

В.М. РОССІНСЬКИЙ, кандидат технічних наук
Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИБІР ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ БІОРЕАКТОРІВ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД І СИМУЛЬТАННОГО ВИДАЛЕННЯ СПОЛУК АЗОТУ

Наведено результати комплексного чисельного експерименту з встановлення технологічних параметрів роботи біореакторів із різними кисневими умовами для біологічного очищення стічних вод й видалення з них сполук азоту. Приведені аналітичні залежності дозволяють ітераційно встановити технологічні параметри роботи біореакторів із аноксидними та аеробними умовами: тривалість обробки стічних вод, коефіцієнт внутрішньої рециркуляції. Показано, що за сталості обробки стічних вод в аноксидних умовах 0,5 год., в аеробних умовах 2 год., початкової концентрації амонійного азоту $30 \text{ мгN-NH}_4^+/\text{дм}^3$, та при збільшенні концентрації розчинених органічних забруднюючих речовин в стічних водах з $150 \text{ мгБСК}_{\text{повн}}/\text{дм}^3$ до $250 \text{ мгБСК}_{\text{повн}}/\text{дм}^3$ для забезпечення умови повного біологічного очищення стічних вод раціональним є збільшення початкового коефіцієнта внутрішньої рециркуляції до 52%.

Ключові слова: ПАР, стічні води, технологія, очищення, нітратний рецикл.

Приведены результаты комплексного численного эксперимента по определению технологических параметров работы биореакторов с разными кислородными условиями для биологической очистки сточных вод и удаления из них соединений азота. Приведенные аналитические зависимости позволяют итерационно определить технологические параметры работы биореакторов с аноксидными и аэробными условиями: продолжительность обработки сточных вод, коэффициент внутренней рециркуляции иловой смеси. Показано, что при постоянстве продолжительности обработки сточных вод в аноксидных условиях 0,5 ч., аэробных условиях 2 ч., начальной концентрации аммонийного азота $30 \text{ мгN-NH}_4^+/\text{дм}^3$, и при увеличении концентрации растворенных органических веществ в сточной воде с $150 \text{ мгБСК}_{\text{полн}}/\text{дм}^3$ до $250 \text{ мгБСК}_{\text{полн}}/\text{дм}^3$ для обеспечения условия полной биологической очистки сточных вод следует увеличить начальный коэффициент внутренней рециркуляции иловой смеси до 52%.

Ключевые слова: ПАВ, сточные воды, технология, очистка, нитратный рецикл.

The results of a complex numerical experiment to determine the technological parameters of the bioreactors with different oxygen conditions for biological wastewater treatment and removal of nitrogen compounds are presented in the article. The analytical dependencies are allowed iteratively determine the technological parameters of the bioreactors with anoxic and aerobic conditions: the duration of wastewater treatment, the coefficient of internal recirculation of the sludge mixture. For the persistent duration of wastewater treatment under anoxic conditions of 0.5 h., aerobic conditions of 2 h., an initial concentration of ammonium nitrogen in 30 mgN-NH₄⁺/l, and with increase the concentration of dissolved organic compounds in wastewater from 150 mgBOD_{total}/l to 250 mgBOD_{total}/l, for ensure the full biological treatment of wastewater is showed, the initial internal recirculation ratio of the sludge mixture should be increased to 52%.

Keywords: surfactants, wastewater, technology, treatment, internal recirculation rate.

