

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

Фахреддін Абдаллах Вахаб

УДК 66.015.23

**Моделювання та інтенсифікація процесу масообміну
в реакторах-аеротенках**

Спеціальність 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків - 2006

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано на кафедрі хімічної техніки та промислової екології Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” (НТУ “ХПІ”), м. Харків, Україна

Науковий керівник: доктор технічних наук ,професор
Шапоров Валерій Павлович,
Національний технічний університет “Харківський
політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України
(м. Харків), завідувач кафедри хімічної техніки та
промислової екології

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий
співробітник
Зозуля Олександр Федорович
Національний технічний університет "Харківський
політехнічний інститут " Міністерства освіти і науки України
(м. Харків), професор кафедри хімічної технології
неорганічних речовин, каталізу, екології

кандидат технічних наук
Суліма Анатолій Миколайович
Український науково-дослідний інститут хімічного
машинобудування (УкрНДІХіммаш), м. Харків, заступник
генерального директора з науково-дослідної та
конструкторської роботи

Провідна установа: Національний технічний університет “Львівська політехніка”
Міністерства освіти і науки України, м. Львів

Захист відбудеться “ 28“ _вересня 2006 року о 14 годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 64.050.05 у Національному технічному університеті “Харківський
політехнічний інститут” за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного
університету “Харківський політехнічний інститут”

Автореферат розісланий “15” серпня 2006 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Тимченко В.К.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У промисловості та комунальному господарстві є необхідність ефективного очищення стічних вод. Скид неочищених промислових або побутових стічних вод у водоймища приводить до вельми негативних наслідків, тому що відбувається їхнє забруднення. Води забруднених водоймищ можуть стати джерелом розповсюдження різних хвороб таких, як тиф, дизентерія, холера, гепатит та інші. У зв'язку із значним антропогенним впливом на навколишнє середовище дуже важливим є інтенсифікація процесів очистки побутових стічних вод і підвищення якості очищеної води. Для одержання якісної води витрачається досить багато матеріальних та енергетичних ресурсів, тому зниження їх витрат також є проблемним питанням. Одним з найбільш розповсюджених та перспективних напрямків є аеробна обробка стічних вод. Процес біологічного очищення стічних вод проводиться в аеротенках. Не дивлячись на те, що аеротенки використовують більше 50 років, а процеси, що відбуваються в них, досліджуються ще більше, уявлення щодо основних закономірностей процесів недостатні. Внаслідок цього очисні споруди часто мають збільшені будівельні об'єми, збільшені витрати енергії на компримування та витрати повітря і при цьому відносно низький ступінь очищення стічних вод. Наприклад, за літературними джерелами та деякими здобутими автором даними під час дослідження очисних споруд ступінь очищення по БСК₂₀ після аеротенку не перевищує 82-85%. Вибір найбільш ефективних рішень при проектуванні очисних споруд біологічного очищення стічних вод можливий лише при виявленні механізму і загальних закономірностей цього процесу, а також його математичного опису. Особливо це стосується ролі розчиненого кисню повітря у процесі очищення, гідродинамічних умов процесу і кінетики розчину O₂. Комплексне вирішування цих питань повинно базуватись на методології системного аналізу.

Використання відомих результатів досліджень мікробіологічних процесів, які характерні для виробництва кормових дріжджів, антибіотиків, ферментів, амінокислот і т.п. для процесів біологічного очищення стічних вод неможливе. Це пов'язане з тим, що на відміну від вищезазначеного мета біологічного очищення – це здобуття низьких рівнів концентрації субстрату в очищених стічних водах. Це означає, що у більшості випадків процес іде в інтервалі концентрацій субстрату, які обмежують зростання біомаси. Окрім цього, початкові концентрації органічних речовин в стічних водах значно менші ніж у мікробіологічних реакторах. Внаслідок цього у симбіозі активного мулу виживають популяції мікроорганізмів, в яких ендогенний метаболізм займає більшу частину загального метаболізму, ніж у мікробіологічних процесах.

