

УДК 628.353

DOI: 10.31891/2307-5740-2019-270-3-22-25

АРТАМОНОВ В. В., ВАСИЛЕНКО М. Г.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

НЕСТАЦІОНАРНИЙ РЕЖИМ ОЧИСТКИ СТІЧНИХ ВОД В УСТАНОВКАХ «БІОСОФ»

Нестаціонарність кількісних та якісних показників стічних вод обумовлює зміну режимів роботи очисних споруд і призводить до погіршення характеристик очищеної води. Зазначений недолік значно ускладнюється та посилюється при використанні швидкоплинних методів очистки вод, до яких відноситься інтенсивна біосорбційно-фільтраційна технологія БІОСОФ. Проведені моделювання та обчислювальний експеримент з очистки стічних вод в установках БІОСОФ показали ефективність свого функціонування в широкому діапазоні зміни режиму їх роботи, порівнюючи очистку вод до та після обумовленого нею збурення. Протягом збурення, тривалість якого становить 1..2 години, забрудненість очищеної води збільшується в декілька разів, що може становити загрозу екологічному стану водойми. Розробка та впровадження технічних рішень усунення негативного впливу нестаціонарності режиму роботи очисних споруд на гідросферу становить важливу задачу протидії глобальним викликам сучасності.

Ключові слова: стічна вода, нестаціонарність, БІОСОФ, обчислювальний експеримент.

ARTAMONOV V., VASYLENKO M.

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

NON-STATIONARY MODE WASTEWATER ON INSTALLATION "BIOSOF»

Non-stationarity of quantitative and qualitative indicators of wastewater causes a change in the operating modes of treatment facilities and leads to deterioration of the characteristics of treated water. This drawback is much more complicated and enhanced by the use of rapid methods of water purification, which include intensive biosorption filtration (BIOSAF) technology. The simulation and computational experiment on wastewater treatment in biosof plants have shown the effectiveness of their functioning in a wide range of changes in their modes of operation, comparing the treatment of water before and after the disturbance caused by it. During the perturbation, the duration of which is 1..2 hours, the pollution of treated water increases several times, which can pose a threat to the ecological state of the reservoir. Development and implementation of technical solutions to eliminate the negative impact of non-stationary operation of treatment facilities is an important task of countering the global challenges of our time.

Key words: waste water, unsteadiness, BIOSOF, computational experiment.

Постановка проблеми. При розрахунку споруд водоочистки приймається стаціонарний, на максимальну годинну витрату та середні добові якісні показники вихідної води, режим їх роботи [1] і аксіоматично характеризується усталеними та незмінними значеннями всіх показників процесу очистки. В дійсності процес очистки постійно збурюється нестабільністю зазначених характеристик [2], що неминуче позбавляє його стабільності. Особливо негативно нестаціонарність впливає на біологічну очистку, бо вимушує мікрофлору біореакторів бути в стані постійної адаптації до таких змін.

Зважаючи, що зміни показників біомаси, як живої субстанції, не можуть бути миттєвими і потребують певного часу, виникає ефект запізнення в реагуванні біомаси. В результаті такого запізнення якість очистки може суттєво та тривало погіршуватися і призвести до скиду у водойму надмірної маси забруднень, станеться його задуха та масово загинуть водні рослини і тварини.

Ймовірність зазначеної екологічної ситуації суттєво збільшується при впровадженні сучасних інтенсивних методів та технологій біологічної очистки, тривалість якої зменшується з кількох годин до декількох десятків хвилин і тому практично зникає можливість усереднення біореактором залпових збурень несприятливими характеристикам. Зокрема біосорбційно-фільтраційна (БІОСОФ) технологія очистки стічних вод передбачає [3] тривалість їх перебування в аеробному ступені біореактора протягом 10..15 хвилин. Швидкість розмноження біомаси мікроорганізмів, іммобілізованих на поверхні гранул інертного завантаження біореактора, становить 20..30 хвилин, тому її нарощення не встигатиме зреагувати на збільшення витрати чи концентрації забруднень стічної води і призведе до їх «проскоку» в очищену воду.