Постановка проблеми

Поступове зниження водоспоживання абонентами централізованого водопостачання призводить до збільшення середньої очікуваної концентрації забруднюючих домішок, що надходять зі стічними водами на споруди каналізації населених пунктів. Міські стічні води містять завислі речовини 147,3...468,2 мг/дм³, сполуки азоту 13,2...63,68 мг/дм³. Показник БСК₅ міських стічних вод в середньому складає 100...300 мгО₂/дм³ [1]. За питомого водовідведення 270...67 дм³/добу на 1 жителя середня очікувана концентрація синтетичних поверхнево-активних речовин (синтетичних детергентів) в стічних водах, що надходять на централізовані очисні споруди каналізації, складає 8...25 мг/дм³ [2]. Наявність синтетичних детергентів, як поверхнево-активних речовин, негативно відображається на процесах денітрифікації стічних вод, за рахунок локалізації розчиненого субстрату і пригнічення життєдіяльності мікроорганізмів активного мулу [3, 4]. Згідно досліджень Schink (1987) та Wagener (1987) алкілбензенсульфонат натрію та алкілсульфонати із концентрацією більше 10 мг/дм³ в муловій суміші важко окиснюються й інгібують продукування СН₄ [5]. Наявність в стічній воді алкілбензенсульфонат натрію, лаурилсульфатів, октилфенол етоксилатів в концентрації 10-15 мг/дм³ призводить до лізису метаногенових бактерій [6]. Питома маса алкілбензенсульфонат натрію на 1 г сухої речовини активного мулу в пробах осадів міських стічних вод складає в середньому 0,05...18,8 мг/г [7].

Ефективність видалення аніонних та нейоногенних детергентів зі стічних вод в спорудах біологічного очищення сягає 90% [8]. Додецилсульфат натрію з концентрацією 25 мг/дм³ піддається біодеструкції до 80% через 50 годин [9]. Біодеструкція неіоногенних синтетичних детергентів (Твеен 80) складає 17,8% через 20 діб [10]. Однак, відносно повільна кінетика біодеструкції синтетичних детергентів та малі їх концентрації в проясненій

стічній воді після вторинного відстійника [11] вказують на високу сорбційну здатність активного мулу за синтетичними детергентами [12].

Влаштування очисних споруд каналізації населених пунктів дозволяє забезпечити зниження концентрацій забруднюючих домішок, що містяться в стічних водах, та унеможливити потрапляння їх у водні об'єкти із наднормативними кількостями. Для ефективного очищення міських стічних вод від розчинених органічних забруднюючих речовин і біогенних елементів застосовують технологію біологічного очищення стічних вод у біореакторах із різними кисневими умовами (аноксидними, аеробними).

Ефективне біологічне очищення стічних вод є функцією від технологічних параметрів роботи біореакторів і вторинних відстійників, фізико-хімічних показників стічної води. Зміна ступеня внутрішньої рециркуляції мулової суміші між аеробними та аноксидними біореакторами (нітратний рецикл) призводить до перерозподілу концентрації розчинених органічних забруднюючих речовин, що містяться в стічній воді. Зміна коефіцієнта внутрішньої рециркуляції мулової суміші призводить до зміни регульовального корисного об'єму біореакторів. Тому, встановлення раціональних технологічних параметрів роботи біореакторів із різними кисневими умовами (тривалості обробки стічних вод, коефіцієнта внутрішньої рециркуляції) з метою досягнення необхідного ступеня біологічного очищення стічних вод від органічних забруднюючих речовин з врахуванням концентрації синтетичних детергентів, нітратів і ступеня рециркуляції активного мулу з вторинного відстійника є актуальною відкритою науково-прикладною проблемою.

Мета роботи полягає в оцінці впливу кінетичних показників процесів окиснення та відновлення забруднюючих домішок, що містяться в стічних водах, гідродинамічних параметрів біореакторів на вибір технологічних параметрів роботи споруд біологічного очищення стічних вод із симультанним видаленням сполук азоту.

Основна частина

З метою встановлення раціональних технологічних параметрів роботи біореакторів із зваженим біоценозом та різними кисневими умовами поставлено комплексний чисельний експеримент з ефективного окиснення органічних забруднюючих речовин та симультанного видалення сполук азоту при послідовній обробці міських стічних вод (які пройшли механічне очищення) в аноксидних і аеробних біореакторах із нітратним рециклом і рециркуляцією активного мулу з вторинного відстійника (рис. 1).

