рідини в зоні. Тоді для стаціонарних умов $\frac{dC_i}{dt} = 0$ і $\frac{dX_P}{dt} = 0$ отримаємо:

$$C_{P_O} - C_{P_e} + T_1 \cdot R_{P_1} - T_2 \cdot R_{P_2} = 0, \quad (5)$$

$$C_{L_O} - C_{L_e} + T_1 \cdot R_{L_1} - T_2 \cdot R_{L_2} = 0 \ , \quad (6)$$

$$X_{P_O} - X_{P_e} + T \cdot \left(R_{XP} - b_P \cdot X_{P_e}\right) = 0 \, . \quad (7)$$

Для процесу витиснення фосфатів з клітин в анаеробних умовах рівняння для R_{P_1} можна записати в вигляді:

$$R_{P_1} = \rho_{P_1} \cdot \frac{C_P}{C_P + K_P} \cdot \frac{C_L}{C_L + K_L} \cdot K_T \cdot K_{PH} \cdot X_P \ , \quad (8)$$

де ρ_{P_1} – швидкість витиснення фосфатів з клітин в анаеробних умовах, K_P – константа напівнасичення по фосфату, K_L – константа, що характеризує властивості легкорозчинних органічних речовин, K_T – константа, що враховує вплив температури, K_{pH} – константа, що враховує вплив pH.

Для процесу поглинання фосфатів клітинами а аеробних умовах рівняння для R_{P_2} в вигляді:

$$R_{P_2} = \rho_{P_2} \cdot \frac{C_P}{C_P + K_P} \cdot \frac{C_L}{C_L + K_L} \cdot \frac{C_O}{C_O + K_O} \cdot K_T \cdot K_{PH} \cdot X_P \ , \quad (9)$$

де ρ_{P_2} – швидкість поглинання фосфатів клітинами в аеробних умовах, C_O – концентрація розчиненого кисню, K_O – константа, що характеризує вплив кисню.

Кінетику окислення органічних речовин в анаеробних і аеробних умовах можна представити в вигляді:

$$R_{L_1} = \rho_{L_1} \cdot \frac{C_L}{C_L + K_L} \cdot X_P \cdot K_T \cdot K_{PH} \ , \quad (10)$$

$$R_{L_2} = \rho_{L_2} \cdot \frac{C_L}{C_L + K_L} \cdot \frac{C_P}{C_P + K_P} \cdot X_P \cdot K_T \cdot K_{PH} \ , \quad (11)$$

де ρ_{L_1}, ρ_{L_2} – відповідно, швидкість окислення органічних речовин в анаеробних і аеробних умовах.

Згідно рівняння матеріального балансу для мікробної біомаси, швидкість

росту мікроорганізмів активного мулу, для фосфоракумулюючих мікроорганізмів, що здійснюють витиснення і поглинання фосфатів, рівняння має вигляд

$$R_{XP} = \mu_P \cdot \frac{C_P}{C_P + K_P} \cdot \frac{C_O}{C_O + K_O} \cdot K_T \cdot K_{PH}\,, \qquad (12)$$

де μ_P – максимальна питома швидкість росту фосфоракумулюючих мікроорганізмів.

Прийняті наступні початкові умови: 1. Концентрація фосфатів та органічних речовин в аеротенку із анаеробними зонами в початковий момент часу дорівнює концентрації відповідних забруднень, що утворюються в результаті змішування стічних вод після первинного відстійника та активного мулу, що повертається з вторинних відстійників

$$\frac{Q_1 \cdot C_{P_1} + R \cdot Q_6 \cdot C_{P_6}}{Q_1 + Q_6}(0) = C_{P_O}\,, \qquad (13)$$

$$\frac{Q_1 \cdot C_{L_1} + R \cdot Q_6 \cdot C_{L_6}}{Q_1 + Q_6}(0) = C_{L_O}\,, \qquad (14)$$

де R – коефіцієнт рециркуляції зворотного мулу з вторинних відстійників в аеротенк.

2. Концентрація кисню в анаеробній зоні в початковий момент часу дорівнює нулю.

