

## ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ

УДК 628.316:004.942

**Россінський В. М., докторант, Саблій Л. А., д.т.н., професор**  
(Національний технічний університет України «Київський  
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ)

### **ВПЛИВ НІТРАТНОГО РЕЦИКЛУ ТА СИНТЕТИЧНИХ ДЕТЕРГЕНТІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД**

**Приведено результати комплексного чисельного експерименту з оцінки кількісних параметрів процесів біологічного очищення стічних вод, що містять синтетичні детергенти, від органічних забруднюючих речовин в аноксидних і аеробних біореакторах із врахуванням ступеня нітратного рециклу. Показано, що для досягнення повного біологічного очищення стічних вод, зменшення коефіцієнта внутрішньої рециркуляції потребує збільшення тривалості обробки стічних вод в біореакторах, а збільшення коефіцієнта внутрішньої рециркуляції спостерігається при зростанні концентрації синтетичних детергентів і розчинених органічних забруднюючих речовин.**

**Ключові слова:** швидкість, окиснення, технологія, очищення, стічні води, синтетичні детергенти, нітратний рецикл.

**Вступ.** Міські стічні води містять органічні забруднюючі речовини, концентрацію яких визначають показником БСК<sub>5</sub> (БСК<sub>повн</sub>), що в середньому становить 100-300 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup> [1].

Активне використання абонентами централізованого водовідведення синтетичних детергентів у виробничих чи побутових цілях призводить до їх надходження у стічні води, що транспортуються каналізаційною мережею трубопроводів на очисні споруди каналізації населених пунктів. В середньому концентрація синтетичних детергентів складає 8-25 мг/дм<sup>3</sup> при питомому водовідведенні 270-67 дм<sup>3</sup>/добу на 1 жителя [2].

Синтетичні детергенти, як амфифільні ксенобіотики, чинять негативний вплив на процеси окиснення органічних забруднюючих речовин в спорудах біологічного очищення стічних вод за рахунок локалізації субстрату, диспергування активного мулу, порушення кис-



невого режиму та пригнічення життєдіяльності мікроорганізмів активного мулу [3].

**Постановка задачі досліджень.** Для ефективного очищення міських стічних вод від органічних забруднюючих речовин і біогенних елементів їх обробку проводять в системі аноксидних (анаеробних) та аеробних біореакторів із активним мулом [4]. З метою забезпечення мікроорганізмів-денітрифікаторів необхідним субстратом, нітратами та нітритами, обробку стічних вод провадять в аноксидних біореакторах, організовуючи нітратний рецикл від біореактора з аеробними умовами [5]. Ступінь нітратного рециклу в залежності від початкової концентрації органічних забруднюючих речовин та прийнятої технології очищення стічних вод в біореакторах складає 50-500% [6].

Оцінку зміни швидкості окиснення органічних забруднюючих речовин в аеробних та аноксидних біореакторах із активним мулом в залежності від початкових концентрацій органічних забруднюючих речовин проводять за допомогою використання рівняння Моно [7, 8]. Зміна ступеня внутрішньої рециркуляції мулової суміші між аеробними та аноксидними біореакторами призводить до перерозподілу концентрації розчинених органічних забруднюючих речовин, що містяться в стічній воді.

Оцінка впливу показника внутрішньої рециркуляції мулової суміші на ефективність біологічного очищення стічних вод від органічних забруднюючих речовин з врахуванням концентрації синтетичних детергентів є актуальною відкритою науково-прикладною проблемою.

#### **Основні залежності для вирішення поставленої проблеми.**

Нехай для ефективного окиснення органічних забруднюючих речовин та видалення біогенних елементів буде застосовано послідовну обробку міських стічних вод (які пройшли механічне очищення) в аноксидних та аеробних біореакторах із нітратним рециклом (рис. 1). В цій задачі рециркуляція активного мулу з вторинних відстійників не врахована.