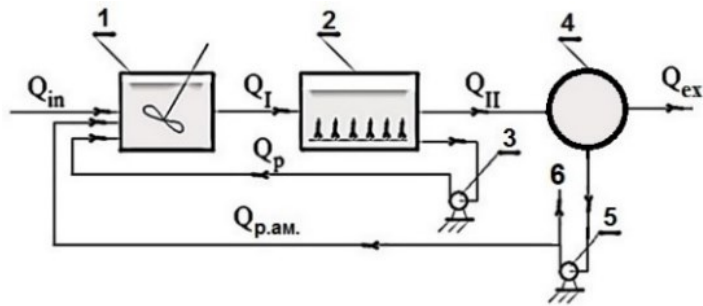


Рис. 1. Розрахункова схема біологічного очищення міських стічних вод в аноксидних і аеробних біореакторах: 1 – аноксидний біореактор; 2 – аеробний біореактор; 3 – рециркуляційний насос; 4 – вторинний відстійник; 5 – рециркуляційний насос активного мулу; 6 – трубопровід відведення надлишкового активного мулу; 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 (нітратний рецикл); $Q_{p.ам.}$ – рециркуляційна витрата активного мулу; Q_{ex} – витрата очищених стічних вод на виході з вторинного відстійника

Систему рівнянь, відповідно до рис.1, що ітераційно описує зміну концентрації розчинених органічних забруднюючих речовин при послідовній обробці стічних вод в аноксидних і аеробних біореакторах із нітратним рециклом і з врахуванням рециркуляції активного мулу з вторинного відстійника, можна представити таким чином

$$\begin{cases} C_I^{in} = \frac{C_{mix} + n_n \cdot C_p}{(1 + n_n)}; \quad Q_p = n_n \cdot Q_{in}; \quad C_{mix} = \frac{C_{in} + C_{ex} \cdot R}{1 + R}; \quad R = \frac{a_i}{\frac{1000}{J_i} - a_i}; \\ C_I^{ex} = C_I^{in} - \frac{1}{(1 + n_n)} \cdot \frac{dC_I}{dt} \cdot t_I(0, t_I^I); \quad C_{II}^{in} = C_I^{ex}; \quad C_{II}^{ex} = C_{II}^{in} - \frac{1}{(1 + n_n)} \cdot \frac{dC_{II}}{dt} \cdot t_{II}(0, t_{II}^{II}); \end{cases} \quad (1)$$

де C_{in} – концентрація органічних забруднюючих речовин у стічних водах на вході в аноксидний біореактор, мгБСК_{повн}/дм³; C_{ex} – концентрація органічних забруднюючих речовин в очищених стічних водах на виході з вторинних відстійників, мгБСК_{повн}/дм³; C_p – концентрація органічних забруднюючих речовин у муловій суміші нітратного рециклу, мгБСК_{повн}/дм³; C_{mix} – концентрація органічних забруднюючих речовин у суміші стічних вод та активного мулу, мгБСК_{повн}/дм³; n_n – коефіцієнт внутрішньої рециркуляції мулової суміші, част. од.; C_I – концентрація органічних забруднюючих речовин у муловій суміші в аноксидному біореакторі, мгБСК_{повн}/дм³; t_I – тривалість обробки стічних вод в аноксидному біореакторі, год.; C_{II} – концентрація органічних забруднюючих речовин у муловій суміші в аеробному біореакторі, мгБСК_{повн}/дм³; t_{II} – тривалість обробки стічних вод в аеробному біореакторі, год.; J_i – муловий індекс, см³/г; R – коефіцієнт рециркуляції активного мулу, част. од.

Для визначення кінетики окиснення органічних забруднюючих речовин в біореакторах із аноксидними та аеробними умовами слід використовувати

залежності, які запропоновані Олійником О. Я. та Айрапетян Т. С. [13]. Однак, для врахування інгібування синтетичними детергентами процесів біологічного окиснення розчинених органічних речовин було використано рівняння Моно, записане для умови окиснення органічних забруднюючих речовин мікроорганізмами активного мулу, враховуючи лімітування за органічним субстратом, концентрацією розчиненого кисню в муловій суміші [14].