3. Концентрація активного мулу в початковий момент часу в аеротенку дорівнює сумі концентрацій автотрофних, гетеротрофних та фосфоракумулюючих мікроорганізмів

$$X(0) = X_A + X_H + X_P\,, \qquad (15)$$

де X – концентрація активного мулу в початковий момент часу, г/дм^3; X_{A0}, X_{H0}, X_{P0} – відповідно концентрація автотрофних, гетеротрофних і фосфоракумулюючих мікроорганізмів, г/дм^3.

4. Кінцева концентрація фосфатів визначається як сума фосфатів в очищеній рідині та видаленого з надлишковим активним мулом

$$C_{P_e} = C_{P_4} + C_{P_5}\,. \qquad (16)$$

Таким чином рівняння (5) прийме вигляд

$$C_{P_O} - C_{P_4} - C_{P_3} + \rho_{P_1} \cdot \frac{C_{P_2}}{C_{P_2} + K_P} \cdot \frac{C_{L_2}}{C_{L_2} + K_L} \cdot T_1 \cdot X_{P_1} - \rho_{P_2} \cdot \frac{C_{P_3}}{C_{P_3} + K_P} \cdot \frac{C_{L_3}}{C_{L_3} + K_L} \cdot T_2 \cdot X_{P_2} = 0\,. \qquad (17)$$

Тоді, необхідний час перебування стічної рідини в анаеробних умовах:

$$T_1 = \frac{\rho_{P_2} \cdot \frac{C_{P_3}}{C_{P_3} + K_P} \cdot \frac{C_{L_3}}{C_{L_3} + K_L} \cdot \frac{C_O}{C_O + K_O} \cdot T_2 \cdot X_{P_2} + C_{P_4} + C_{P_5} - C_{P_O}}{\rho_{P_1} \cdot \frac{C_{P_2}}{C_{P_2} + K_P} \cdot \frac{C_{L_2}}{C_{L_2} + K_L} \cdot X_{P_1}} . \quad (18)$$

Згідно [10], чисельні значення констант прийняті наступні: ρ_{P_2} =1-2 кг Р/кг ХПК·добу, K_P =0,1-0,5г/м^3, K_L =2-6г/м^3, ρ_{P_1} = 2-4 кг ХПК/кг ХПК·добу.

Деякі положення та зауваження до запропонованої моделі:

1. Кількість легкорозчинних органічних речовин, що може бути окислена в процесі очищення визначається відповідно, до рівняння

$$\Delta C_L = \rho_{L_1} \cdot \frac{C_{L_2}}{C_{L_2} + K_L} \cdot T_1 \cdot X_{P_1} + \rho_{L_2} \cdot \frac{C_{L_3}}{C_{L_3} + K_L} \cdot T_2 \cdot X_{P_2} . \quad (19)$$

2. Відповідно, з рівняння (17) кількість фосфатів в очищеній рідині буде становити:

$$C_{P_4} = C_{P_O} - C_{P_5} + \rho_{P_1} \cdot \frac{C_{P_2}}{C_{P_2} + K_P} \cdot \frac{C_{L_2}}{C_{L_2} + K_L} \cdot T_1 \cdot X_{P_1} - \rho_{P_2} \cdot \frac{C_{P_3}}{C_{P_3} + K_P} \cdot \frac{C_{L_3}}{C_{L_3} + K_L} \cdot T_2 \cdot X_{P_2} . \quad (20)$$

3. Для розрахунку концентрації фосфатів в мулі можна використати рівняння матеріального балансу фосфатів:

$$Q_0 \cdot C_{P_0} - Q_4 \cdot C_{P_4} = Q_5 \cdot C_{P_5} , \quad (22)$$

$$C_{P_4} = L_{P_4} + f_{xp} \cdot X_{p4} , \quad (23)$$

$$Q_0 = Q_1 + Q_6 , \quad (24)$$

де f_{xp} – частка фосфору в мулі.

