

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

МОДЕЛЮВАННЯ ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД В АЕРОБНИХ ТА АНОКСИДНИХ БІОРЕАКТОРАХ В ПРИСУТНОСТІ СИНТЕТИЧНИХ ДЕТЕРГЕНТІВ

Приведено результати чисельного експерименту з очищення стічних вод в аноксидних та аеробних біореакторах з врахуванням інгібування синтетичними детергентами процесів окиснення органічних забруднюючих речовин. Запропоновано вирази, які дозволяють розраховувати кінетичні показники окиснення органічних забруднюючих речовин в аноксидних та аеробних біореакторах із активним мулом, враховуючи лімітування за субстратом, концентрацією розчиненого кисню в муловій суміші, інгібування синтетичними детергентами та лізис клітин бактерій активного мулу.

Ключові слова: синтетичні детергенти, стічні води, технологія, очищення, активний мул, моделювання.

Приведены результаты численного эксперимента по очистке сточных вод в аэробных и аноксидных биореакторах с учетом ингибирования синтетическими детергентами процессов окисления органических загрязняющих веществ. Предложены выражения, позволяющие рассчитывать кинетические показатели окисления органических загрязняющих веществ в аноксидных и аэробных биореакторах с активным илом, учитывая лимитирование за субстратом, концентрацией растворенного кислорода в иловой смеси, ингибирование синтетическими детергентами и лизис клеток бактерий активного ила.

Ключевые слова: синтетические детергенты, сточные воды, технология, очистка, активный ил, моделирование.

The results of numerical experiments of biological wastewater treatment of containing synthetic detergents from organic compounds in anoxic and aerobic units are presented. The equations for calculating the kinetic data of oxidation of organic compounds in anoxic and aerobic bioreactors with activated sludge, given the limitation of the substrate and concentration of dissolved oxygen in the mixed liquor, inhibition of synthetic detergents and lysis of bacterial mass of activated sludge are proposed.

Keywords: synthetic detergents, wastewater, technology, treatment, activated sludge, simulate.

Постановка проблеми

Поступове збільшення концентрації забруднюючих домішок, що надходять зі стічними водами на споруди каналізації населених пунктів, є функцією зниження водоспоживання абонентами централізованого водопостачання. Приріст концентраційного навантаження за забруднюючими домішками на очисні споруди каналізації виражається збільшенням маси органічних забруднень, сполук азоту та фосфору, синтетичних поверхнево-активних речовин, що транспортуються зі стічними водами. Міські стічні води містять завислих речовин 147,3...468,2 мг/дм³, сполук азоту 13,2...63,68 мг/дм³. Показник БСК₅ міських стічних вод в середньому складає 100...300 мгО₂/дм³ [1]. Середня концентрація фосфатів в міських стічних водах складає 10...20 мг/дм³. Вміст синтетичних детергентів в стічних водах населених пунктів України в середньому складає 8...25 мг/дм³ за питомого водовідведення 270...67 дм³/добу на 1 жителя (рис. 1) [2].

