

УДК 628.355

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ РЕЖИМІВ БІОРЕАКТОРІВ

В. В. Артамонов, Г. В. Велика, Р. Г. Шиш

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна. E-mail: gzk@kdu.edu.ua, anna_velikaya@inbox.ru

Розроблено математичну модель перехідного режиму біореактору із псевдозрідженим завантаженням, що враховує інгібіруючі ефекти діяльності біоценозу, підвищену концентрацію біомаси та адсорбцію нею забруднюючих речовин. Проведено обчислювальний експеримент для визначення ключових закономірностей деструкції органічних забруднень анаеробним мікробіоценозом.

Ключові слова: математична модель, іммобілізована біомаса, псевдозріджене завантаження, анаеробна деструкція.

MATHEMATICAL MODELLING OF BIOREACTOR TRANSITION CONDITIONS

V. V. Artamonov, A. V. Velika, R. G. Shish

Kremenchuk Mykhaylo Ostrogradskiy National University
vul. Pershotravneva, 20, 39600, Kremenchuk, Ukraine. E-mail: gzk@kdu.edu.ua, anna_velikaya@inbox.ru

Mathematical model of anaerobic fluidized bed transition condition is developed. It corrects for a biocenosis functioning inhibition effects, increased biomass concentration and its absorption of contaminants. Computational experiment for determination of basic pollution destruction mechanisms realized by anaerobic microbocenosis was conducted.

Key words: mathematical model, fixed biomass, fluidized feed, anaerobic destruction.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ БИОРЕАКТОРОВ

В. В. Артамонов, А. В. Великая, Р. Г. Шиш

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина. E-mail: gzk@kdu.edu.ua, anna_velikaya@inbox.ru

Разработана математическая модель переходного режима биореактора с псевдооживленной загрузкой, которая учитывает ингибирующие эффекты деятельности биоценоза, повышенную концентрацию биомассы и адсорбцию ею загрязняющих веществ. Проведён вычислительный эксперимент для определения ключевых закономерностей деструкции загрязнений анаэробным микробиоценозом.

Ключевые слова: математическая модель, иммобилизованная биомасса, псевдооживленная загрузка, анаэробная деструкция.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Очисні споруди, в яких відбуваються біохімічні процеси, мають пройти тривалий пусковий період для того, щоб у них розвинулись у достатній кількості мікроорганізми, необхідні для успішного перебігу процесів очищення. Варто мати на увазі, що цей проміжок часу є дуже відповідальним для подальшої роботи реакторів, оскільки формується видовий і кількісний склад мікробіоценозу, який визначає подальшу ефективність видалення забруднюючих речовин із стічних вод. Незважаючи на важливість періоду пусконаладки, цей етап становлення роботи очисних споруд вивчено недостатньо.

Протягом минулого століття для визначення розрахункових характеристик біологічних споруд очищення стічних вод використовувались балансові рівняння (наприклад, метод К.Н. Королькова, Н.А. Базякіної) [1], які давали змогу отримувати виключно параметри процесу очистки, що встановився. Інформацію про період пусконаладки, який є перехідним, отримували виключно емпіричним шляхом.

Ще одним недоліком стаціонарних моделей є неможливість проведення оцінки впливу на біологічну систему збурюючих факторів, як, наприклад, залпові надходження стічних вод, суттєві зміни їх якісного складу і кількості, коливання величин фізичних параметрів середовища. Безперечно, що інформація про можливий час відновлення рівноваги у системі є важливою для забезпечення заданого ступеня очищення стічних вод. Тому виникла нагальна потреба у динамічному розгляді процесу трансформації забруднюючих речовин.

Метою роботи є моделювання перехідних режимів роботи біореакторів для детального їх дослідження.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Найбільш перспективними біореакторами на даний момент є реактори із псевдозрідженим шаром як високопродуктивні через значне збільшення площі контакту між активною біомасою і стічною водою [2]. Математичне моделювання реактору такого типу проводилось, зокрема, у роботі [3], але воно було здійснено для біомаси в цілому без розподілу її на функціональні групи. Пропонується здійснити моделювання процесу окислення органічних забруднень двома послідовними трофічними групами бактерій, що дасть змогу врахувати існуючі інгібіруючі ефекти всередині біоценозу і зменшити їх вплив на швидкість і ефективність процесу очистки. Схематично потоки у такому біореакторі можуть бути показані у наступному вигляді (рис.1).