Усунення такого шляху погіршення екологічного стану гідросфери, як основного акцептора антропогенного забруднення довкілля, є важливим напрямком в стратегії протидії глобальним викликам і потребує розробки і впровадження відповідних технічних та технологічних рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологічно важливими показниками запізнення реагування біомаси біореактора на збурення показників стічної води є очікувані відхилення показників очищеної води від їх номінальних значень, тривалість такого відхилення, гарантованість у поверненні режиму роботи біореактора до початкових характеристик процесу після припинення його збурення параметрами нестаціонарності.

Останній ефект оцінюється стійкістю процесу і його визначення потребує застосування специфічних експериментальних підходів з побудови та аналізу перехідних фазових траєкторій [4], оскільки в умовах переходу (точка біфуркації) відносно швидко і часто непередбачувано міняються механізми та

процеси очистки. Перші два показники можуть визначатися в обчислювальному експерименті при наявності відповідних математичних моделей, зокрема рішенням системи двох звичайних диференціальних рівнянь матеріального балансу потоків мас мікрофлори та забруднення з врахуванням нестационарності приросту цих компонентів у біореакторі.

Механізм очистки стічної води полягає у споживанні її забруднень (субстрату) мікроорганізмами, що забезпечує зменшення його концентрації і призводить до збільшення концентрації біомаси. Тому математична модель роботи біореактора за проміжок часу $d\tau$ виражено [5] двома феноменологічними балансовими рівняннями матеріального балансу:

– мікрофлори

$$V_i dx_i + V_r dx_r = Q_o x_o d\tau + \mu_i x_i V_i d\tau + \mu_r x_r V_r d\tau - Q_k x_k d\tau; \quad (1)$$

– субстрату

$$V_i ds_i + V_r ds_r = Q_o s_o d\tau - \frac{\mu_i}{y_i} x_i V_i d\tau - \frac{\mu_r}{y_r} x_r V_r d\tau - Q_k s_k d\tau, \quad (2)$$

де V – функціональні об'єми біореактора, m^3 ; x – концентрація біомаси, $г/м^3$; Q – витрати стічних вод, $м^3/год$; μ – швидкість приросту біомаси, $1/год$; s – концентрація субстрату, $г/м^3$; y – економічний коефіцієнт споживання субстрату біомасою, $г/г$; o, i, r, k – позначають належність індексованих величин рівнянь відповідно показників вхідної води, об'ємів інертного завантаження і стічної води у біореакторі, очищеної води.

Враховуючи, що загальний об'єм біореактора $V = V_i + V_r$, при пористості ε інертного завантаження визначимо $V_i = (1 - \varepsilon)V$ та $V_r = \varepsilon V$.

Прийнято, що $Q_o = Q_k = Q$; $s_r = s_k = s$; $x_r = x_k = x$; $s_i = k_a s$; $x_i = k_i x$ та розділивши рівняння (1) і (2) на $V \cdot d\tau$, після ряду перетворень отримано систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} [k_i(1 - \varepsilon) + \varepsilon] \frac{dx}{d\tau} = D x_o + [\mu_i k_i(1 - \varepsilon) + \mu_r \varepsilon - D] x \\ [k_a(1 - \varepsilon) + \varepsilon] \frac{ds}{d\tau} = D(s_o - s) - \left[\frac{\mu_i}{y_i} k_i(1 - \varepsilon) + \frac{\mu_r}{y_r} \varepsilon \right] x \end{cases} \quad (3)$$

в яких коефіцієнт розбавлення $D = Q/V = 1/\tau$ є зворотною величиною тривалості τ очистки стічної води у біореакторі з іммобілізованою мікрофлорою; k_i та k_a відповідно коефіцієнти іммобілізації мікрофлори та адсорбції субстрату на інертному носії.

Економічні коефіцієнти визначаються як $1/y_i = 1/y_{e,i} + m_i/\mu_i$ та $1/y_r = 1/y_{e,r} + m_r/\mu_r$, а швидкості приросту мікрофлори в біореакторі – за виразами $\mu_i = \frac{\mu_{m,i} k_i s}{K_{s,i} + k_i s}$, $\mu_r = \frac{\mu_{m,r} s}{K_{s,r} + s}$, в яких прийнято $y_{e,i} = y_{e,r} = y_e$; $m_i = m_r = m$; $\mu_{m,i} = \mu_{m,r} = \mu_m$; $K_{s,i} = K_{s,r} = K_s$, оскільки видовий склад іммобілізованої та незакріпленої мікрофлор практично ідентичний і тому кількісно однакові для них відповідно питомі використанні субстрату на приріст y_e біомаси, питомі споживання m на життєдіяльність біомаси, максимальні швидкості μ_m приросту біомаси і константи насичення K_s її приросту [6].