Для стічних вод, що містять розчинені органічні забруднюючі речовини в концентрації $C_{in} = 300 \text{ мгБСК}_{\text{повн}}/\text{дм}^3$ та надходять на послідовну обробку в аноксидному й аеробному біореакторах, виконано комплексний чисельний експеримент з оцінки залежності концентрації органічних забруднюючих речовин від дози активного мулу в аеробних та аноксидних біореакторах, коефіцієнта внутрішньої рециркуляції мулової суміші за концентрації розчиненого кисню в біореакторах: аноксидному - $0,1 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$, аеробному – $2 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$; тривалості обробки стічних вод в біореакторі: аноксидному – 0,5 год., аеробному – 2 год.; концентрації нітратів $5 \text{ мгN-NO}_3^{-1}/\text{дм}^3$; мулового індексу – $80 \text{ см}^3/\text{г}$ і за відсутності в стічних водах синтетичних детергентів (рис. 2.а).

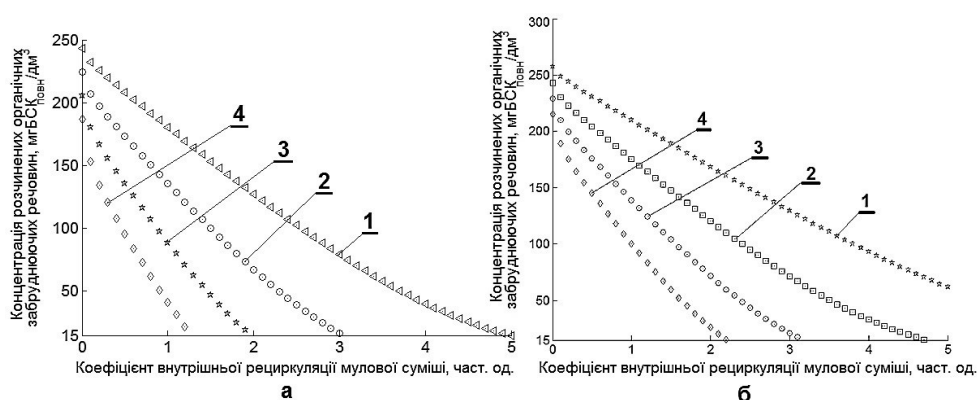


Рис. 2. Залежності концентрації розчинених органічних забруднюючих речовин за БСК_{повн} від коефіцієнта внутрішньої рециркуляції мулової суміші без (а) і за концентрації синтетичних детергентів $10 \text{ мг}/\text{дм}^3$ (б) при дозі активного мулу в аеробних та аноксидних біореакторах ($\text{г}/\text{дм}^3$): 1 – 1,5; 2 – 2; 3 – 2,5; 4 – 3

В результаті проведеного експерименту підтверджено, що збільшення дози мулу знижує загальну тривалість обробки стічних вод у біореакторах. Встановлено, що збільшення дози активного мулу в біореакторах з $1,5 \text{ г}/\text{дм}^3$ до $2,5 \text{ г}/\text{дм}^3$ дозволяє досягти повного біологічного очищення стічних вод, знижуючи ступінь рециркуляції – 300% на 57%. За наявності в стічних водах синтетичних детергентів ($10 \text{ мг}/\text{дм}^3$) (рис. 2.б) при константі напівнасичення за синтетичними детергентами $30 \text{ мг}/\text{дм}^3$ шляхом проведеного експерименту встановлено, що збільшення дози активного мулу в біореакторах з $1,5 \text{ г}/\text{дм}^3$ до $2,5 \text{ г}/\text{дм}^3$ призводить до необхідності зменшення коефіцієнта внутрішньої рециркуляції мулової суміші на 54% для досягнення умови повного біологічного очищення стічних вод, однак при цьому зростає значення

коефіцієнта внутрішньої рециркуляції на 39% порівняно зі стічною водою, яка не містить синтетичних детергентів.