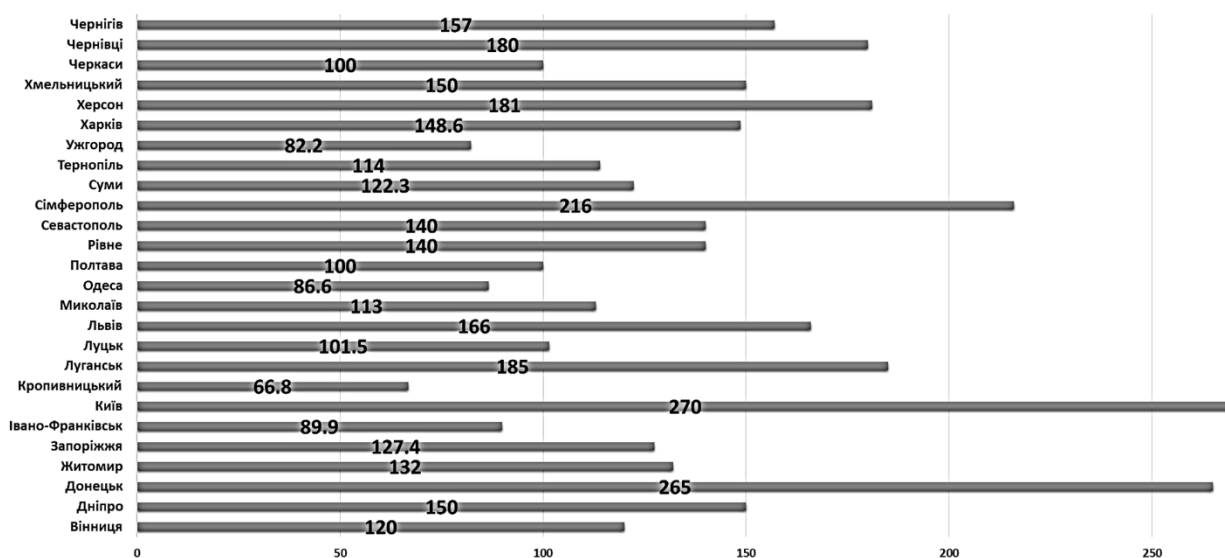


Рис. 1. Усереднене питеме водовідведення в обласних центрах України, дм³/добу на 1 жителя [1]

Наявність в стічних водах синтетичних детергентів призводить до порушення кисневого режиму в аеробних спорудах та пригнічення життєдіяльності мікроорганізмів активного мулу, лізису клітин бактерій активного мулу.

Основними компонентами миючих засобів та пральних порошків є аніонні (додецилсульфат натрію) та нейногенні (*Tween* 80) поверхнево-активні речовини.

Ступінь біодеструкції додецилсульфату натрію за концентрації 100 мг/дм³ в аеробних умовах з активним мулом при дозі 30 г/дм³ через 336 годин складає 85% [3]. За концентрації додецилсульфату натрію 25 мг/дм³ ступінь біодеструкції 80% досягається через 50 годин [4].

За присутності нейногенних синтетичних детергентів (*Tween* 80) в анаеробних умовах обробки стічних вод при температурі 22°C через 7 діб ступінь їх біодеструкції складала 16,6% [5]. Тоді як в аеробних умовах для

неіоногенних синтетичних детергентів (*Tween 80*) було досягнуто 17,8% через 20 діб [6].

За рахунок амфифільних властивостей синтетичних детергентів відбувається поступове сорбування високорозвиненою поверхнею активного мулу поверхнево-активних речовин та субстрату, що локалізований синтетичними детергентами. Обмеження доступу до субстрату внаслідок такої локалізації призводить до зниження швидкості окиснення органічних забруднюючих речовин активним мулом в спорудах біологічного очищення стічних вод з вільноплаваючими мікроорганізмами.

Мета роботи полягає в оцінці впливу синтетичних детергентів на кінетичні показники окиснення органічних забруднюючих речовин при біологічному очищенні міських стічних вод в біореакторах із аноксидними та аеробними умовами шляхом чисельного експерименту.

Основна частина

Вплив синтетичних детергентів на активний мул відображається на тривалості обробки стічних вод в спорудах біологічного очищення, корисних об'ємах біореакторів, експлуатаційних витратах на забезпечення роботи обладнання для перемішування мулової суміші та диспергування повітря.

Кінетику окиснення органічних забруднюючих речовин стічних вод в аеробних біореакторах з активним мулом можна розрахувати, використовуючи рівняння Моно з лімітуванням за концентрацією розчиненого кисню в муловій суміші, концентрацією субстрату [7] та враховуючи лізис мікроорганізмів активного мулу [8].

При розробці чи реновації технології біологічного очищення стічних вод з використанням біореакторів із активним мулом основну увагу приділяють кінетичному показнику – питомій швидкості окиснення (ρ), що відображає масу органічних забруднюючих речовин (мгБСК_{повн}), яка окиснюється 1 грамом беззольної речовини активного мулу за 1 годину. Для аеротенків, що працюють за принципом змішувачів, питому швидкість окиснення прийнято визначати [2]:

$$\rho = \rho_{\max} \cdot \frac{L_{ex} \cdot C_0}{[L_{ex} \cdot C_0 + K_t \cdot C_0 + K_o \cdot L_{ex}] \cdot (1 + \varphi \cdot a_i)}, \quad (1)$$

де L_{ex} – концентрація органічних забруднюючих речовин на виході з аеротенка, мгБСК_{повн}/дм³; K_o – константа напівнасичення за Оксигеном, мгО₂/дм³; K_t – константа, що залежить від властивостей органічних забруднюючих речовин, мгБСК_{повн}/дм³; φ – коефіцієнт інгібування продуктами розпаду активного мулу, дм³/г; a_i – доза активного мулу, г/дм³.