Тому наукові дослідження процесу біологічного очищення стічних вод актуальні і необхідні, як з точки зору внеску щодо пізнання процесу і його управління, так і з практичної точки зору.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано на кафедрі хімічної техніки і промислової екології НТУ "ХПІ" у рамках госпдоговірної теми 53272 від 20.02.04 р. "Розробка концепції та нових технологій рекультивувати полігонів і переробки промислових і побутових відходів" з підприємством ТОВ "Укрпромекологія"(м.Харків) і договору про науково-творчу співдружність з ВАТ Чернівцілегмаш (м.Чернівці).

Мета і задача дослідження. Метою дослідження є дослідження гідродинаміки і масообміну в процесі біологічного очищення технологічних стічних вод в аеротенку, моделювання цього процесу, розробка підходів до проведення і керування безперервним процесом біологічного очищення стічних вод в аеротенках.

Для досягнення поставленої мети слід розв'язати такі задачі:

- узагальнити відомі дані щодо дослідження процесу масопередачі між газом та рідиною у трифазному псевдозрідженому шарі, дані щодо механізму і кінетики процесу біологічного очищення, конструкції аеротенків і аераторів;
- визначити механізм і кінетику процесу з виявленням ролі кисню повітря в цьому процесі;

- розробити математичну модель та алгоритм розрахунку стаціонарного профілю розчиненого кисню по об'єму аеротенка;
- удосконалити конструкцію аеротенка для очищення стічних вод.

Об'єктом дослідження є процес біологічного очищення технологічних стічних вод, який здійснюється в реакторах аераторах-аеротенках у трифазній системі: стічна вода-повітря-активний мул.

Предметом досліджень є кінетика і механізм процесу біологічного окислення, вплив гідродинамічних і масообмінних параметрів на інтенсивність процесу, ступінь очистки стічних вод і керованість процесу.

Методи дослідження. В роботі застосовувались методи фізичного та математичного моделювання досліджуваного процесу. Під час досліджень використовувались методи фізико-хімічного аналізу. Обробка результатів досліджень проводилась із застосуванням статистичних методів.

Наукова новизна отриманих результатів обумовлена всебічним аналізом методів та промислових технологічних установок для процесу біохімічної очистки технологічних стічних вод від органічних забруднень, вибором для досліджень перспективного напрямку та отриманими в роботі даними. В результаті системного підходу щодо формалізації експериментальних і літературних даних з цього питання в дисертації:

- вперше встановлено, що від концентрації розчиненого у воді кисню залежить формування визначеного симбіозу мікроорганізмів, які і здійснюють процес біохімічного розщеплення органічних речовин; визначено також, що найбільш інтенсивно процес біоокислення протікає за умов, якщо лімітуючою стадією процесу є швидкість біохімічної реакції у самій клітині; теоретично і практично доведено, що для забезпечення цих умов необхідно створення гідродинамічних параметрів в аеротенку, визначених в роботі, з забезпеченням граничного значення величини об'ємного коефіцієнту масовіддачі.
- запропоновано оригінальну структурну схему процесу руйнування органічних домішок та його механізм; розроблено нові математичні моделі процесу на мікро- і макрорівнях; визначено стаціонарний стан процесу за умови таких управляючих перемінних: швидкість потоку, концентрація забруднень у вхідному потоку і інтенсивність масопередачі кисню.
- виконано комплекс експериментальних досліджень і отримані експериментальні дані, які підтвердили адекватність розроблених моделей.
- одержала подальший розвиток теорія розрахунків прогресивних конструкцій аеротенків, на основі якої обґрунтовано і видано рекомендації щодо значного удосконалення конструкцій існуючих аеротенків.