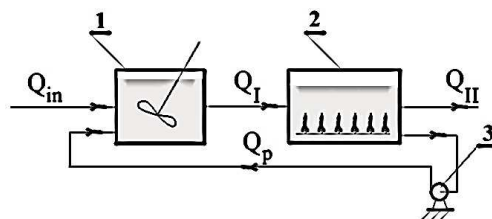


Рис. 1. Розрахункова схема біологічного очищення міських стічних вод в аноксидних та аеробних біореакторах: 1 – аноксидний біореактор; 2 – ае-

робний біореактор; 3 – рециркуляційний насос;  $Q_{in}$  – витрата стічних вод, що надходять на обробку в аноксидний біореактор;  $Q_I$  – витрата стічних вод після аноксидного біореактора;  $Q_{II}$  – витрата стічних вод від аеробного біореактора до вторинного відстійника;  $Q_p$  – внутрішньо-рециркуляційна витрата мулової суміші між аноксидним та аеробним біореакторами (нітратний рецикл)

Тоді концентрацію органічних забруднюючих речовин в стічних водах, які надходять в аноксидний біореактор, можна балансово виразити:

$$C_I^{in} = \frac{Q_{in} \cdot C_{in} + Q_p \cdot C_p}{Q_{in} + Q_p}, \quad (1)$$

де  $C_{in}$  – концентрація органічних забруднюючих речовин в стічних водах на виході з первинних відстійників, мгБСК<sub>повн</sub>/дм<sup>3</sup>;  $Q_p$  – внутрішньо-рециркуляційна витрата мулової суміші, м<sup>3</sup>/год.;  $C_p$  – концентрація органічних забруднюючих речовин в муловій суміші нітратного рециклу, мгБСК<sub>повн</sub>/дм<sup>3</sup>.

Внутрішньо-рециркуляційну витрату (нітратний рецикл) ( $Q_p$ , м<sup>3</sup>/год) можна визначити:

$$Q_p = n_n \cdot Q_{in}, \quad (2)$$

де  $n_n$  – коефіцієнт внутрішньої рециркуляції мулової суміші, част. од.

Враховуючи те, що окиснення органічних забруднюючих речовин в аноксидних біореакторах здійснюють факультативні мікроорганізми із використанням Оксигену нітритів та нітратів, концентрацію органічних забруднюючих речовин в муловій суміші після аноксидного біореактора можна визначити:

$$C_I^{ex} = C_I^{in} - \frac{dC_I}{dt} \cdot t_I(0, t_i^I), \quad (3)$$

де  $C_I$  – концентрація органічних забруднюючих речовин в муловій суміші в аноксидному біореакторі, мгБСК<sub>повн</sub>/дм<sup>3</sup>;  $t_I$  – тривалість обробки стічних вод в аноксидному біореакторі, год.

Очевидно, що концентрація органічних забруднюючих речовин в муловій суміші на виході з аноксидного біореактора ( $C_I^{ex}$ , мгБСК<sub>повн</sub>/дм<sup>3</sup>) рівна концентрації органічних забруднюючих речовин в муловій суміші на вході в аеробний біореактор ( $C_{II}^{in}$ , мгБСК<sub>повн</sub>/дм<sup>3</sup>) (рис. 1).

В аеробних біореакторах окиснення органічних забруднюючих речовин здійснюється аеробними мікроорганізмами активного мулу, тому концентрацію органічних забруднюючих речовин в муловій суміші після аеробного біореактора можна виразити:



$$C_{II}^{ex} = C_{II}^{in} - \frac{dC_{II}}{dt} \cdot t_{II}(0, t_i^{II}), \quad (4)$$

де  $C_{II}$  – концентрація органічних забруднюючих речовин в муловій суміші в аеробному біореакторі, мгБСК<sub>повн</sub>/дм<sup>3</sup>;  $t_{II}$  – тривалість обробки стічних вод в аеробному біореакторі, год.

При реновації діючих аеротенків шляхом вивільнення певного корисного об'єму аеротенків під аноксидний біореактор, тривалість обробки стічних вод ( $t_I$ , год) в аноксидному біореакторі без врахування нітратного рециклу балансово можна визначити:

$$t_I = \frac{W_I}{Q_{in}}, \quad (5)$$

де  $W_I$  – корисний об'єм аноксидного біореактора, м<sup>3</sup>.

