

УДК: 579.24.001.57:628.35:631.862.2

**ХАРАКТЕРИСТИКА МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСІВ РОСТУ І
КУЛЬТИВУВАННЯ МІКРООРГАНІЗМІВ У СИСТЕМАХ
БІОЛОГІЧНОЇ ОЧИСТКИ СТІЧНИХ ВОД**

О.С. ЯРЕМЧУК, кандидат сільськогосподарських наук, професор
Вінницький національний аграрний університет

М.О. ЗАХАРЕНКО, доктор біологічних наук, член-кореспондент НААН
України, професор

Національний університет біоресурсів і природокористування України

С.П. ЦИГАНКОВ, доктор технічних наук, професор
*Інститут харчової біотехнології та геноміки Національної академії наук
України*

Проведено аналіз математичних моделей процесів росту і культивування популяції мікроорганізмів активного мулу в системах біологічної очистки стічних вод. Встановлено вплив рециркуляції активного мулу на кінетичні та стехіометричні характеристики процесу очистки стічних вод. Одержано залежності концентрації біомаси в аеротенку від швидкості її розбавлення і споживання субстрату та коефіцієнта рециркуляції.

Ключові слова: модель росту мікроорганізмів, активний мул, біомаса, аеротенк, коефіцієнт рециркуляції.

Зосередження значної кількості тварин на невеликих за площею територіях, що має місце за інтенсивних технологій виробництва продукції тваринництва, крім економічної вигоди, створює і ряд екологічних проблем, пов'язаних із забрудненням довкілля продуктами життєдіяльності тварин, мікроорганізмами, шкідливими газами та пилом.

Сучасні технологічні рішення щодо запобігання негативному впливу тваринницьких об'єктів на навколишнє середовище, крім традиційних способів зберігання та використання відходів, передбачають і використання біотехнологічних прийомів їх переробки. Це дає можливість одержати не тільки цінні органічні добрива, але й значну кількість біогазу, як

альтернативне джерело енергії, запобігти негативному тиску тваринницьких об'єктів на довкілля. Особливо актуальною ця проблема є для тваринницьких підприємств з технологіями, що ведуть до утворення значної кількості рідких стоків.

Найпоширенішим способом біологічної очистки рідких стоків свинокомплексів є застосування мікроорганізмів активного мулу, що є одним із видів хемостатичного культивування [7]. Однак на відміну від класичної схеми процесу очистки стічних вод біологічна очистка стоків тваринницьких підприємств мікроорганізмами активного мулу обов'язково передбачає рециркуляцію біомаси.

Другою особливістю процесу біологічної очистки рідких стоків є сумісна дія мікроорганізмів активного мулу, видовий склад і активність яких залежить від хімічного складу біомаси, її властивостей та умов культивування [2, 3, 4, 18]. В одному випадку дія мікроорганізмів на субстрат односпрямована синергічна, в другому – різниться за етапами розщеплення органічної речовини, а в третьому – антагоністична. Швидкість росту мікроорганізмів активного мулу в хемостаті та їх взаємодія з компонентами органічної речовини залежить від кінетики та стехіометрії процесу, яка відтворює зв'язок економічного коефіцієнта з технологічними параметрами процесу біологічної очистки стоків.

При цьому необхідно враховувати і те, що на ефективність процесу очистки впливає здатність мікроорганізмів активного мулу використовувати субстрат, а також структура потоків у реакторі, в тому числі і рециркуляція мулу [2, 12, 33].

Нині розроблено та використовується в практиці цілий ряд моделей процесу росту і культивування мікроорганізмів у системах біологічної очистки стічних вод промислових підприємств, які доцільно враховувати при переробці рідких стоків тваринницьких об'єктів.

Кінетика процесів росту мікроорганізмів при утилізації субстрату описується моделлю Моно [9, 28]. Згідно з цією моделлю питома швидкість [Type text]

росту мікроорганізмів залежить від концентрації лімітуючого субстрату в хемостаті:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_s + S}, \quad (1),$$

де: μ – питома швидкість росту мікроорганізмів, 1/год,

μ_{\max} – максимальна питома швидкість росту,

S – концентрація лімітуючого субстрату, г/л,

K_s – константа напівнасичення.