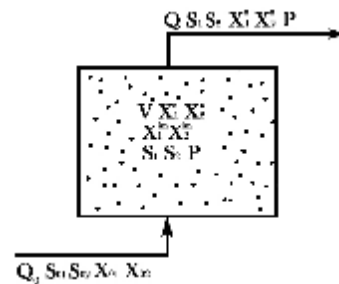


Рисунок 1 — Реактор із псевдозрідженим шаром

Параметри вхідного і вихідного потоків апарату наступні: витрати Q_0 і Q відповідно, концентрації першої і другої за ланцюгом перетворень забруднюючих речовин S_{01} , S_{02} і S_1 , S_2 , а також кінцевого продукту P ; концентрації двох послідовних трофічних груп бактерій анаеробного мулу X_{01} , X_{02} і X_1 , X_2 .

При побудові моделі використано концентрації вільноплаваючої та іммобілізованої біомаси, які різняться між собою:

$$X_1^e = \frac{M_1^e}{V^e}, \quad X_2^e = \frac{M_2^e}{V^e}, \quad (1)$$

$$X_1^{im} = \frac{M_1^{im}}{V^{im}}, \quad X_2^{im} = \frac{M_2^{im}}{V^{im}}, \quad (2)$$

де X_1^{im} , X_2^{im} – концентрація іммобілізованих бактерій першої і другої груп відповідно, г/дм³;

X_1^e , X_2^e – концентрація вільноплаваючих бактерій першої і другої груп, г/дм³;

M_1^e , M_2^e – маса вільноплаваючих бактерій, г;

M_1^{im} , M_2^{im} – маса іммобілізованих бактерій, г;

V^e – об'єм апарату, вільний від завантаження, дм³;

V^{im} – об'єм апарату, зайнятий завантаженням із біоплівкою, дм³.

Оскільки для переважної кількості бактерій, що беруть участь у анаеробних перетвореннях, характерним є інгібування продуктами життєдіяльності, а іноді й субстратом, для опису їх питомої швидкості росту використано багатофакторне рівняння зі змішаними факторами — модифіковане рівняння Моно-Ієрусаліського:

$$\mu = \mu_m \frac{S}{K_S + S} \cdot \frac{K_P}{K_P + P} \cdot \frac{1}{K_S + S + k_1 \cdot S^2}, \quad (3)$$

де μ_m — максимальна питома швидкість росту, год⁻¹;

K_S — константа напівнасичення, г/дм³;

K_P — константа інгібування продуктом, г/дм³;

k_1 — константа інгібування субстратом, г/дм³.

Важливим фактором, який має бути врахований при побудові даної математичної моделі, є адсорбція субстрату іммобілізованою біомасою [4]. Така відмінність у концентрації поживних речовин зумовлює різницю у величині питомих швидкостей росту закріплених і вільноплаваючих бактерій у межах однієї групи, тому рівняння для їх обчислення набудуть вигляду:

$$\mu^{im} = \mu_m \frac{S^{im}}{K_S + S^{im}} \cdot \frac{K_P}{K_P + P} \cdot \frac{1}{K_S + S^{im} + k_1 \cdot (S^{im})^2}, \quad (4)$$

$$\mu^e = \mu_m \frac{S^e}{K_S + S^e} \cdot \frac{K_P}{K_P + P} \cdot \frac{1}{K_S + S^e + k_1 \cdot (S^e)^2}. \quad (5)$$

Для спрощення роботи з математичним апаратом введемо коефіцієнт адсорбції, який відображає співвідношення між концентрацією субстрату на поверхні біоплівки та у рідкій фазі:

$$k^a = \frac{S^{im}}{S^e}. \quad (6)$$

Тоді рівняння (4) набуде вигляду:

$$\mu^{im} = \mu_m \frac{k^a S^e}{K_S + k^a S^e} \cdot \frac{K_P}{K_P + P} \cdot \frac{1}{K_S + k^a S^e + k_1 \cdot (k^a \cdot S^e)^2}. \quad (7)$$

Приріст біомаси в апараті визначається за рівняннями матеріального балансу:

$$VdX_1 = Q_0 \cdot X_{01} \cdot dt + V^{im} \cdot \mu_1^{im} \cdot X_1^{im} \cdot dt + V^e \cdot \mu_1^e \cdot X_1^e \cdot dt - Q \cdot X_1 \cdot dt, \quad (8)$$

$$VdX_2 = Q_0 \cdot X_{02} \cdot dt + V^{im} \cdot \mu_2^{im} \cdot X_2^{im} \cdot dt + V^e \cdot \mu_2^e \cdot X_2^e \cdot dt - Q \cdot X_2 \cdot dt, \quad (9)$$

де μ_i^{im} , μ_i^e – питомі швидкості росту іммобілізованої та вільноплаваючої біомас відповідно, год⁻¹ ($i = 1, 2$).