Для аеротенків, що працюють за принципом витиснювачів, питому швидкість окиснення можна виразити, згідно [2]:

$$\rho = \rho_{\max} \cdot \frac{C_0}{(1 + \varphi \cdot a_i) \cdot K_p \cdot \left[K_0 + C_0 + \frac{K_i \cdot C_0 \cdot \ln \frac{L_{mix}}{L_{ex}}}{L_{mix} - L_{ex}} \right]}, \quad (2)$$

де L_{mix} – концентрація органічних забруднюючих речовин, враховуючи розбавлення рециркуляційним активним мулом, мгБСК_{повн}/дм³; K_p – коефіцієнт, що враховує вплив поздовжнього перемішування.

Питому швидкість окиснення забруднюючих речовин в аеробних умовах можна виразити, базуючись на рівнянні Моно із лімітуванням за концентрацією субстрату, концентрацією розчиненого кисню в муловій суміші [7]:

$$\begin{cases} \frac{dL_H}{a_i \cdot dt} = \rho_{\max H} \cdot \beta_H \cdot b_H \cdot \frac{L'_S}{K'_S + L'_S} \cdot \frac{C_o}{K_o + C_o} \\ \frac{dL_A}{a_i \cdot dt} = \rho_{\max A} \cdot \beta_A \cdot b_A \cdot \frac{L_{NH_4}}{K_{NH_4} + L_{NH_4}} \cdot \frac{C_o}{K_o + C_o} \end{cases}, \quad (3)$$

а в аноксидних умовах, відповідно:

$$\frac{dL_{H-An}}{a_i \cdot dt} = \rho_{\max H} \cdot \beta_H \cdot b_H \cdot \frac{L_s}{K_s + L_s} \cdot \frac{L_{NO_3}}{K_{NO_3} + L_{NO_3}} \cdot \frac{K_o}{K_o + C_o}, \quad (4)$$

де ρ_{\max} – максимальна швидкість окиснення субстрату активним мулом, мгБСК_{повн}/(г·год); C_o – концентрація розчиненого кисню в муловій суміші, мгО₂/дм³; K_o – константа напівнасичення за Оксигеном, мгО₂/дм³; L_s – концентрація органічних забруднюючих речовин, мгБСК_{повн}/дм³; K_s – константа напівнасичення за субстратом, мгБСК_{повн}/дм³; a_i – доза активного мулу, г/дм³; b_H – коефіцієнт, що враховує лізис мікроорганізмів активного мулу, част. од. β_H, β_A – відповідно частка гетеротрофних, автотрофних мікроорганізмів в активному мулі, част. од.; K_{NO_3} – константа напівнасичення за нітратами, мгN-NO₃/дм³; L_{NO_3} – концентрація нітратів, мгN-NO₃/дм³; L_{NH_4} – концентрація амонійного Нітрогену, мгN-NH₄/дм³.

Шляхом експериментальних досліджень [9,10] встановлено інгібуючу дію синтетичних детергентів на процеси біологічного очищення міських стічних вод (нітрифікація, денітрифікація, дефосфотація) із визначенням константи інгібування за синтетичними детергентами $K_{surf} = 30$ мг/дм³.