Практичне значення одержаних результатів. На основі отриманих в роботі наукових результатів розроблено рекомендації щодо удосконалення процесу аерації в аеротенку за рахунок встановлення каскадних аераторів, що дозволяє досягти на промисловому обладнанні необхідних концентрацій кисню при зменшенні витрат повітря на аерацію. Таке конструктивне рішення дозволяє підвищити ступінь очищення стічних вод на 4-6 %. Ці рекомендації прийнято в проект і впроваджуватимуться під час реконструкції очисних споруд ВАТ "Чернівцілегмаш" (м. Чернівці).

.Практичну реалізацію роботи пов'язано також з впровадженням результатів досліджень в навчальний процес при викладанні спеціальних дисциплін, курсовому та дипломному проектуванні за спеціальністю 8.070801 "Екологія і охорона навколишнього середовища" на кафедрі хімічної техніки і промислової екології НТУ"ХП".

Особистий внесок здобувача. Під час підготовки дисертації здобувач особисто розробив математичну модель процесу, підготував і виконав експериментальні дослідження, проаналізував, обробив та узагальнив результати розрахункових і експериментальних досліджень.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і матеріали дисертації доповідались і обговорювались на таких науково-технічних конференціях: VI Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених "Екологія. Людина. Суспільство", (Київ, 2003 р.); III Міжнародна конференція "Молодь у вирішенні регіональних і транскордонних проблем екологічної безпеки, (Чернівці, 2004 р.); Міжнародна науково-практична конференція "Інтелектуальні системи прийняття рішень і інформаційні технології", (Чернівці, 2004р.); II Міжнародна науково-практична конференція "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я", (2004р.-Харків,) науково-технічних семінарах викладачів, співробітників, аспірантів, студентів на кафедрі хімічної техніки та промислової екології НТУ"ХПІ" (2002, 2003, 2004, 2005 р.).

Публікації. По темі дисертації опубліковано 5 робіт, в тому числі 3 статті в наукових фахових виданнях ВАК України.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 172 сторінки, 47 ілюстрацій по тексту, 6 таблиць на сторінках, додатків на 3 сторінках, списку використаних літературних джерел з 110 найменувань на сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** подано загальну характеристику роботи, обґрунтовано її актуальність та наукову новизну і практичну цінність, сформульовано мету і задачі роботи.

У **першому розділі** наведено аналітичний огляд існуючих процесів та конструкцій аеротенків, що використовуються для очищення технологічних стічних вод. З аналізу існуючого стану речей випливає, що можливості інтенсифікації досліджуваного процесу далеко не вичерпані, це й обумовлює актуальність даної роботи. В висновках до розділу обґрунтовані мета і задачі дослідження.

У **другому розділі** на основі сучасних уявлень про теоретичні основи процесу біохімічного окислення органічних домішок в стічних водах мікроорганізмами, теорії процесу масопереносу у трифазних системах та даних, що наведені в журналах контролю за функціонуванням промислових очисних споруд, розроблено теоретичне обґрунтування механізму і кінетики процесу, а також створені відповідні математичні моделі.

Спочатку було розроблено структурну модель процесу біохімічної очистки технологічних стічних вод при мінімальній концентрації (C_{min}) розчиненого кисню у воді, яка необхідна для стабілізації життєдіяльності організмів в стаціонарному режимі. На рисунку 1 наведено структурну модель для вищезазначених умов. Як видно, структурна модель враховує всі можливі стадії процесу для умов, коли лімітуючою стадією є біохімічна реакція. Виходячи зі структурної моделі, математичний опис процесу є системою трьох звичайних диференціальних рівнянь матеріального балансу.