Сукупне врахування зазначених вище умов дозволило отримати кінцевий вигляд нестационарної математичної моделі біореактора з іммобілізованою мікрофлорою:

$$\begin{cases} \frac{dx}{d\tau} = \frac{D x_o + \left\{ \mu_m s \left[\frac{k_a k_i (1 - \varepsilon)}{K_s + k_a s} + \frac{\varepsilon}{K_s + s} \right] - D \right\} x}{k_i (1 - \varepsilon) + \varepsilon} \\ \frac{ds}{d\tau} = \frac{D(s_o - s) - \left\{ \frac{\mu_m s}{y_e} \left[\frac{k_a k_i (1 - \varepsilon)}{K_s + k_a s} + \frac{\varepsilon}{K_s + s} \right] + m [k_i (1 - \varepsilon) + \varepsilon] \right\} x}{k_a (1 - \varepsilon) + \varepsilon} \end{cases} \quad (4)$$

Рівняння (3) використовується його авторами [5] виключно для стаціонарних ($dx/d\tau = ds/d\tau = 0$) режимів роботи біореактора з отриманням ряду важливих технологічних показників: умов застосування для завантаження біореактора гранульним матеріалом, активним для адсорбції субстрату; залежність питомої ($кг/м^3$) критичної маси мікроорганізмів від питомої поверхні ($м^2/м^3$) часток завантаження; рівноважна концентрація іммобілізованої мікрофлори у біореакторі; умови режиму роботи біореактора з нульовим приростом біомаси.

Метою статті є оцінка характеристик перехідного режиму зміни характеристик стічної води, що подається на очистку в установку технології «БІОСОФ».

Виклад основного матеріалу. Складність рівнянь (4) виключає доцільність його аналітичного рішення. Обчислення проводились у пакеті MatCad 15.0 з використанням оператора Rkfixed розв'язку системи звичайних лінійних диференціальних рівнянь та оператора графічного відображення перебігу перехідного процесу біоочистки у біореакторі. Інтегрування проводилось в інтервалі часу від нуля до 5 год. Величини D та s_o змінювались відповідно як $D = 1; 2; 3 \text{ год}^{-1}$ та $s = 100; 200; 300; 400$, підтримуючись

постійними протягом кожного досліді. Початок відліку часу характеризується наявністю у біореакторі стаціонарного режиму з показниками: концентрація біомаси у очищеній воді, $x = 0,010$ г/л; концентрація органічних, за величиною БСК, забруднень очищеної води $s = 0,020$ г/л.

В розрахунках постійними величинами приймалися: коефіцієнт іммобілізації $k_i = 150$ г/г; коефіцієнт ендогенного споживання $m = 0,2$ г/(г год); економічний коефіцієнт $y_e = 0,5$ г/г; коефіцієнт адсорбції $k_a = 1$; концентрація мікроорганізмів вихідної води, $x_0 = 10^{-6}$ г/л; константа насичення, $K_s = 0,033$ г/л; пористість завантаження біореактора, $\varepsilon = 0,4$ м³/м³; максимальна швидкість приросту біомаси, $\mu_{\max} = 0,085$ г/(г год);

Вибір зазначених характеристик обґрунтовано аналітичною оцінкою результатів виробничої експлуатації біофільтрів [7]. Питома кількість мікроорганізмів у завантаженні біофільтра становить $N = 10^{12}$ од/м³. Натомість, у біоплівці біофільтрів кількість мікроорганізмів оцінюється в $n = 10^8$ од/мл, тому у біофільтрі питома маса M біоплівки середньою густиною $\rho_1 = 1$ г/мл становить:

$$M = \frac{N}{n} \cdot \rho_1 = \frac{10^{12}}{10^8} \cdot 1 = 10^4 \text{ г/м}^3 = 10 \text{ кг/м}^3. \quad (5)$$

В дійсності в біореакторах з іммобілізованою біоплівкою її маса може бути 20..50 кг/м³ ймовірно за рахунок збільшення поверхні гранульного завантаження. Дійсно, при завантаженні гранулами середнім діаметром 2,0 мм, їх питома поверхня становить 1800 м²/м³ завантаження, а в біофільтрах вона зазвичай не перевищує 100 м²/м³.