Інгібування процесу окиснення органічних забруднюючих речовин синтетичними детергентами, враховуючи лізис мікроорганізмів активного мулу в процесі обробки стічних вод в аеробних умовах, лімітування швидкості окиснення органічних забруднюючих речовин за їх концентрацією та концентрацією розчиненого кисню в муловій суміші, питому швидкість окиснення органічних забруднюючих речовин в аеробних та аноксидних умовах, можна представити:

$$\left| \begin{aligned} \frac{dL_H}{a_i \cdot dt} &= \rho_{\max H} \cdot \beta_H \cdot b_H \cdot \frac{L_s}{K_s + L_s} \cdot \frac{C_o}{K_o + C_o} \cdot \frac{K_{surf}}{K_{surf} + C_{surf}} \\ \frac{dL_{H-An}}{a_i \cdot dt} &= \rho_{\max H} \cdot \beta_H \cdot b_H \cdot \frac{L_s}{K_s + L_s} \cdot \frac{L_{NO_3}}{K_{NO_3} + L_{NO_3}} \cdot \frac{K_o}{K_o + C_o} \cdot \frac{K_{surf}}{K_{surf} + C_{surf}} \end{aligned} \right. , \quad (5)$$

де K_{surf} – константа інгібування за синтетичними детергентами, мг/дм³; C_{surf} – концентрація синтетичних детергентів, мг/дм³.

Оцінку впливу синтетичних детергентів на питому швидкість окиснення органічних забруднюючих речовин провадили шляхом чисельного моделювання, що виконане за виразом (5) в програмному комплексі *MATLAB MathWorks Inc.* за умови, що початкова концентрація органічних забруднюючих речовин C_{inlet} (мгБСК_{повн}/дм³) ∈ [50,350]; муловий індекс J_i (см³/г) ∈ [70,130]; $\rho_{\max} = 85$ мгБСК_{повн}/дм³; $K_o = 0,625$ мгО₂/дм³; $\beta_H = 0,4$; $b_H = 0,62$.

Враховуючи те, що ступінь рециркуляції мулової суміші (R) визначається [2]:

$$R = \frac{a_i}{\frac{1000}{J_i} - a_i}, \quad (6)$$

тому для вектору значень дози мулу a_i (г/дм³) ∈ [1.5,6] з кроком 1,5 г/дм³ можна визначити поля вихідних даних для провадження чисельного експерименту (рис. 2 та рис. 3).

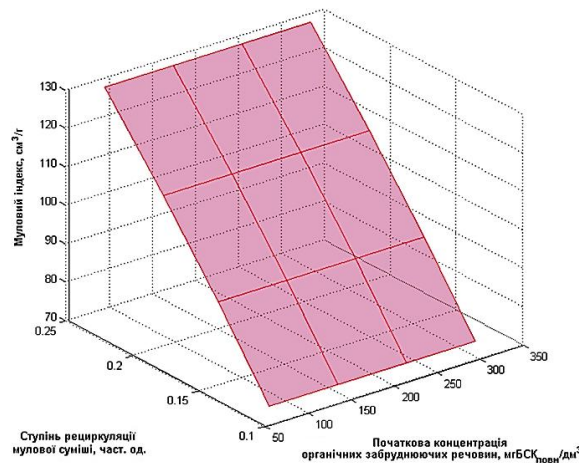


Рис. 2. Вихідні дані для чисельного експерименту з визначення питомої швидкості окиснення органічних забруднюючих речовин в аеробних умовах при дозі мулу 1,5 г/дм³