Враховуючи витрату мулової суміші нітратного рециклу, тривалість обробки стічних вод ( $t_I^p$ , год) в аноксидному біореакторі можна виразити:

$$t_I^p = \frac{W_I}{Q_{in} + Q_p}, \quad (6)$$

де  $W_I$  – корисний об'єм аноксидного біореактора, м<sup>3</sup>.

Швидкість проходження елементарного об'єму мулової суміші в аноксидному біореакторі, враховуючи зміну витрати нітратного рециклу, можна представити як

$$\theta_I = \frac{t_I^p}{t_I} = \frac{1}{(1 + n_n)}. \quad (7)$$

Враховуючи вирази (1), (2), (3), (4) та (7), балансову систему зміни органічних забруднюючих речовин при послідовній обробці стічних вод в аноксидних та аеробних біореакторах із нітратним рециклом і без врахування рециркуляції активного мулу з вторинного відстійника можна представити:

$$\begin{cases} C_I^{in} = \frac{C_{in} + n_n \cdot C_p}{(1 + n_n)} \\ C_I^{ex} = C_I^{in} - \frac{1}{(1 + n_n)} \cdot \frac{dC_I}{dt} \cdot t_I(0, t_i^I) \\ C_{II}^{in} = C_I^{ex} \\ C_{II}^{ex} = C_{II}^{in} - \frac{1}{(1 + n_n)} \cdot \frac{dC_{II}}{dt} \cdot t_{II}(0, t_i^{II}) \end{cases} \quad (8)$$

Слід зауважити, що питому швидкість окиснення органічних забруднюючих речовин в біореакторах з аноксидними та аеробними

умовами можна визначати за рівнянням Моно, яке враховує інгібування процесів біологічного окиснення органічних забруднюючих речовин синтетичними детергентами [9]:

$$\left| \begin{aligned} \frac{dC_{II}}{a_i \cdot dt} &= \rho_{\max H} \cdot \beta_H \cdot b_H \cdot \frac{L_S}{K_s + L_S} \cdot \frac{C_o}{K_o + C_o} \cdot \frac{K_{surf}}{K_{surf} + C_{surf}} \\ \frac{dC_I}{a_i \cdot dt} &= \rho_{\max H} \cdot \beta_H \cdot b_H \cdot \frac{L_S}{K_s + L_S} \cdot \frac{L_{NO_3}}{K_{NO_3} + L_{NO_3}} \cdot \frac{K_o}{K_o + C_o} \cdot \frac{K_{surf}}{K_{surf} + C_{surf}} \end{aligned} \right. , \quad (9)$$

де  $\rho_{\max}$  – максимальна швидкість окиснення субстрату активним мулом, мгБСК<sub>повн</sub>/(г·год.);  $C_o$  – концентрація розчиненого кисню в муловій суміші, мгO<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>;  $a_i$  – доза активного мулу, г/дм<sup>3</sup>;  $b_H$  – коефіцієнт, що враховує лізис мікроорганізмів активного мулу, част. од.;  $K_o$  – константа напівнасичення за Оксигеном, мгO<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>;  $L_s$  – концентрація органічних забруднюючих речовин, мгБСК<sub>повн</sub>/дм<sup>3</sup>;  $\beta_H, \beta_A$  – відповідно, частка гетеротрофних, автотрофних мікроорганізмів в активному мулі, част. од.;  $L_{NO_3}$  – концентрація нітратів, мгN-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/дм<sup>3</sup>;  $K_{NO_3}$  – константа напівнасичення за нітратами, мгN-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/дм<sup>3</sup>;  $K_s$  – константа напівнасичення за субстратом, мгБСК<sub>повн</sub>/дм<sup>3</sup>;  $K_{surf}$  – константа інгібування за синтетичними детергентами, мг/дм<sup>3</sup>;  $C_{surf}$  – концентрація синтетичних детергентів, мг/дм<sup>3</sup>.