У свою чергу концентрація субстрату, змінюючись у процесі культивування мікроорганізмів, впливає на швидкість їх росту (2):

$$\frac{ds}{dt} = -\frac{1}{Y} \mu_{\max} X \frac{S}{K_s + S}, \quad (2),$$

де: x – концентрація біомаси, г/л,

Y – економічний коефіцієнт (г біомаси/г субстрату).

Однак кінетика процесу росту монокультури в біореакторі, яка описується цією моделлю, дає значні відхилення при культивуванні полікультури мікроорганізмів, що має місце при очистці стічних вод активним мулом [4, 5]. Ряд авторів вважають, що ця модель може бути використана лише для чистих культур і тільки за певної концентрації субстрату і не може бути застосована до опису кінетики процесу при очистці стічних вод мікроорганізмами активного мулу [7, 31, 34].

Останнє пов'язують з тим, що в міру росту біомаси мікроорганізмів зменшується вміст субстрату в культуральній рідині і зростає рівень метаболітів, які знижують швидкість самого процесу [13, 29, 32]. Утворені продукти шляхом зміни рН культурального середовища негативно впливають на активність ферментів мікроорганізмів, змінюють спорідненість субстратів до ферментів, а також знижують швидкість перетворення фермент-субстратного комплексу.

Використання для розрахунку росту чистих культур мікроорганізмів рівняння Ферхюльста-Пірла [5, 19], яке описує ріст популяції

мікроорганізмів у замкнутих системах, дає можливість деякою мірою уникнути вищевказаних застережень:

$$\frac{dx}{dt} = Ex - \beta x^2, \quad (3),$$

де: E - коефіцієнт максимальної швидкості росту популяції,

β – коефіцієнт зниження росту популяції,

x – концентрація біомаси, г/л,

t – час культивування, год.

Це рівняння є об'єктивнішим для розрахунку швидкості росту чистих культур мікроорганізмів на субстратах з використанням моделей, які враховують структуру потоків у біореакторі [12], що важливо з точки зору розуміння математичного опису процесу очистки стічних вод. Вказану залежність процесу очистки стічних вод від структури потоку рідини враховують при розрахунку гідродинамічних параметрів біореактора.

Відомо, що потоки рідини в біореакторах забезпечують практично повне змішування біомаси. Однак за умови, коли перетворення органічної речовини описується рівнянням нульового порядку, структура потоків рідини мало впливає на перебіг самого процесу [11, 12]. Якщо ж порядок реакції вище нульового, для одержання оптимальних значень обов'язково враховують гідродинаміку біореактора [4, 12]. Останнім часом процеси росту популяції мікроорганізмів активного мулу залежно від структури потоку в біореакторі-змішувачі контролюють за такою формулою: [24].

$$\frac{S^n}{S_n^{n+1}} \cdot k_{ns} \cdot x \cdot t = \frac{S_0 - S}{S}, \quad (4),$$

де: k_{ns} – питома швидкість споживання субстрату,

t – час знаходження біомаси в реакторі, год,

S_0 – концентрація субстрату на початку процесу, г/л,

S – концентрація субстрату, г/л,

x – концентрація біомаси, г/л,

n – порядок процесу.

Однак як показали розрахунки застосування цієї моделі для опису кінетики і порядку споживання мікроорганізмами активного мулу субстрату не завжди відповідає показникам росту популяції [17].

Існують і інші способи математичних описів процесу очистки стічних вод, у яких значення економічного коефіцієнта приймають за постійну величину [23, 26]. Беручи до уваги хімічний склад субстрату, а також швидкість процесу очистки стічних вод за різних систем, можна прогнозувати вплив вищезазначених факторів на величину економічного коефіцієнта [4, 20]. Останнє підтверджено дослідженнями [16, 22, 35], які показали, що час перебування стоків в аеротенку впливає на його продуктивність. Ці та інші дані дали можливість встановити, що значення економічного коефіцієнта залежить від режимів культивування стоків в аеротенку [15].