При зниженні концентрації розчинених органічних забруднюючих речовин (менше $100 \text{ мгБСК}_{\text{повн}}/\text{дм}^3$) в муловій суміші має місце початок окиснення сполук амонійного азоту (нітрифікація) в біореакторах із аеробними умовами та утворенням нітритів та нітратів. Приріст концентрації нітратів в муловій суміші в аноксидному біореакторі за рахунок нітратного рециклу лімітує кінетику стадій окиснення розчинених органічних речовин. За початкової концентрації амонійного азоту $30 \text{ мгN-NH}_4^+/\text{дм}^3$ в стічних водах, які також містять розчинені органічні забруднюючі речовини в концентрації $C_{in} = 300 \text{ мгБСК}_{\text{повн}}/\text{дм}^3$ проведено чисельний експеримент з оцінки залежності концентрації органічних забруднюючих речовин від коефіцієнта внутрішньої рециркуляції мулової суміші за концентрації розчиненого кисню в біореакторах: аноксидному - $0,1 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$, аеробному – $2 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$; тривалості обробки стічних вод в біореакторі: аноксидному – $0,5 \text{ год.}$, аеробному – 2 год. ; мулового індексу – $80 \text{ см}^3/\text{г}$, константі напівнасичення за синтетичними детергентами $30 \text{ мг}/\text{дм}^3$, концентрації нітратів $5 \text{ мгN-NO}_3^-/\text{дм}^3$.

При послідовній обробці стічних вод в біореакторах із аноксидними та аеробними умовами шляхом чисельного експерименту підтверджено, що зі збільшенням концентрації розчинених органічних забруднень в стічних водах відтермінується момент початку нітрифікації в аеробних біореакторах (рис. 3).

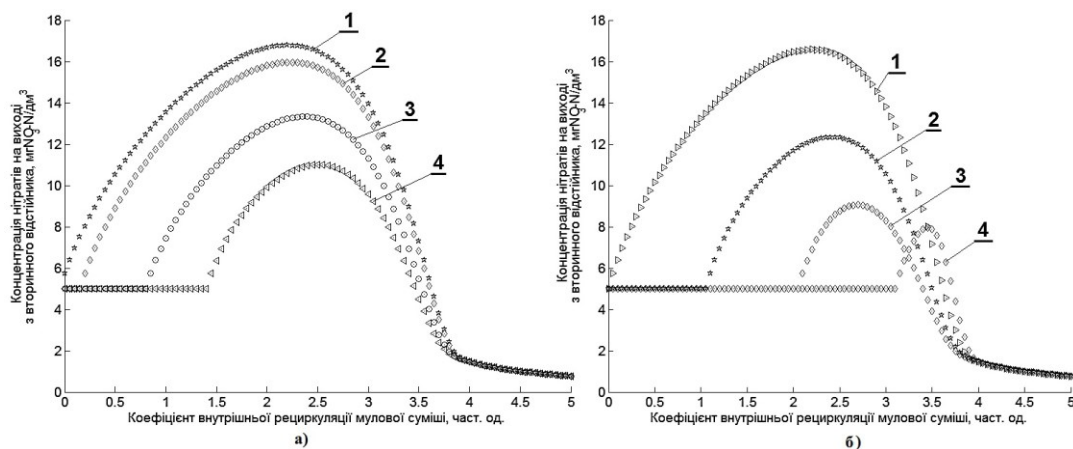


Рис. 3. Залежності концентрації нітратів в очищеній стічній воді на виході з вторинного відстійника ($\text{мгNO}_3\text{-N}/\text{дм}^3$) від коефіцієнта внутрішньої рециркуляції мулової суміші (част. од.) при тривалості обробки стічних вод в аноксидному біореакторі $0,5 \text{ год.}$, аеробному біореакторі 2 год. , дозі мулу $2 \text{ г}/\text{л}$, та початкової концентрації розчинених органічних речовин ($\text{мгБСК}_{\text{повн}}/\text{дм}^3$): 1 – 150; 2 – 200; 3 – 250; 4 – 300; та концентрації синтетичних детергентів 0 (а) та $20 \text{ мг}/\text{дм}^3$ (б)