$$\frac{dx_0}{d\tau} = -k_0 x_0 x_1 + k_{01} x_2 + k_{02} x_0 - k_{03} x_0^2,$$

$$\frac{dx_1}{d\tau} = -k_0 x_0 x_1 + k_{04} x_2 + A, \quad (1)$$

$$\frac{dx_2}{d\tau} = k_0 x_0 x_1 - k_{01} x_2.$$

Перше рівняння фактично описує збільшення біомаси, x_0 , в процесі очищення з урахуванням природного вимирання основної і супутньої груп мікроорганізмів і швидкості використання органічних забруднень. Друге рівняння описує зміну концентрації субстрату, x_1 , в процесі очищення. Таким чином, отримана модель (1) практично враховує усі недоліки відомих моделей з літературних джерел. У стаціонарному режимі:

$$\frac{dx_0}{d\tau} = \frac{dx_1}{d\tau} = \frac{dx_2}{d\tau} = 0$$

$$\text{Якщо ввести безрозмірні змінні у виді: } l = \frac{k_{01}k_{03}A}{k_0k_{02}(k_{01} - k_{04})}; m = \frac{k_{02}}{k_0}; n = \frac{k_{01}}{k_0};$$

$$Q = \frac{k_{02}}{k_{03}}; v = Q \frac{k_{04}}{k_{01}}; \delta = Q \frac{(k_{01} - k_{04})}{k_{01}}; t = k_0\tau; \varepsilon = \frac{x_i}{x_i^{nr}}; y = e_k - 1; i = 0, 1, 2, \dots \text{ то рівняння (1)}$$

можна представити у лінійному виді:

Рис. 1 Структурна модель процесу біохімічної очистки в аеротенку (лімітуюча стадія – біохімічна реакція при C_{min})

A – потік стічних вод на вході; A_1 – потік стічних вод на виході; x_0 – чисельність основної групи мікроорганізмів; x_1 – концентрація забруднюючих речовин на вході; x_2 – концентрація проміжних продуктів; x_3 – концентрація забруднюючих речовин на виході; $k_0 = k_1$ - коефіцієнт швидкості реакції утворення проміжних продуктів харчування основної групи $k_{01} = k_3 + k_2$; k_3 – швидкість природної загибелі основної групи мікроорганізмів; k_2 - швидкість споживання забруднюючих речовин основною групою мікроорганізмів; $k_{02} = v - k_3 - k_4$; v - коефіцієнт внутрішньої конкуренції основної групи; k_3 – швидкість загибелі основної групи мікроорганізмів; k_4 – коефіцієнт швидкості виходу з системи основної групи мікроорганізмів; $k_{03} = v$; $k_{04} = k_3$.

$$\frac{dy_0}{dt} = - (l + m) y_0 - l y_1 + l y_2,$$

$$\frac{dy_1}{dt} = - Q y_0 - Q y_1 + n y_2, \quad (2)$$

$$\frac{dy_2}{dt} = n (y_0 + y_1 - y_2).$$

Аналіз лінеаризованої системи (2) з урахуванням теорії сталості систем (Ляпунова) виявив, що в діапазоні параметрів, що регулюються, вхідного потоку d від $d = 0.5$ до $d = 10.5$, тобто в діапазоні, який спостерігається в промислових умовах, стаціонарний стан є сталим. Аналогічні результати отримані і для параметру l . При вирішуванні

характеристичного рівняння системи (2) отримано один корінь дійсний (λ_0), два інших корені (λ_1, λ_2) комплексні, які мають числові значення менше нуля (для комплексних коренів менше нуля значення під коренем). Таким чином, при C_{\min} система аеротенка працює в сталому режимі.