Враховуючи вищезазначене та спираючись на власні дослідження, Перт [15] запропонував математичну модель процесу очистки стоків, яка встановлює взаємозв'язок економічного коефіцієнта з питомою швидкістю росту мікроорганізмів.

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{1}{\gamma_{EG}} + \frac{m}{\mu}, \quad (5),$$

де: γ_{EG} – економічний коефіцієнт (кількість біомаси, яка утворилась з одиниці субстрату, без врахування витрат на життєдіяльність мікроорганізмів),

m – коефіцієнт витрат на підтримання життєдіяльності клітин, г субстрату / г біомаси реактора за годину,

Коефіцієнти γ та m є фізіологічними константами популяції мікроорганізмів, які використовують цей субстрат.

Такий підхід до характеристики процесів росту і культивування мікроорганізмів, що відбуваються в аеротенку, виявився найоптимальнішим і широко використовується на практиці [1, 10, 12, 14].

Лоуренс та ін. [26] запропонували математичну модель, яка встановлює зв'язок економічного коефіцієнта з технологічними параметрами процесу біологічної очистки стічних вод:

$$\frac{dx}{dt} = y \frac{ds}{dt} - bx, \quad (6),$$

де: x – концентрація біомаси, г/л,

t – час культивування, год,

y – економічний коефіцієнт (г біомаси/г субстрату),

b – коефіцієнт відмирання мікроорганізмів, год⁻¹.

Оскільки в основу цієї моделі покладено принцип залежності питомої швидкості росту мікроорганізмів від концентрації лімітуючого субстрату в біореакторі, що характерно для монокультури, широкого застосування для опису кінетики процесу їх росту в полікультурі вона не знайшла. Однак ця модель з успіхом була використана для опису процесу очистки стічних вод в біореакторі з поверненням біомаси [27, 30]. Продуктивність біореактора, яка розрахована на основі балансових рівнянь системи аеротенк-відстійник, за цієї моделі визначають:

$$P_x = \frac{y_{\max} \cdot Q(S_0 - S_1)}{1 + b \cdot \Theta_c}, \quad (7),$$

де: P_x – продукція активного мулу, кг/год,

Q – витрати вихідної рідини, м³/год,

Θ_c - вік активного мулу, год,

b – коефіцієнт відмирання мікроорганізмів, год⁻¹,

S_0 – концентрація субстрату на початку процесу, г/л,

S – концентрація субстрату, г/л.

У цьому рівнянні важливим є те, що в ньому враховано зв'язок віку активного мулу, який являє собою величину зворотною питомій швидкості його росту, з концентрацією біомаси в системі.

Аналізуючи вищенаведені математичні моделі опису процесів росту і культивування мікроорганізмів в біореакторі, слід зазначити, що

[Type text]

найоптимальнішою із них є модель, запропонована Пертом [15]. Вона включає, крім відомих показників, і загальноприйняті дані, які характеризують фізіологічні властивості мікроорганізмів.

Проведеними нами дослідженнями вдалось одержати нові дані щодо залежності питомої швидкості росту мікроорганізмів активного мулу від економічного коефіцієнта в процесі очистки стічних вод з рециркуляцією біомаси активного мулу. Провівши аналіз процесу біологічної очистки стічних вод з рециркуляцією біомаси активного мулу із відстійника в аеротенк, одержано ряд нових залежностей [8, 21]:

$$Y_{x/s} = \frac{f \cdot D}{m + D/Y_{EG}}, \quad (8),$$

де: $Y_{x/s}$ – економічний коефіцієнт, г біомаси / г субстрату,

f – коефіцієнт рециркуляції активного мулу,

D – швидкість розбавлення, год⁻¹,

m – константа енергетичного обміну, г субстрату · г⁻¹ біомаси · год⁻¹,

Y_{EG} – істинний економічний коефіцієнт, г біомаси · г⁻¹ субстрату.