Таким чином рівняння (22) прийме вигляд

$$Q_0 \cdot C_{P_0} - Q_4 \cdot L_{P_4} - Q_4 \cdot f_{xp} \cdot X_{P_4} = Q_5 \cdot C_{P_5} . \quad (25)$$

Загальний приріст мулу визначаємо з рівняння, [11]

$$Пр = Y_P \cdot \left(C_{L_1} - C_{L_4}\right) \cdot Q_0 , \quad (26)$$

де Y_P – економічний коефіцієнт фосфоракумулюючої біомаси.

З системи рівнянь (25-26) вміст фосфатів в мулі

$$f_{XP} = \frac{Q_0 \cdot C_{P_0} - Q_4 \cdot L_{P_4}}{Пр} . \quad (27)$$

4. Концентрацію органічних речовин після анаеробної зони можна визначити з системи рівнянь (6,10,11) або у випадку $C_{L_2} >> K_L$, дріб в рівнянні (18) $C_{L_2} /(C_{L2} + K_L) \approx 1$;

5. Тривалість перебування мулової суміші в аноксидно-аеробних умовах (T_2), може бути визначена за методиками [2, 4].

Таким чином, вміст сполук фосфору в основних джерелах централізованого водопостачання перевищує гранично-допустимі концентрації. Це вимагає підвищення ефекту видалення сполук фосфору на каналізаційних очисних спорудах перед скидом стічних вод у водойми. На сьогоднішній день в нормативній літературі України відсутня методика розрахунку аеротенків із влаштуванням анаеробних зон для підвищення ефективності видалення сполук фосфору. У роботі запропонована математична модель очистки стічних вод від сполук фосфору в аеротенку із анаеробно-аноксидно-аеробними зонами. Це дозволяє визначити раціональні параметри роботи таких аеротенків, підвищити ефективність вилучення сполук фосфору з міських стічних вод.

1. Ковальчук В. А. Очистка стічних вод: Навчальний посібник. / В. А. Ковальчук – Рівне : ВАТ «Рівненська друкарня», 2003р. – 616 с. **2.** Мишуков Б. Г. Удаление азота и фосфора на очистных сооружениях городской канализации / Б. Г. Мишуков, Е. А. Соловьева – Санкт-Петербург : ООО «Синэл», 2004 р. – 72 с. **3.** СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения/ Госстрой СССР. – М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 72 с. **4.** Проектирование сооружений для очистки сточных вод (справочное пособие к СНиП). М. : Стройиздат, 1990. – 192 с. **5.** Технология удаления азота и фосфора в процессах очистки сточных вод / Мишуков Б. Г., Соловьева Е. А., Керов В. А., Зверева Л. Н. – СПб. : Издательство журнала «Вода: технология и экология», 2008. – 144 с. **6.** Есин М. А. Современные подходы при расчете сооружений биологической очистки с удалением соединений азота и фосфора [Електронний ресурс] / М.А. Есин // – Режим доступу: http:www.nbuv.gov.ua/portal/natural/_Nvb/2010_57/esin.pdf// **7.** A modification to the Activated Sludge Model No.2 based on the competition between phosphorus-accumulating organisms & glycogen-accumulating organisms. / I. Manga, I. Ferrer, seco A. Garsia-Usach // Wat.Sci.Tech. – 2001. – Vol.43, No.1. – P. 161-171. **8.** Николаев А. Н. Модель биологической очистки городских сточных вод в системе аэротенк – вторичный отстойник / А. Н. Николаев, Н. Ю. Большаков // Вода и экология. – 2001. – № 4. – С. 27-34. **9.** Соловьева Е. А. Очистка сточных вод от азота и фосфора. Монография. / Е.А. Соловьева – СПб: изд. «Водопроект Гипрокоммунводоканал Санкт-Петербург», 2008 г. – 100 с. **10.** Хенце М. Очистка сточных вод: Пер. с англ./ Хенце М., Армоэс П., Ля-Кур-Янсен Й., Арван Э. – М. : Мир, 2004. – 480 с.

Рецензент: д.т.н., проф. Гіроль М. М. (НУВГП)