**Результати проведеного експерименту.** Для стічних вод, що містять розчинені органічні забруднюючі речовини в концентрації  $C_{in} = 300$  мгБСК<sub>повн</sub>/дм<sup>3</sup> та надходять на послідовну обробку в аноксидному й аеробному біореакторах, виконано комплексний чисельний експеримент з оцінки залежності концентрації органічних забруднюючих речовин від тривалості обробки в аеробних умовах та коефіцієнта внутрішньої рециркуляції мулової суміші при дозі мулу  $a_i = 2$  г/дм<sup>3</sup>,  $\rho_{\max} = 85$  мгБСК<sub>повн</sub>/дм<sup>3</sup>;  $K_o = 0,625$  мгO<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>,  $\beta_H = 0,4$ ,  $b_H = 0,62$ , концентрації розчиненого Оксигену в муловій суміші аноксидного біореактора  $0,1$  мгO<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, концентрації розчиненого Оксигену в муловій суміші аеробного біореактора  $2$  мгO<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, концентрації нітратів в муловій суміші  $5$  мгN-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/дм<sup>3</sup> (рис. 2).

В результаті проведеного чисельного експерименту встановлено, що збільшення тривалості обробки стічних вод в аеробних біореакторах дозволяє застосувати менші коефіцієнти внутрішньої рециркуляції мулової суміші для ефективного видалення зі стічних вод органічних забруднюючих речовин.

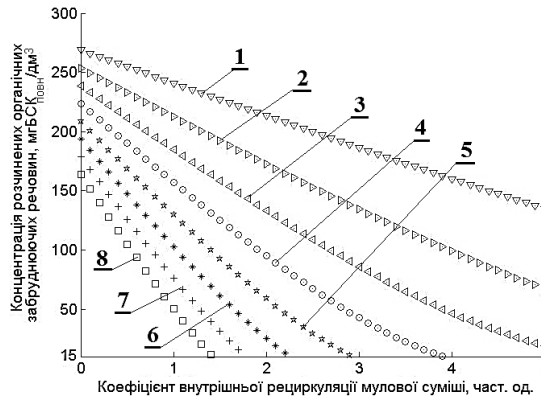


Рис. 2. Залежності концентрації розчинених органічних забруднюючих речовин за БСК<sub>повн</sub> від коефіцієнта внутрішньої рециркуляції мулової суміші та тривалості обробки в аноксидних (0,5 год.) та аеробних біореакторах: 1 – 0,5 год; 2 – 1 год; 3 – 1,5 год; 4 – 2 год; 5 – 2,5 год; 6 – 3 год; 7 – 3,5 год; 8 – 4 год

Ступінь видалення органічних забруднюючих речовин також залежить і від тривалості обробки стічних вод в аноксидних умовах (рис. 3).

В результаті чисельного експерименту встановлено, що збільшення тривалості обробки стічних вод в аноксидних умовах, наприклад, в два рази, дозволяє ефективно видаляти органічні забруднюючі речовини зі стічних вод при зниженні значення коефіцієнта рециркуляції до 48% (рис. 3).

На ступінь видалення органічних забруднюючих речовин також впливає концентрація нітратів в муловій суміші, що надходить до аноксидного біореактора від аеробного за рахунок нітратного рециклу (рис. 4).

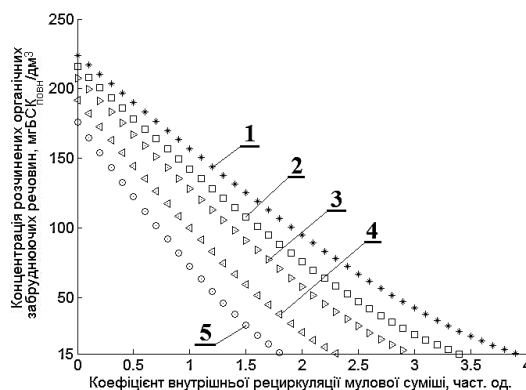


Рис. 3. Залежності концентрації розчинених органічних забруднюючих речовин за БСК<sub>повн</sub> від коефіцієнта внутрішньої рециркуляції мулової суміші та тривалості обробки в аеробних (2 год) та аноксидних біореакторах (год): 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 1,5; 4 – 2

За результатами проведеного експерименту встановлено, що збільшення концентрації нітратів в аноксидному реакторі, наприклад в 10 разів (з 1 мг/дм<sup>3</sup> до 10 мг/дм<sup>3</sup>), призводить до зростання ступеня видалення органічних забруднюючих речовин зі стічних вод при зменшенні значення коефіцієнта внутрішньої рециркуляції до 16% (рис. 4).