Ця залежність дозволяє розрахувати концентрацію біомаси в аеротенку з рециркуляцією, тобто її поверненням:

$$\Delta X = \frac{\Delta S \cdot D}{m + D/Y_{EG}}, \quad (9),$$

де: ΔX – концентрація біомаси в біореакторі, г · л⁻¹,

ΔS – різниця початкової і кінцевої концентрації субстрату, г · л⁻¹.

Показником рециркуляції біомаси в реакторі є величина f , яку розраховують за формулою:

$$f = \frac{F_H \cdot \Delta X_H}{F \cdot \Delta X} \quad (10),$$

де: F – витрати рідини на вході в реактор, л · год⁻¹,

F_H – витрати надлишкової муло-рідинної суміші, л · год⁻¹,

ΔX_H – концентрація біомаси в надлишковій муло-рідинній суміші, л · год⁻¹.

За відсутності рециркуляції рідини ($f = 1$) виходячи із $\mu = f \cdot D$, тоді $\mu = D$, а концентрація біомаси в реакторі (ΔX) залежить тільки від швидкості розбавлення (D) і кількості спожитого субстрату (ΔS).

Якщо ж система працює в режимі повного повернення біомаси, тоді $f = 0$ і $F_n \cdot X_n = 0$, а питома швидкість росту мікроорганізмів залежить тільки від економічного коефіцієнта і розраховується за формулою:

$$X = \frac{\Delta S \cdot D}{m}, \quad (11),$$

де: x – концентрація біомаси в аеротенку, г/л^{-1} ,

ΔS – різниця початкової і кінцевої концентрації субстрату, $\text{г} \cdot \text{л}^{-1}$,

D – швидкість розбавлення, год^{-1} ,

m – константа енергетичного обміну, $\text{г субстрату} \cdot \text{г}^{-1} \text{ біомаси} \cdot \text{год}^{-1}$.

За цих умов концентрація біомаси в аеротенку має конкретне значення і залежить від енергетичної складової процесу.

Експериментальні дослідження, проведені з вивчення процесу очистки стічних вод свиногокомплексу з використанням полікультури мікроорганізмів активного мулу, підтвердили правильність наших розрахунків і зроблених висновків.

Такий підхід є дуже важливим, оскільки встановлює для опису процесів біологічної очистки стічних вод ряд технологічних параметрів, а саме коефіцієнт рециркуляції, швидкість розбавлення, споживання кисню, субстрату, приросту біомаси та ін., що дозволяє одержувати технологічні режими процесу та підвищити ефективність експлуатації обладнання. Однак при розрахунку процесу очистки рідких стоків тваринницьких об'єктів необхідно в кожному конкретному випадку визначати експериментально кінетичні і стехіометричні коефіцієнти.

Список літератури

1. Березин С.Е. Использование высоконагружаемой ступени для биоочистки стоков свиного комплекса «Надеево» / С.Е. Березин, В.И. Баженов, А.Н. Енов // Водоочистка. – 2006. – № 5. – С. 68 – 71.
2. Вавилин В.А. Время оборота биомассы и деструкция органического вещества в системах биологической очистки / В.А. Вавилин. – М.: Наука, 1986. – 144 с.
3. Вавилин В.А. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом / В.А. Вавилин, В.В. Васильев. – М.: Наука, 1979. – 119 с.
4. Вавилин В.А. Модель адаптации экосистемы активного ила к многокомпонентному загрязнителю / В.А. Вавилин, В.В. Васильев // ДАН СССР.- 1982. – Т. 276, №4. – С. 1012 – 1016.
5. Варфоломеев С.Д. Кинетические закономерности развития микробных популяций / С.Д. Варфоломеев // Современные проблемы биокинетики. – М.: Изд-во МГУ. – 1987. – С. 6 – 71.
6. Дворецкий Д.С. Компьютерное моделирование биотехнологических процессов и систем / Д.С.Дворецкий, С.М. Дворецкий – Тамбов: 2005. – 168 с.
7. Джонс Г.Л. Математическая модель роста бактерий и потребление субстрата при очистке посредством ила / Г.Л. Джонс// Математические модели контроля загрязнения воды. – М.: Мир, 1981. – 472 с.
8. Дослідження фізіологічних аспектів та технологічних параметрів використання микробних асоціацій активного мулу в системах біологічної очистки стічних вод тваринницьких підприємств / [О.С. Яремчук, С.П. Циганков, М.О. Захаренко, В.О. Коваленко] // Збірник наукових праць Вінницького ДАУ. – 2009. – Вип. 39. – С. 168-182.
9. Зінченко М.Г. Моделювання гідро-аеродинамічних процесів при анаеробному зброджуванні відходів тваринництва у біореакторі