Припускаючи, що $Q \approx Q_0$, а також замінюючи співвідношення Q/V величиною швидкості розбавлення D , отримаємо:

$$dX_1 / dt = D \cdot X_{01} + (1 - \varepsilon) \cdot \mu_1^{im} \cdot X_1^{im} + \varepsilon \cdot \mu_1^e \cdot X_1^e - D \cdot X_1, \quad (10)$$

$$dX_2 / dt = D \cdot X_{02} + (1 - \varepsilon) \cdot \mu_2^{im} \cdot X_2^{im} + \varepsilon \cdot \mu_2^e \cdot X_2^e - D \cdot X_2 \quad (11)$$

де $\varepsilon = (V - V^{im}) / V$ – поруватість псевдозрідженого завантаження, V – загальний об'єм апарату, дм³.

При побудові моделі необхідно врахувати одну з основних особливостей реактору з іммобілізованою мікрофлорою — суттєво підвищену концентрацію закріпленої біомаси порівняно з тією, що знаходиться в очищеній воді.

Для цього застосуємо коефіцієнт іммобілізації біомаси, який відображає співвідношення концентрації прикріпленої і вільноплаваючої біомаси для першої і другої груп бактерій:

$$k_1^i = \frac{X_1^{im}}{X_1^e}, \quad k_2^i = \frac{X_2^{im}}{X_2^e}. \quad (12)$$

З урахуванням цих коефіцієнтів рівняння (10), (11) набудуть вигляду:

$$dX_1 / dt = D \cdot X_{01} + (1 - \varepsilon) \cdot \mu_1^{im} \cdot k_1^i \cdot X_1^e + \varepsilon \cdot \mu_1^e \cdot X_1^e - D \cdot X_1, \quad (13)$$

$$dX_2 / dt = D \cdot X_{02} + (1 - \varepsilon) \cdot \mu_2^{im} \cdot k_2^i \cdot X_2^e + \varepsilon \cdot \mu_2^e \cdot X_2^e - D \cdot X_2. \quad (14)$$

Розглянемо балансові співвідношення за субстратами та продуктом бактеріальних перетворень у системі.

Рівняння матеріального балансу за першою за ланцюгом перетворень забруднюючою речовиною матиме вигляд:

$$VdS_1 = Q_0 \cdot S_{01} \cdot dt - V^{im} \cdot \mu_1^{im} \cdot X_1^{im} \cdot dt / Y_{s1} - V^e \cdot \mu_1^e \cdot X_1^e \cdot dt / Y_{s1} - Q \cdot S_1 \cdot dt, \quad (15)$$

де Y_{s1} – економічний коефіцієнт [5] першої групи мікроорганізмів за субстратом, г біомаси / г субстрату.

З урахуванням зроблених раніше припущень:

$$dS_1 / dt = D \cdot S_{01} - (1 - \varepsilon) \cdot \mu_1^{im} \cdot k_1^i \cdot X_1^e / Y_{s1} - \varepsilon \cdot \mu_1^e \cdot X_1^e / Y_{s1} - D \cdot S_1. \quad (16)$$

За другою забруднюючою речовиною (субстратом другої групи бактерій) отримаємо:

$$VdS_2 = Q_0 \cdot S_{02} \cdot dt + V^{im} \cdot \mu_1^{im} \cdot X_1^{im} \cdot dt / Y_{p1} + V^e \cdot \mu_1^e \cdot X_1^e \cdot dt / Y_{p1} - V^{im} \cdot \mu_2^{im} \cdot X_2^{im} \cdot dt / Y_{s2} - V^e \cdot \mu_2^e \cdot X_2^e \cdot dt / Y_{s2} - Q \cdot S_2 \cdot dt, \quad (17)$$

де Y_{p1} – економічний коефіцієнт першої групи мікроорганізмів за продуктом, г біомаси / г продукту;

Y_{s2} – економічний коефіцієнт другої групи мікроорганізмів за субстратом, г біомаси / г субстрату.

З урахуванням коефіцієнтів іммобілізації

$$dS_2 / dt = D \cdot S_{02} + (1 - \varepsilon) \cdot \mu_1^{im} \cdot k_1^i \cdot X_1^e / Y_{p1} + \varepsilon \cdot \mu_1^e \cdot X_1^e / Y_{p1} - (1 - \varepsilon) \cdot \mu_2^{im} \cdot k_2^i \cdot X_2^e / Y_{s2} - \varepsilon \cdot \mu_2^e \cdot X_2^e / Y_{s2} - D \cdot S_2. \quad (18)$$

Рівняння матеріального балансу за кінцевим продуктом має три складові:

$$VdP / dt = V^{im} \cdot \mu_2^{im} \cdot X_2^{im} \cdot dt / Y_{p2} + V^e \cdot \mu_2^e \cdot X_2^e \cdot dt / Y_{p2} - Q \cdot P \cdot dt, \quad (19)$$

де Y_{p2} – економічний коефіцієнт другої групи мікроорганізмів за продуктом, г біомаси / г продукту.