Питома маса суто мікроорганізмів визначається з врахуванням, що об'єм V одного мікроорганізму середнім розміром 1 мкм дорівнює 1 мкм³, або 10^{-18} м³, а їх загальна питома маса m при густині тіла мікрофлори $\rho = 1$ т/м³ оцінюється в $m = v \cdot N \cdot \rho = 10^{-18} \cdot 10^{12} \cdot 1 = 10^{-6}$ т/м³ = 1 г/м³, тобто лише 0,01 % маси біоплівки, що обумовлено створенням мікроорганізмами навколо себе значної кількості в'язкої полімерної субстанції (матрикса), яка сприяє їх просторовій організації та слугує резервним джерелом харчування.

Усталені значення якості очищеної води за величиною БСК (в рівняннях (4) величини s) наведено на рис. 1 і свідчать про відносно невеликий (за винятком режиму при $D=3,0$) вплив збурень на ефективність очистки стічної води у біореакторі при ступінчатій зміні зазначених режимів його роботи.

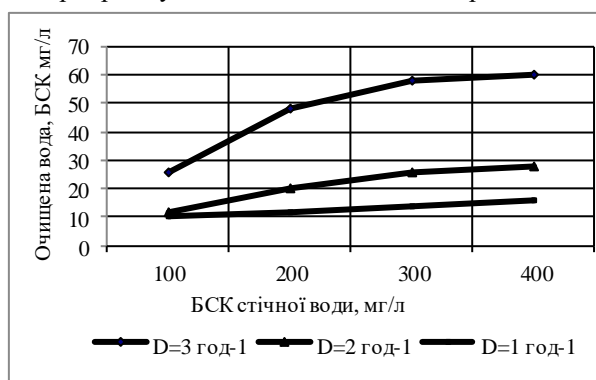


Рис. 1. Вплив збурень D та s на якість очищеної води

Ситуація виглядає значно гіршою за результатами перебігу перехідних процесів, один з графіків яких наведено на рис. 2, де абсциса – тривалість перехідного процесу в годинах, ордината – концентрації в очищеній воді БСК (пунктирна лінія) та біомаси (суцільна лінія) в мг/л.

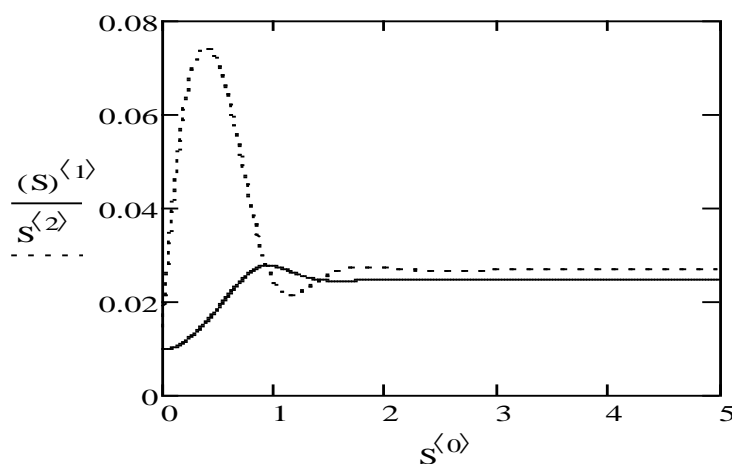


Рис. 2. Перехідний процес при зміні $s_0 \rightarrow 0,30$ та $D = 1,0 \rightarrow 2,0$

Суттєва зміна режиму роботи біореактора обумовила збільшення БСК очищеної води з 20 до 26 мг/л. Але перехідний процес характеризується майже годинним збуренням, при якому якість очищеної води погіршується до БСК = 75 мг/л, що в реальних умовах може призвести до травматичного погіршення екологічного стану водойми.