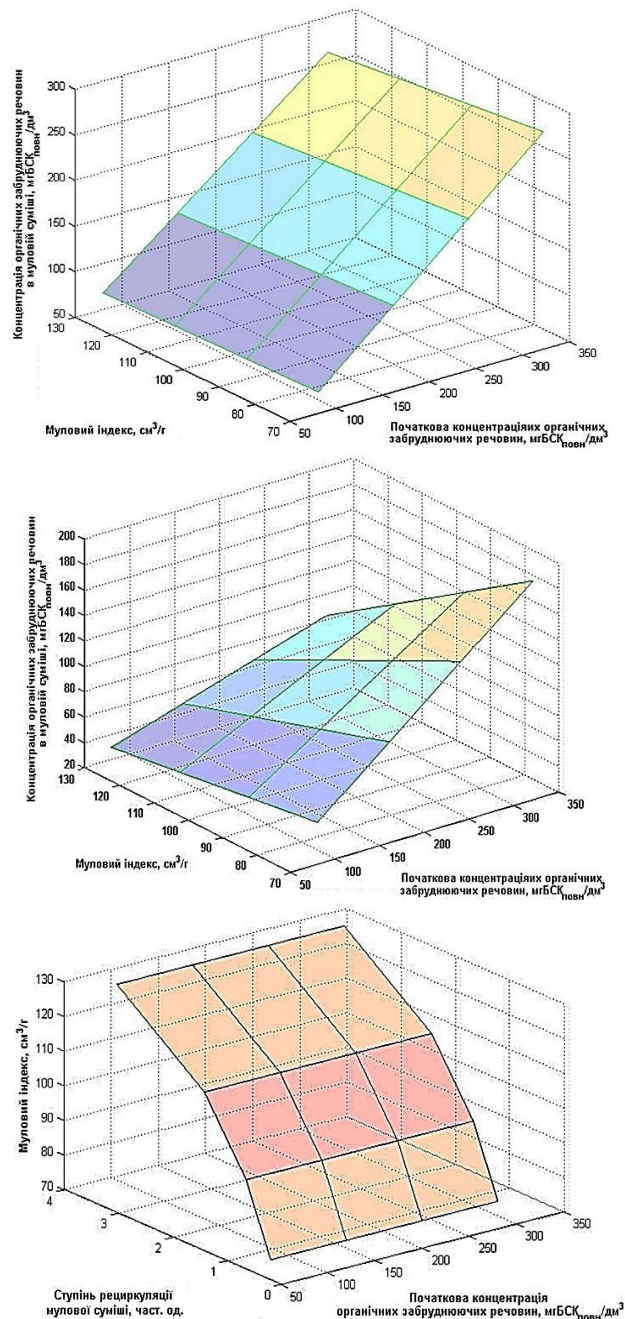


Рис. 3. Вихідні дані для чисельного експерименту з визначення питомої швидкості окиснення органічних забруднюючих речовин в аеробних умовах при дозі мулу 6 г/дм³

За результатами чисельного експерименту, який проведено за виразом (3) для аеробних умов, встановлено, що, наприклад, швидкість окиснення органічних забруднюючих речовин складає від 62 мгБСК_{повн}/год до 95 мгБСК_{повн}/год при дозі активного мулу в аеробному біореакторі 6 г/дм³, концентрації розчиненого Оксигену 3 мгО₂/дм³, не враховуючи наявність синтетичних детергентів, ступені рециркуляції від 0,65 до 3,5 та муловому індексі від 70 см³/г до 130 см³/г (рис. 4).

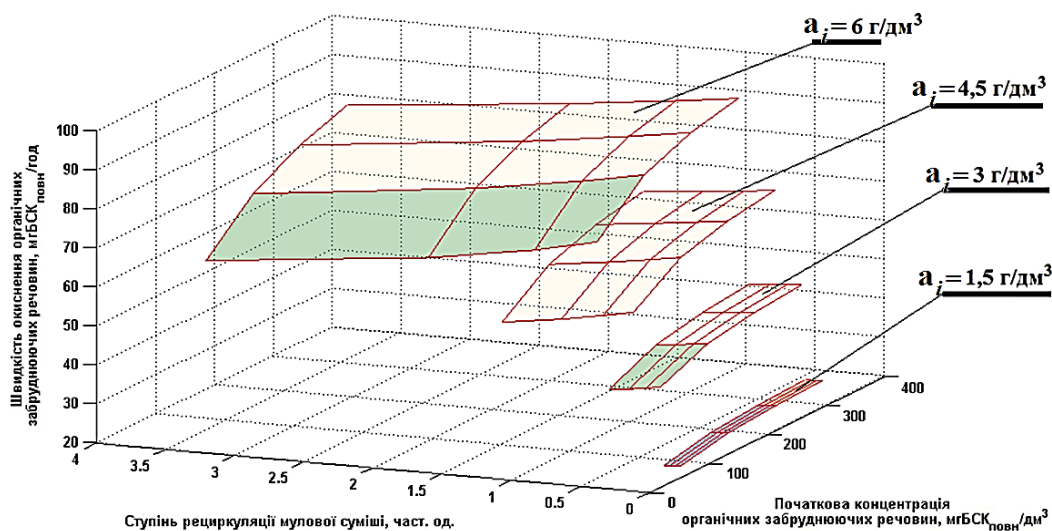


Рис. 4. Залежності питомої швидкості окиснення органічних забруднюючих речовин в аеробних умовах від дози мулу, ступеня рециркуляції мулової суміші та початкової концентрації органічних забруднюючих речовин при $C_0 = 3 \text{ мБСК}_{\text{повн}}/\text{дм}^3$; $L_{\text{ex}} = 15 \text{ мБСК}_{\text{повн}}/\text{дм}^3$