Визначено, що для інтенсифікації окиснення органічних забруднюючих домішок, початку нітрифікації при тривалості обробки стічних вод в аеробних 2 год. та аноксидних $0,5 \text{ год.}$ умовах та збільшенні концентрації органічних забруднень з $200 \text{ мгБСК}_{\text{повн}}/\text{дм}^3$ до $300 \text{ мгБСК}_{\text{повн}}/\text{дм}^3$ необхідно збільшити

коефіцієнт внутрішньої рециркуляції з 0,3 до 1,5 (рис. 3), а за наявності в стічних водах синтетичних детергентів (20 мг/дм^3) – збільшити з 1 до 3,3.

Враховуючи кінетику відновлення нітратів в аноксидних умовах [3], для зменшення концентрації амонійного азоту до $5 \text{ мгN-NH}_4^+/\text{дм}^3$ в стічних водах за початкової концентрації $30 \text{ мгN-NH}_4^+/\text{дм}^3$ при збільшенні концентрації органічних забруднень з $200 \text{ мгБСК}_{\text{повн}}/\text{дм}^3$ до $300 \text{ мгБСК}_{\text{повн}}/\text{дм}^3$, та тривалості обробки стічних вод в аеробних 2 год. та аноксидних 0,5 год. умовах, шляхом чисельного експерименту встановлено, що коефіцієнт внутрішньої рециркуляції необхідно забезпечити 1,9 (рис. 4), а за наявності в стічних водах синтетичних детергентів (20 мг/дм^3) – збільшити з 1,8 до 3,3.

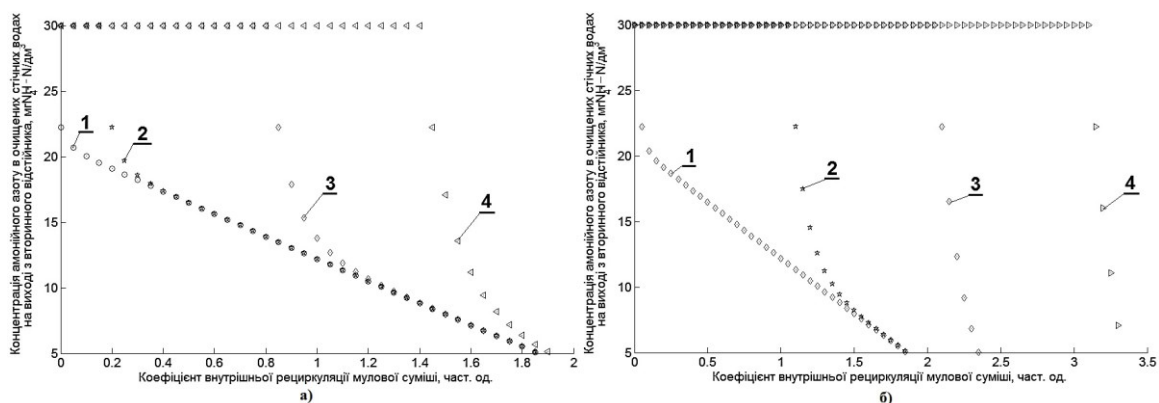


Рис. 4. Залежності концентрації амонійного азоту в очищених стічних водах на виході з вторинного відстійника від коефіцієнта внутрішньої рециркуляції мулової суміші (част. од.) при тривалості обробки стічних вод в аноксидному біореакторі 0,5 год., аеробному біореакторі 2 год., дозі мулу 2 г/л та початкової концентрації розчинених органічних речовин ($\text{мгБСК}_{\text{повн}}/\text{дм}^3$): 1 – 150; 2 – 200; 3 – 250; 4 – 300; та концентрації синтетичних детергентів 0 (а) та 20 мг/дм^3 (б)

За наявності в стічних водах синтетичних детергентів (20 мг/дм^3) та при збільшенні концентрації розчинених органічних забруднюючих речовин в стічних водах з $150 \text{ мгБСК}_{\text{повн}}/\text{дм}^3$ до $250 \text{ мгБСК}_{\text{повн}}/\text{дм}^3$ потребує збільшення коефіцієнта внутрішньої рециркуляції мулової суміші з 2,5 до 5,3 для досягнення умови повного біологічного очищення стічних вод (рис. 5). Проте для стічної води, яка не містить синтетичних детергентів значення коефіцієнта внутрішньої рециркуляції необхідно збільшити з 0,8 до 2,3.