Висновки. Надходження стічних вод на очисні споруди характеризується значною кількісною та якісною нестаціонарністю. Моделювання та обчислювальний експеримент з очистки стічних вод в установках БІОСОФ показали ефективність свого функціонування в широкому діапазоні зміни режиму їх роботи, порівнюючи очистку вод до та після обумовленого нею збурення. Протягом збурення, тривалість якого становить 1..2 години, забрудненість очищеної води збільшується в декілька разів, що може становити загрозу екологічному стану водойми. Розробка та впровадження технічних рішень усунення негативного впливу нестаціонарності режиму роботи очисних споруд на гідросферу становить важливу задачу протидії глобальним викликам сучасності.

Література

1. ДБН В.2.5 75:2013. Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування.
2. Артамонов В. В. Оцінка нестаціонарності роботи споруд водоочистки / В. В. Артамонов, М. Г. Василенко // *Мат. міжнар. н-пр. конф. «Сучасні пробл. охорони довкілля, рац. використ. водн. ресурсів та оч-ки природн. і стічн. вод»*. – Київ : Знання. 2005. – С 90–94.
3. Василенко М. Г. Управління біореактором з псевдорозрідженою насадкою / М. Г. Василенко // *XX міжн. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів, молодих учених «Актуальні проблеми життєдіяльності суспільства»* 25-26 квітня 2013 р. – Кременчук : КрНУ, 2013. – С. 224.
4. Теория бифуркации динамических систем на плоскости / А. А. Андронов и др. – М. : Наука, 1967. – 265 с.
5. Василенко М. Г. Екологічно безпечна біосорбційно-фільтраційна технологія попередньої анаеробної очистки стічних вод / М. Г. Василенко // *Вісник КрНУ ім. М. Остроградського*. – Вип. 1. – Кременчук, 2019. – С. 113–120.
6. Перт С. Дж. Основы культивирования микроорганизмов и клеток / С. Дж. Пертю. – М. : Мир, 1978. – 331 с.
7. Роговская Ц. И. Биохимический метод очистки производственных сточных вод / Ц. И. Роговская. – М. : Стройиздат, 1967. – 139 с.

References

1. DBN B.2.5 75:2013. Kanalizatsiya. Zovnichni vereji na sporudi. Osnovni polojennya proektuvannya.
2. Artamonov V. V. Otsinka nestatsionarnosti roboti sporud vodootchistki / V. V. Artamonov, M. G. Vasylenko // *Mat. mijnar. n-pr. konf. «sutchasni probl. dovkillya, rats. vikorbst. vodn. resursiv na otch-ki prirodn. i stitchn. vod»*. – K. : Znannya. 2005. – S. 90–94.
3. Vasylenko M. G. Upravlinnya bioreaktorom z psevdorozridjenoyu nasadkoyu / M. G. Vasylenko // *XX Mijn. nauk.-prakt. konf. studentov, aspirantov, molodich utsenich «Aktualni problem jittediyalnosti suspilstva»* 25–26 kvitnya 2013 r. – Kremntchuk : KrNU, 2013. – S. 224.
4. Andronov A. A. I dr. Teoriya bifurcatsiy dinamicheskikh system na ploskosti / A. A. Andronov. – M. : Nauka. 1967. – 265 s.
5. Vasylenko M. G. Ekologitchno bezpetchna biosorbtsiyno-filtratsiyna tehnologiya poperednioy anaerobnoy otchistki stitchnih vod. / M. G. Vasylenko // *Visnik KrNU im. M. Jstrogradskogo*. – Vip. 1. – Kremntchuk, 2019. – S. 113–120.
6. Pert S. Dj. Osnovi kultivirovaniya mikroorganizmov i kletok / S. Dj. Pert. – M. : Mir, 1978. – 331 s.
7. Rogovskaya Ts. I. Biohimitheskiy metod otsistki proizvodstvennih stotsnih vod / Ts. I. Rogovskaya. – M. : Stroyizdat. 1967. – 139 s.

Рецензія/Peer review : 17.05.2019

Надрукована/Printed : 12.06.2019
Прорецензовано редакційною колегією