Використання чисельного експерименту за виразом (5) з наведеними на рис. 3 вихідними даними при дозі активного мулу в аеробному біореакторі 6 г/дм^3 за присутності в стічній воді синтетичних детергентів з концентрацією $10 \text{ мБСК}_{\text{повн}}/\text{год}$ дозволило одержати швидкість окиснення органічних забруднюючих речовин від $49 \text{ мБСК}_{\text{повн}}/\text{год}$ до $72 \text{ мБСК}_{\text{повн}}/\text{год}$ (рис. 5). Тобто, збільшення концентрації синтетичних детергентів в стічній воді з 0 до $10 \text{ мБСК}_{\text{повн}}/\text{год}$ призводить до інгібування швидкості окиснення органічних забруднюючих домішок до 24% .

Подальше збільшення концентрації синтетичних детергентів в стічній воді з $10 \text{ мБСК}_{\text{повн}}/\text{год}$ до $20 \text{ мБСК}_{\text{повн}}/\text{год}$ призводить до зниження швидкості окиснення органічних забруднюючих речовин до 24% .

Якщо в голові споруд біологічного очищення стічних вод розташовують біореактори з аноксидними умовами, на кінетику окиснення органічних забруднюючих речовин впливатиме окрім синтетичних детергентів й концентрація нітратів в муловій суміші (рис. 6).

За результатами чисельного експерименту, який проведено за виразом (5) для аноксидних умов, встановлено, що ступінь інгібування швидкості окиснення органічних забруднюючих речовин складає 31% за рахунок збільшення концентрації синтетичних детергентів з 0 до $10 \text{ мБСК}_{\text{повн}}/\text{год}$, при концентрації нітратів $10 \text{ мБСК}_{\text{повн}}/\text{год}$ та концентрації розчиненого Оксигену $0,1 \text{ мБСК}_{\text{повн}}/\text{дм}^3$ (рис. 7).

Подальше збільшення концентрації синтетичних детергентів в стічній воді з $10 \text{ мБСК}_{\text{повн}}/\text{год}$ до $20 \text{ мБСК}_{\text{повн}}/\text{год}$ призводить до зниження швидкості окиснення органічних забруднюючих речовин до 12% , порівняно зі швидкістю окиснення при концентрації синтетичних детергентів $10 \text{ мБСК}_{\text{повн}}/\text{год}$.