- імобілізованою мікрофлорою / Зінченко М.Г., Тинда О.А. // Механізація сільськогосподарського виробництва. – 2010. – № 4/30. – С.93.
10. Карелин Я.М. Биохимическая очистка сточных вод предприятий пищевой промышленности / Карелин Я.М., Репин Б.Н. – М.: Пищевая промышленность, 1974. – 168 с.
11. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / Кафаров В.В. – М.: Химия. – 1968. – 380 с.
12. Кафаров В.В. Моделирование биохимических реакторов / В.В. Кафаров, А.Ю. Винаров, Л.С. Гордеев. – М.: Лесная пром-сть. – 1979. – 344 с.
13. Морозова К. М. Принципы расчета систем биологической очистки сточных вод / К.М. Морозова // Водоснабжение и санитарная техника. – 2009. – № 1. – С. 26 – 31.
14. Николаев А.Н. Интенсификация процессов микробного синтеза в пленочных аппаратах / А.Н. Николаев, Н.А. Войнов, В.М. Емельянов // Биотехнология. – 2006. – № 6. – С. 75 – 79.
15. Перт С.Дж. Основы культивирования микроорганизмов и клеток / Перт С.Дж. – М.: Мир, 1978. – 336 с.
16. Ружинська Л.І. Модель процесу анаеробного очищення стічної води в біореакторі з листовими нерухомими носіями іммобілізованої мікрофлори / Л.І. Ружинська, І.Г. Баранова // Наукові вісті НТУУ «КПІ». - 2009. – №2. – С.84 – 88.
17. Синев О.П. Интенсификация биологической очистки сточных вод / Синев О.П. – Киев.: Техника, 1983. – 110 с.
18. Цыганков С.П. Продуктивность реакторов при биологической очистке сточных вод / С.П. Цыганков, А.Н. Дергильова, Т.П. Слюсаренко // Известия вузов. Пищевая технология. – 1984. – №3 – С.73-75.
19. Швытов И.А. Математические модели роста численности клеточных популяций / И.А. Швытов // Математическое моделирование в биологии. М.: Наука, 1975. – С.54 – 61.