Отже, врахування концентраційного навантаження на активний мул за розчиненими органічними забруднюючими речовинами, концентрації сполук азоту в стічних водах, кінетики окиснення та відновлення забруднюючих речовин мікроорганізмами активного мулу, гідродинаміки роботи біореакторів з різними кисневими умовами, показників забруднюючих речовин в очищених стічних водах, дозволяє отримати раціональні значення технологічних параметрів роботи біореакторів із різними кисневими умовами: тривалості обробки стічних вод в біореакторах, коефіцієнта внутрішньої рециркуляції мулової суміші між аеробними та аноксидними біореакторами.

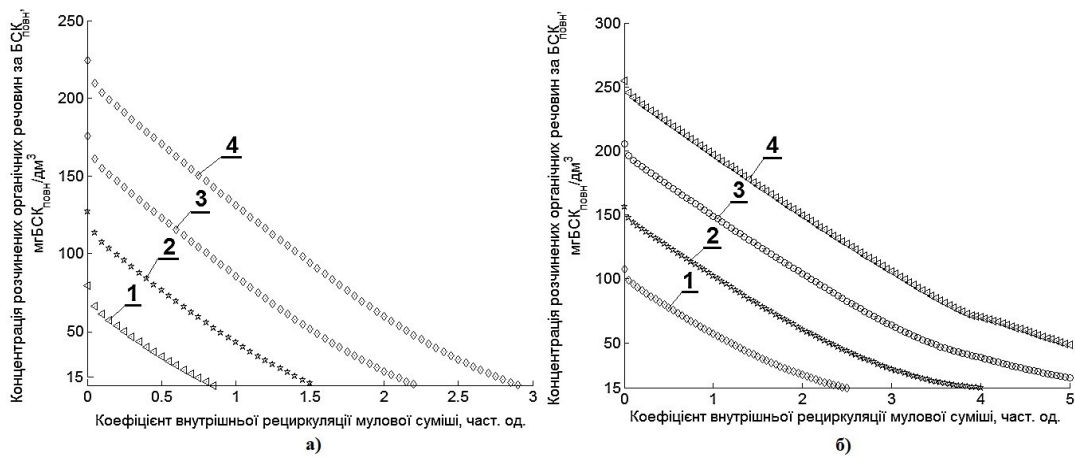


Рис. 5. Залежності концентрації розчинених органічних речовин за БСК_{повн} в очищених стічних водах на виході з вторинного відстійника від коефіцієнта внутрішньої рециркуляції мулової суміші (част. од.) при тривалості обробки стічних вод в аноксидному біореакторі 0,5 год., аеробному біореакторі 2 год., дозі мулу 2 г/л та початкової концентрації розчинених органічних речовин (мгБСК_{повн}/дм³): 1 – 150; 2 – 200; 3 – 250; 4 – 300; та концентрації синтетичних детергентів 0 (а) та 20 мг/дм³ (б)

Висновки

Для досягнення умов повного біологічного очищення стічних вод шляхом їх послідовної обробки в біореакторах із аноксидними та аеробними умовами ефективним є управління технологічними параметрами роботи біореакторів: тривалістю обробки стічних вод, коефіцієнтом внутрішньої рециркуляції мулової суміші.

Для інтенсифікації окиснення органічних забруднюючих речовин, початку нітрифікації при послідовній обробці стічних вод в аноксидних та аеробних біореакторах із зваженим біоценозом раціональним є збільшення коефіцієнта внутрішньої рециркуляції.