Після підстановки

$$dP / dt = (1 - \varepsilon) \cdot \mu_2^{im} \cdot k_2^i \cdot X_2^{im} / Y_{p2} + \varepsilon \cdot \mu_2^e \cdot X_2^e / Y_{p2} - D \cdot P. \quad (20)$$

Отримана таким чином система з п'яти рівнянь (13), (14), (16), (18), (20) з урахуванням рівняння (7) може бути використана для математичного моделювання процесу трансформації забруднюючих речовин у динаміці у реакторі із псевдозрідженим завантаженням, зокрема, для дослідження процесу його пусконаладки (наприклад, визначення тривалості виходу апарату на стаціонарний режим).

Для проведення обчислювальних експериментів із даною моделлю використано програмний комплекс MatLab, який надає можливість зручного варіювання параметрів процесу очищення і візуального представлення отриманих результатів. Результати використання створеної моделі свідчать про те, що при швидкості потоку $0,1 \text{ год}^{-1}$, поруватості $\varepsilon = 0,9$, коефіцієнті адсорбції $k_1^a = k_2^a = 1,1$, коефіцієнтів іммобілізації $k_1^i = k_2^i = 15$, початкових концентраціях бактерій двох груп $X_{01} = 0,004 \text{ г/дм}^3$, $X_{02} = 0,0004 \text{ г/дм}^3$ (що відповідає концентраціям груп бактерій у стічній воді, що надходить до реактору) досягаються наступні показники: перший субстрат буде спожито повністю (при вихідному значенні $S_{01} = 4 \text{ г/дм}^3$), концентрація другого дорівнюватиме $S_2 = 0,25 \text{ г/дм}^3$ (при $S_{02} = 0,25 \text{ г/дм}^3$), кінцевого продукту — $P = 0,55 \text{ г/дм}^3$. Концентрація бактерій на виході з

апарату становитиме $X_1 = 0,33 \text{ г/дм}^3$, $X_2 = 0,35 \text{ г/дм}^3$. При цьому час виходу біореактору на стаціонарний режим за кожним із показників різний і становить 2–3 години за концентрацією першої групи бактерій (X_1) і першого субстрату (S_1), 15–20 годин за іншими величинами (S_2 , P , X_2).

Порівняння цих результатів із тими, що були отримані за допомогою програмного комплексу MatCad ($S_1 = 0,016 \text{ г/дм}^3$, $S_2 = 3,15 \text{ г/дм}^3$, $P = 0 \text{ г/дм}^3$, $X_1 = 0,323 \text{ г/дм}^3$, $X_2 = 0 \text{ г/дм}^3$) за аналогічних вихідних параметрів для стаціонарних умов, свідчить, що вони суттєво різняться. Як показали обчислювальні експерименти, це викликано впливом величин початкових наближень, які спричиняють нестабільність отриманих кінцевих результатів і їх кардинальні відмінності між собою. Застосування останнього згаданого програмного комплексу дуже ускладнюється вказаною обставиною і спотворює отриману картину перебігу процесу.

ВИСНОВКИ. Розроблена математична модель дає можливість детальної оцінки процесу деструкції органічних забруднень анаеробним мікробоценозом, що сприяє отриманню ключових закономірностей перебігу зброджування для забезпечення сталого та ефективного очищення стічних вод.

ЛІТЕРАТУРА

1. Яковлев С.В. Канализация. – М.: Стройиздат, 1975. – С. 361–373.
2. Калюжный С.В. Высокоинтенсивные анаэробные биотехнологии очистки промышленных сточных вод // Катализ в промышленности. – 2004. – № 6. – С. 42–50.
3. Василенко М.Г. Моделирование очистки воды в биосорбере с псевдоожиженной загрузкой // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2005. – Вип. 5. – С. 85–91.
4. Смирнов А.Д. Сорбционная очистка воды. – Л.: Химия, 1982. – С. 102.
5. Перт С.Дж. Основы культивирования микроорганизмов и клеток. – М.: Мир, 1978. – С. 17.

REFERENCES

1. Yakovlev S.V. Canalization. – Moscow: Stroyizdat, 1975. – P. 361–373 [in Russian].
2. High-effective anaerobic treatment biotechnologies for industrial wastewater // Catalysis in industry. – 2004. – № 6. – P. 42–50 [in Russian].
3. Vasilenko M.G. Modeling of treatment in anaerobic fluidized bed // Problems of water supply, water removal and hydraulics. – 2005. – Vol. 5. – P. 85–95 [in Russian].
4. Smirnov A.D. Sorption water treatment. – Leningrad: Chemistry, 1982. – P.102 [in Russian].
5. Pirt S. John. Principles of Microbe and Cell Cultivation. – Moscow: Mir, 1978. – P. 17 [in Russian].

Стаття надійшла 11.05.2011.

Рекомендована до друку
к.т.н., доц. Бахарєвим В.С.