При умовах безперервного процесу в проточній системі виникають обмеження щодо швидкості збільшення біомаси основної групи мікроорганізмів, суттєве коливання концентрації розчиненого кисню по об'єму аеротенку, тому необхідно враховувати об'ємний коефіцієнт масовіддачі по O_2 (K_{La}). Вищезазначене також витікає з аналізу рівнянь (1). У динамічних умовах змінюються коефіцієнти ν, k_2, k_0, k_3 . Окрім цього, оскільки розчинення кисню в стічних водах залежить від гідродинамічних умов (інтенсивності аерації) треба ввести обмеження на максимально можливу величину інтенсивності розчинення кисню, яка визначатиметься величиною об'ємного коефіцієнту масовіддачі і швидкістю його досягнення. Це обмеження введено тому, що при дуже інтенсивній аерації можна пошкодити тонку стінку клітин живих мікроорганізмів. Інтенсивність аерації оцінювалась безрозмірним співвідношенням:

$$\frac{k_c Y_c}{k_s Y_s} \cdot \frac{k_{La}}{\mu_m} \cdot \kappa_p, \quad (3)$$

де μ_m – максимальна швидкість росту мікроорганізмів, ч^{-1} ; k_c, k_s – константи насичення по кисню і субстрату, г/л ; Y_c, Y_s – економічні коефіцієнти по кисню і субстрату, k_{La} – об'ємний коефіцієнт масовіддачі по кисню, ч^{-1} .

Середня швидкість зростання біомаси мікроорганізмів μ визначається за рівнянням:

$$\mu = \mu_m \frac{x_1}{k_s + S} \cdot \frac{C}{k_c + C}, \quad (4)$$

де μ_m – максимальна швидкість зростання, ч^{-1} , S і C – концентрації забруднень в стічних водах і кисню відповідно, г/л , k_c і k_s – константи насичення (константи Моно) по кисню і субстрату відповідно, г/л .

При створенні математичної моделі для динамічних умов були прийняті такі припущення:

- суміш в аеротенку добре перемішується, режим потоку близький до моделі ідеального змішування – витіснення;
- вхідний і вихідний потоки рівні поміж собою ($A = A_1$);
- процес протікає при постійних умовах (P_h , тиск, температура) і постійних коефіцієнтах k_c і k_s .

Згідно даних, наведених в журналах контролю за процесом на підприємствах, і літературних даних, основні групи мікроорганізмів при сталому процесі в аеротенку при C_{\min} – це *Pseudomonas*, *Bacterium*, *Bacillus*, кількість яких від усієї групи мікроорганізмів (біоценоза) складає 70-80%. Враховуючи вищезазначене, а також обмеження по кисню приймаємо $k_s = 70\%$.

Тоді математичний опис процесу в динамічних умовах буде представлений у виді системи трьох звичайних нелінійних диференціальних рівнянь:

$$\frac{dx_0}{dt} = -\frac{A}{v} x_0 + \mu_m \frac{S}{k_s + S} \cdot \frac{C x_0}{k_c + C}$$

$$\frac{dS}{d\tau} = +\frac{A}{v}(x_0 - S) - \frac{1}{Y_s} \mu_m \frac{S}{k_s + S} \cdot \frac{Cx_0}{k_c + C} \quad (5)$$

$$\frac{dC}{d\tau} = +k_{La}(C_p - C) - \frac{1}{Y_c} \mu_m \frac{S}{k_s + S} \cdot \frac{Cx_0}{k_c + C}$$

де n – об'єм рідини в аеротенку, л.

Вводимо безрозмірні змінні:

$$k = \frac{k_{La}}{\mu_m}; W = \frac{C}{k_c}; W_p = \frac{C_p}{k_c}; x = \frac{x_0}{k_s y_s}; y = \frac{S}{k_s}; y_0 = \frac{x_0}{k_s}; m = \frac{A}{v \mu_m}; n = \frac{k_c y_c}{k_s y_s}; t = \mu_m \tau. \quad (6)$$

Тоді модель матиме вид:

$$\frac{dx}{dt} = y - mx + \frac{y}{1+y} \cdot \frac{W}{1+W} x$$

$$\frac{dy}{dt} = +m(y_0 - y) - \frac{y}{1+y} \cdot \frac{W}{1+W} x \quad (7)$$

$$n \frac{dW}{dt} = +nk(W_p - W) - \frac{y}{1+y} \cdot \frac{W}{1+W} x$$

Рішення системи рівнянь при $\frac{dx}{dt} = \frac{dy}{dt} = n \frac{dW}{dt} = 0$, виявило, що існує два сталих стаціонарних стани. Перше: $x_1 = 0$; $y_1 = 0$; $W_1 = W_p$ відповідає режиму вимивання активного мулу з робочого об'єму аеротенка.