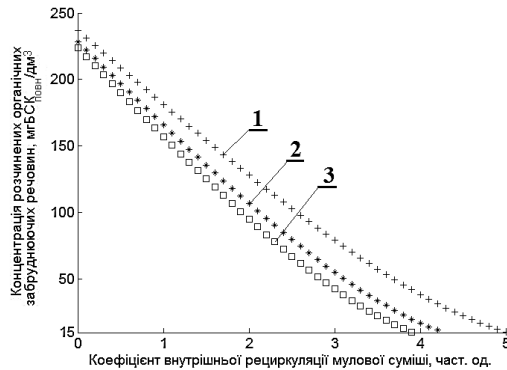


Рис. 4. Залежності концентрації розчинених органічних забруднюючих речовин за БСК<sub>повн</sub> при тривалості обробки в аеробних (2 год) та аноксидних (0,5 год) біореакторах від коефіцієнта внутрішньої рециркуляції мулової суміші та концентрації нітратів в муловій суміші (мгN-NO<sub>3</sub><sup>-1</sup>/дм<sup>3</sup>):  
1 – 0,1; 2 – 1; 3 – 10

Оцінку ступеня видалення органічних забруднюючих речовин проведено шляхом чисельного експерименту, відповідно до (8) та (9), при концентрації нітратів в муловій суміші 5 мгN-NO<sub>3</sub><sup>-1</sup>/дм<sup>3</sup> та зміні концентрації синтетичних детергентів в стічній воді від 0 до 20 мг/дм<sup>3</sup> (рис. 5).

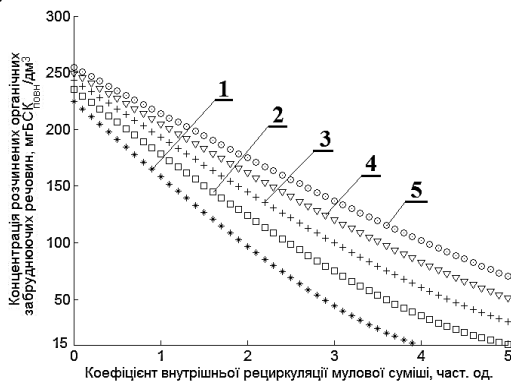


Рис. 5. Залежності концентрації розчинених органічних забруднюючих речовин за БСК<sub>повн</sub> при тривалості обробки в аеробних (2 год) та аноксидних (0,5 год) біореакторах від коефіцієнта внутрішньої рециркуляції мулової суміші та концентрації синтетичних детергентів в муловій суміші (мг/дм<sup>3</sup>):  
1 – 0; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 15; 5 – 20



За результатами проведеного експерименту встановлено, що зростання концентрації синтетичних детергентів призводить до необхідності збільшення коефіцієнта внутрішньої рециркуляції для досягнення повного біологічного очищення стічних вод (рис. 5). Так, зростання концентрації синтетичних детергентів з 0 до 10 мг/дм<sup>3</sup> потребує збільшення значення коефіцієнта внутрішньої рециркуляції до 45%.

**Обговорення результатів.** За результатами комплексного чисельного експерименту з очищення стічних вод, що містять синтетичні детергенти, від органічних забруднюючих речовин в біореакторах із аноксидними й аеробними умовами встановлено, що досягнення повного біологічного очищення стічних вод забезпечується збільшенням коефіцієнта внутрішньої рециркуляції, зростанням тривалості обробки стічних вод в біореакторах. Зростання концентрації синтетичних детергентів негативно відображається на процесах біологічного очищення стічних вод від органічних забруднюючих речовин і призводить до необхідності збільшення коефіцієнта внутрішньої рециркуляції.

**Висновки.** Зростання ефективності біологічного очищення стічних вод від органічних забруднюючих речовин досягається за рахунок збільшення коефіцієнта внутрішньої рециркуляції, враховуючи інгібування синтетичними детергентами процесів біологічного очищення в біореакторах із різними кисневими умовами. Однак, повна оцінка ступеня очищення стічних вод від органічних забруднюючих речовин в біореакторах із різними кисневими умовами поруч із врахуванням показника нітратного рециклу потребує врахування коефіцієнта рециркуляції активного мулу з вторинного відстійника.

1. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2010 р. / Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. – К., 2011. – 564 с.
2. ДБН В.2.5–75:2013 «Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування». – К. : Мінрегіонбуд, 2013. – 210 с.
3. Россінський В. М. Інтенсифікація біологічного очищення стічних вод, що містять поверхнево-активні речовини / Россінський В. М., Саблій Л. А. // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки : Науково-технічний збірник. Випуск 25 / Головний редактор О. С. Волошкіна. – К. : КНУБА, 2015. – С. 232-238.
4. Rossinskyi V. M., Sablii L. A. Effect of Surfactants on Denitrification in Biological Municipal Wastewater Treatment // The 8 th Eastern European Young Water Professionals Conference : Leaving the Ivory Tower Bridging the Gap between Academia, Industry, Services and Public Sector. Book of abstracts / 11–14 May 2016, Gdańsk; Oficyna Wydawnicza



Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2016. – P. 249–250. **5.** Henze M. et al. (2013). Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes, Springer: Berlin, Heidelberg. **6.** Василенко О. А. Впровадження технології біологічної очистки стічних вод від сполук азоту і фосфору на міських очисних спорудах / Василенко О. А., Поліщук О. В., Василенко Л. О. // Екологічна безпека та природокористування. 2014. Вип. 15. С. 90–101. **7.** Henze M., Grady C.P.L., Jr., Gujer W., Marais G.V.R., Matsuo T., 1987. Activated Sludge Model No. 1. IAWQ Scientific and Technical Report No. 1, London, UK. **8.** Олійник О. Я. Моделювання очистки стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аеротенках зі зваженим (вільноплаваючим) і закріпленим біоценозом / Олійник О. Я., Айрапетян Т. С. // Доповіді Національної академії наук України. – 2015. – № 5. – С. 55–60. **9.** Россінський В. М. Моделювання очищення стічних вод в аеробних та аноксидних біореакторах в присутності синтетичних детергентів / Россінський В. М., Саблій Л. А. // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки : Науково-технічний збірник. Випуск 27 / Головний редактор А. М. Кравчук. – К. : КНУБА, 2016. – С. 302–311.

Рецензент: д.т.н., професор Ковальчук В. А. (НУВГП)

---

**Rossinskyi V. M., Postdoctoral Fellow, Sablii L. A., Doctor of Engineering, Professor** (National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv)

## **EFFECT OF NITRATE RECYCLE AND SYNTHETIC DETERGENTS ON THE EFFICIENCY OF BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT**

**The results of complex numerical experiment on quantitative parameters of the processes of biological treatment of wastewater containing synthetic detergents from organic compounds in anoxic and aerobic bioreactors are presented, taking into account the rate of nitrate recycle. The decrease the internal recycle rate increase the time of wastewater treatment in the bioreactors for achieve complete biological wastewater treatment, but increase the rate of internal recirculation in increase concentrations of synthetic detergents and dissolved organic pollutants is showed.**

**Keywords:** velocity, oxidation, technology, treatment, wastewater, surfactants, nitrate recycle.

---



**Россинский В. Н., докторант, Саблий Л. А., д.т.н., профессор** (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев)

## **ВЛИЯНИЕ НИТРАТНОГО РЕЦИКЛА И СИНТЕТИЧЕСКИХ ДЕТЕРГЕНТОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

Приведены результаты комплексного численного эксперимента по оценке количественных параметров процессов биологической очистки сточных вод, содержащих синтетические детергенты, от органических загрязняющих веществ в аноксидных и аэробных биореакторах с учетом степени нитратного рецикла. Показано, что для достижения полной биологической очистки сточных вод, уменьшение коэффициента внутренней рециркуляции требует увеличения продолжительности обработки сточных вод в биореакторах, а увеличение коэффициента внутренней рециркуляции наблюдается при росте концентрации синтетических детергентов и растворенных органических загрязняющих веществ.

*Ключевые слова:* скорость, окисление, технология, очистка, сточная вода, синтетические детергенты, нитратный рецикл.

---