20. Яковлев С.В. Биохимические процессы в очистке сточных вод / Яковлев С.В., Кадюхина Т.А. – М.: Стройиздат, 1980. – 200 с.
21. Яремчук О.С. Теоретичні аспекти процесу ферментації відходів тваринницьких підприємств / О.С. Яремчук, М.О. Захаренко, В.О. Коваленко Збірник наукових праць Вінницького ДАУ. – 2009. – Вип. 40. – С. 119 – 128.
22. Benyes H.H. Secondary treatment alternatives :suspended growth / Benyes H.H. Mc Carty // Journ of the Enviromental End. Div. – Water Resesearch. – 1971. – № 5. – P. 621 – 640.
23. Eskenfelder W.W. Biological waste treatment / Eskenfelder W.W., O’connor D.G. – Oxford: Pergamon Press, 1961. – 138 p.
24. Kinetic aspects of Biological reactors with mixed populations for waste water treatment / Grau P., Tucek F., Dohanyos M., Holata I. // Environ. Protekt. End. – 1978. – Vol. 4, № 2. – P. 167 – 170.
25. Lawrence A.W. Kinetics of methane fermentation in anaerob treatment / Lawrence A.W., Mc Carty P.I. // Water Pollut. Contr. Fed. - 1969. – 41, № 2. – P. R. 1 – R.16.
26. Lawrence A.W. Unifid basis for biological treatment design and operation / Lawrence A.W., Mc Carty P.L. // I. Sanit. End. Div. Amer. Soc. Civil. Ends. – 1970. – 96 (SA3). – P. 737 – 778.
27. Marr G. Das mathematische Model als mittel zur hlanung von regelund mebeinrichtungen in der Abwassertechnik / Marr G., Hruschka H. / GWF-Wasser / Abwasser. – 1978. – Vol. 119, № 12 – S. 571 – 577.
28. Monod I. La technigue de culture continne: theorie et applications / I. Monod // Ana . Inst. Pasteur, Paris. – 1950. – Vol. 79. – P. 390 – 410.
29. Oasim Syed R. Effect of a bacterial culture product on biological Kinetics / Oasim Syed R., Stinehelfer M.L. // Water Pollut Contr. Fed. – 1982. – Vol. 54, № 3. – Part 1. P. 255 – 260.

30. Ognean T. Hadelarea si simularea procesului de epurare biologica cu namol active / Ognean T., Icopescu A. // Hidrotechnica. – 1980. – т. 25, №1. – P. 154 – 161.
31. Rao C.V. Total organic carbon-calibrated mathematical model for a completely mixed activated sludge waste-water treatment process / Rao C.V., Tuteca D., Nuns E. I // I. Applied Microbiology and Biotechnology. – 1978. – № 6. – P. 1 – 12.
32. Sykes R.M. Limiting nutrient concept in activated sludge models / R.M. Sykes // Water Pollut Contr. Fed. – 1981. – Vol. 53, № 7. – P. 1213 – 1218.
33. Urbini G. Nuovi metodi di verefica sperimentalle dellafunzionalsta di impianti a fanghi attivi: esempio applicator all’impianto di Cervia / Urbini G., Collivignarelli C., Olmo M. / Ing. Ambient. – 1982. – № 6. – P. 451 – 471.
34. Vasicek P.R. Use of kinetic study to optimize the activated sludge process / P.R. Vasicek // Water Pollut Contr. Fed. - 1982. – Vol. 54, № 8. – P. 1176 – 1184.
35. Weddle C.L. The viability and activity of activated sludge / Weddle C.L., Yenkin D. // Water Ressearch. – 1971. – № 5. – P. 621 – 640.

Характеристика моделей процессов роста и культивирования микроорганизмов в системах биологической очистки сточных вод

Яремчук А.С., Захаренко Н.А., Цыганков С.П.

Проведен анализ математических моделей процессов роста и культивирования популяций микроорганизмов активного ила в системах биологической очистки сточных вод. Показано влияние рециркуляции активного ила на кинетические и стехиометрические характеристики процесса очистки сточных вод. Установлена зависимость концентрации биомассы в аэротенке от скорости ее разбавления, а также использования субстрата и коэффициента рециркуляции.

Ключевые слова: модель роста микроорганизмов, активный ил, биомасса, аэротенк, коэффициент рециркуляции.

[Type text]

Description of models of processes of height and cultivation of microorganisms is in the systems of bioscrubbing of sewages.

A.Yaremchuk, N. Zakharenko, S. Tshygankov

The analysis of mathematical models of processes of height and cultivation of populations of microorganisms of active silt is conducted in the systems of the biological cleaning of sewages. Influence of recycling of active silt is shown on kinetic and stechiometrical descriptions of process of cleaning of sewages. It is indicated on dependence of concentration of biomass in an aerotank from speed of her dilution, and also use of substratum and recycling rate.

Key words: model microorganism growth, activated sludge, biomass, aerotank, recycling rate.