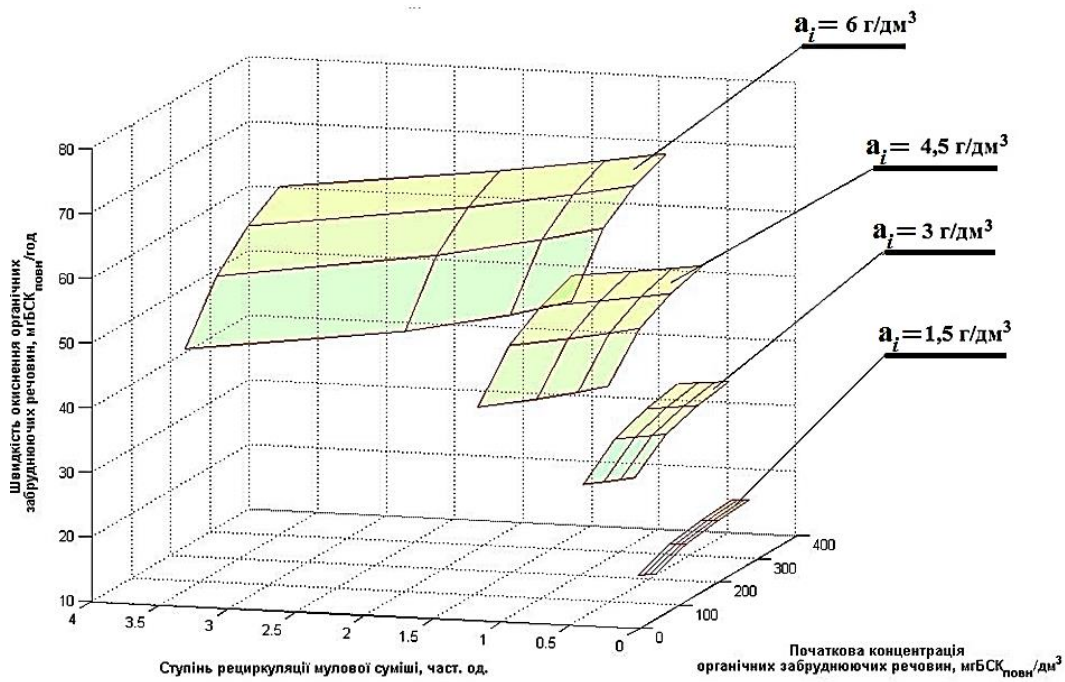


Рис. 5. Залежності питомої швидкості окиснення органічних забруднюючих речовин в аеробних умовах від дози мулу, ступеня рециркуляції мулової суміші та початкової концентрації органічних забруднюючих речовин при $C_0 = 3 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$; $L_{ex} = 15 \text{ мг/дм}^3$; $C_{surf} = 10 \text{ мг/дм}^3$

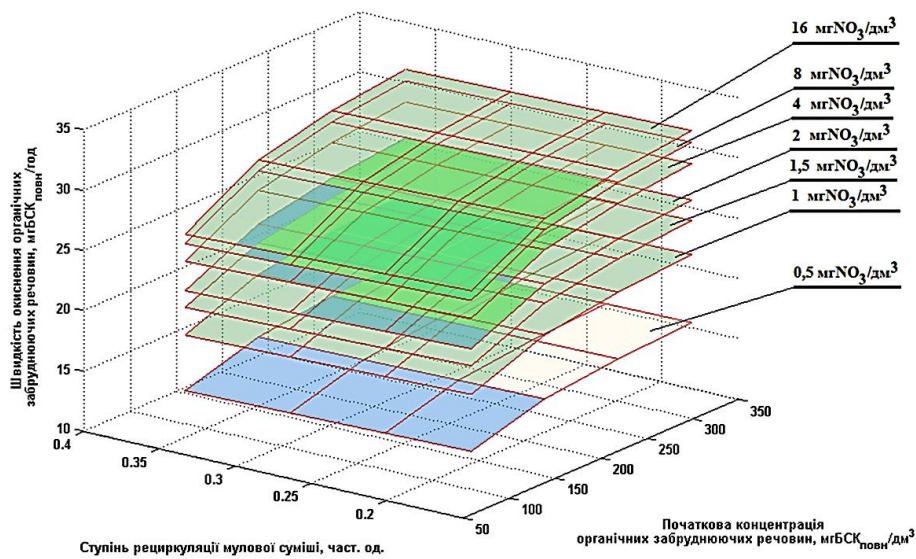


Рис. 6. Залежності швидкості окиснення органічних забруднюючих речовин в аноксидних умовах від концентрації нітратів, ступеня рециркуляції мулової суміші та початкової концентрації органічних забруднюючих речовин при $C_0 = 0,1 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$; $a_i = 2 \text{ г/дм}^3$; $L_{ex} = 15 \text{ мг/дм}^3$