Встановлено, що за сталості обробки стічних вод в аноксидних умовах 0,5 год., в аеробних умовах 2 год., початкової концентрації амонійного азоту 30 мгN-NH₄⁺/дм³, при збільшенні концентрації розчинених органічних забруднюючих речовин в стічних водах з 150 мгБСК_{повн}/дм³ до 250 мгБСК_{повн}/дм³ для забезпечення умови повного біологічного очищення стічних вод та із симультанного видалення сполук азоту потребує збільшення коефіцієнта внутрішньої рециркуляції мулової суміші до 52%.

Список літератури

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. С. 564.
2. *ДБН В.2.5–75:2013 Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування.* К.: Мінрегіонбуд, 2013. 210 с.
3. *Россінський В.М.* Вплив поверхнево-активних речовин на процеси денітрифікації при біологічному очищенні міських стічних вод / В. М.

Россінський, Л. А. Саблій // Комунальне господарство міст : науково-технічний збірник. Вип. 126 – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. С. 32-36.

4. *Dereszewska A., Cytawa S., Tomczak-Wandzel R., Medrzycka K.* The Effect of Anionic Surfactant Concentration on Activated Sludge Condition and Phosphate Release in Biological Treatment Plant // *Pol. J. Environ. Stud.* Vol. 24, No. 1 (2015). P. 83-91.

5. *Wagener, S. and Schink, B.* (1987). Anaerobic degradation of nonionic and anionic surfactants in enrichment cultures and fixed-bed reactors. *Water Res.* 21: 615-622.

6. *Salanitro, J. P., & Diaz, L. A.* (1995). Anaerobic biodegradability testing of surfactants. *Chemosphere*, 30(5), 813-830.

7. *Holt, M.S. and Bernstein, S.L.* (1992). Linear alkylbenzenes in sewage sludges and sludge amended soils. *WaterRes.* 26: 613-624.

8. *Zhang, C., Valsaraj, K. T., Constant, W. D. & Roy, D.* (1999). Aerobic biodegradation kinetics of four anionic and nonionic surfactants at sub-and supra-critical micelle concentrations (CMCs). *Water Research*, 33(1), 115-124.

9. *Anderson, D.J., Day, M.J., Russell, N.J. and White, G.F* (1990). Dieaway kinetic analysis of the capacity of epilithic and planktonic bacteria from clean and polluted river water to biodegrade sodium dodecyl sulfate. *Applied Environmental Microbiology.* 56 : 58–63.

10. *Kim HS, Weber WJ.* Polycyclic aromatic hydrocarbon behavior in bioactive soil slurry reactors amended with a nonionic surfactant. *Environ. Toxicol. Chem.* 2005;24(2):268–276.

11. *Prats, D., Ruiz, F., Vázquez, B., & Rodriguez-Pastor, M.* (1997). Removal of anionic and nonionic surfactants in a wastewater treatment plant with anaerobic digestion. A comparative study. *Water Research*, 31(8), 1925-1930.

12. *Россінський В.М., Саблій Л.А.* Ефективність видалення нейоногенних детергентів зі стічних вод сорбцією на активному мулі // *Матеріали Науково-практичної конференції «Меліорація та водовикористання – сталий розвиток водогосподарського комплексу країни», 17 березня 2017 року, Мелітопольський інститут екології та соціальних технологій, м. Мелітополь.* С. 18-19.

13. *Олійник О.Я., Айрапетян Т.С.* Моделювання очистки стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аеротенках зі зваженим (вільноплаваючим) і закріпленим біоценозом // *Доповіді Національної академії наук України.* 2015. № 5. С. 55-60.

14. *Россінський В. М., Саблій Л. А.* Моделювання очищення стічних вод в аеробних та аноксидних біореакторах в присутності синтетичних детергентів // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: Науково-технічний збірник. Випуск 27 / Головний редактор А. М. Кравчук. К.: КНУБА, 2016. С. 302–311.*

Стаття надійшла до редакції 25.04.17