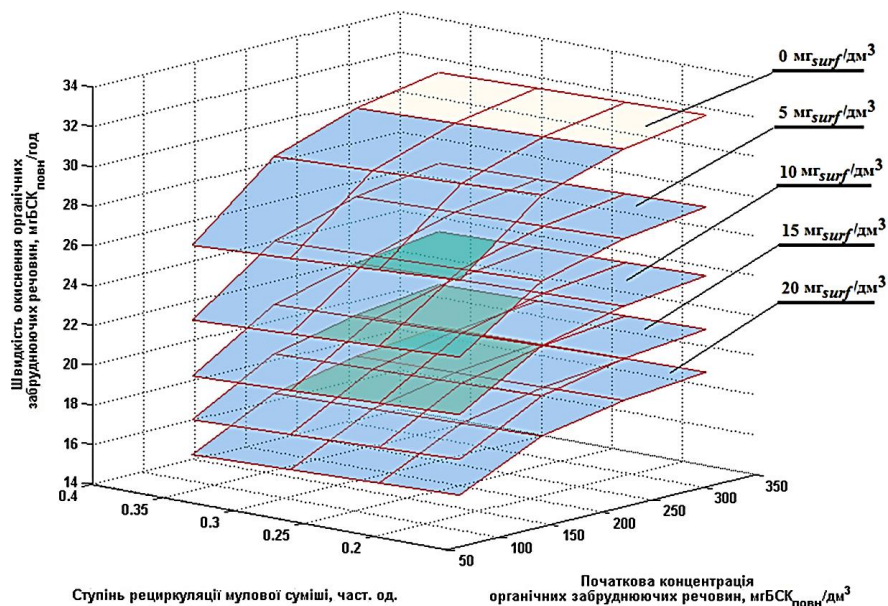


Рис. 7. Залежності швидкості окиснення органічних забруднюючих речовин в аноксидних умовах від концентрації синтетичних детергентів, ступеня рециркуляції мулової суміші та початкової концентрації органічних забруднюючих речовин при $C_0 = 0,1 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$; $a_i = 2 \text{ г/дм}^3$; $L_{ex} = 15 \text{ мг/дм}^3$; $L_{NO_3} = 10 \text{ мг/дм}^3$

Висновки

Визначення кінетичних показників окиснення органічних забруднюючих речовин з метою досягнення необхідного ступеня очищення стічних вод в аноксидних та аеробних біореакторах із активним мулом потребує врахування концентраційної складової синтетичних детергентів. Запропоновано вирази, які дозволяють розраховувати швидкість окиснення органічних забруднюючих речовин в біореакторах із активним мулом з аноксидними та аеробними умовами, враховуючи інгібування процесів окиснення синтетичними детергентами. За результатами чисельного експерименту встановлено, що збільшення концентрації синтетичних детергентів від 0 до 10 мг/дм^3 призводить до інгібування швидкості окиснення органічних забруднюючих речовин до 24% в аеробних умовах при $C_0 = 3 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ й до 31% в аноксидних умовах при $L_{NO_3} = 10 \text{ мг/дм}^3$, $C_0 = 0,1 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$.

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. 564 с.
2. ДБН В.2.5–75:2013 "Каналізація. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування". К.: Мінрегіонбуд, 2013. 210 с.
3. *Biodegradation and bioaccumulation data of existing chemicals based on the CSCL Japan (1992)*. Japan Chemical Industry Ecology – Toxicology and Information Center. ISBN 4-89074-101-1.

4. *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.
5. *Yeh DH, Pennell KD, Pavlostathis SG*. Toxicity and biodegradability screening of nonionic surfactants using sediment-derived methanogenic consortia. *Water Science and Technology*. 1998;38(7) : 55–62.
6. *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.
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., 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.
9. *Россінський В. М., Саблій Л. А.* Вплив поверхнево-активних речовин на процеси денітрифікації при біологічному очищенні міських стічних вод // Комунальне господарство міст : науково-технічний збірник. Вип. 126. Харків. ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. С. 32-36.
10. *Россінський В. М., Саблій Л. А.* Дефосфотація міських стічних вод, що містять синтетичні детергенти // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки : Науково-технічний збірник. Випуск 26 / Головний редактор О. С. Волошкіна. К. : КНУБА, 2016. С. 131-137.

Надійшло до редакції 14.11.2016

УДК 628.12

Г.А.СИЗОНЕНКО, аспірант
Т.П. ХОМУТЕЦЬКА, кандидат технічних наук
Київський національний університет будівництва і архітектури

ВИРІШЕННЯ ПИТАНЬ ЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ПІДЗЕМНИХ ВОД

Розглянуто досвід використання підземних вод для питного водопостачання, досліджено проблеми забезпечення ефективної роботи споруд гідравлічної взаємодії та шляхи їх вирішення.

Ключові слова: підземні води, свердловина, водоспоживання, водопостачання.