Друге:

$$x_2 = \frac{1}{2} \left[\left(y_0 - \frac{m}{1-m} \right) + \frac{nk}{m} \left(W_p - \frac{m}{1-m} \right) \right] - \frac{1}{2} \times$$

$$\times \sqrt{\left[\left(y_0 - \frac{m}{1-m} \right) + \frac{nk}{m} \left(W_p - \frac{m}{1-m} \right) \right]^2 - 4 \frac{nk}{m(1-m)} (1+y_0)(1+W_p)(m_B - m)}; \quad (8)$$

$$W_2 = W_p - \frac{m}{nk} x_2$$

$$y_2 = y_0 - x_2$$

де $m_B = y_0 W_p [(1+y_0)(1+W_p)]$ - швидкість вимивання (мінімальна), при якій увесь активний мул виноситься з аеротенку. Ця швидкість визначає границю між режимами утворення $m < m_B$ і вимивання $m \geq m_B$ біомаси.

Під час аналізу рішення було прийнято $W_B = 2-10$; $10.2 \leq y_0 \leq 10$; $nk = 0.07$; $x = 0-10$; $y = 0-10$.

Сталий динамічний стан системи визначається трьома змінними: концентрацією біомаси активного мулу, x , концентрацією забруднень, y , і концентрацією кисню W . Зміна стану відбувається за допомогою змін безрозмірних змінних m , y_0 і nk . За допомогою моделей (5-8) розраховувались сталі стани x , y , W в аеротенку при варіації m , y_0 , nk . На рис. 2 представлені розрахунки при варіації m , nk .

Рис.2 Залежності x, y, W в об'ємі аеротенку від m і nk при $y_0 = 10$, $W_p = 10$, $nk: nk_1 = 0.06$, $nk_2 = 0.45$, $nk_3 = 0.55$. Штрихова лінія – нижній інтервал, що обмежує допустиму концентрацію $O_2 = W_{\min} = 0.3 W_p$.

В роботі представлені залежності різноманітних варіацій m , y_0 , nk .

Основний висновок, який випливає з аналізу моделі, є такий, що при будь-яких значеннях перемінних в вищезазначених інтервалах основним чинником управління процесом біохімічного очищення стічних вод є величина k_{La} (nk) і швидкість її досягнення. Таким чином, якщо відомі значення k_{La} для досліджуваної системи в залежності від ефективності аераторів, то використовуючи ці значення і математичну модель, можна виконувати розрахунки, прогноз і вибір найбільш ефективної конструкції аеротенка. Але для досліджуваних систем значення k_{La} в літературних джерелах відсутні і не визначені. Тому наступні розділи присвячені дослідженням гідродинаміки та виявленню значень k_{La} в системі вода-повітря-активний мул.

В третьому розділі представлені характеристики промислових водоочисних споруд, в яких проводилися дослідження, схема регулювання процесу в промисловому аеротенку, його конструкція. Окрім того представлено опис експериментальної установки для дослідження трифазної системи, методи вимірювання та контролю за основними параметрами, методи обробки експериментальних результатів та ін.

На рисунку 3 представлено схему експериментальної установки.

Азот

Повітря

Рис.3. Схема експериментальної установки.

СВ – соленоїдний вентиль; В – регулюючий вентиль, Р – ротаметри; 1 - основний повітряний вентиль; 2 – повітря; 3 – Абсорбційна колона; 4 – десорбційна колона; 5,6 – вихід; 7 – закручена екрануюча пара; 8 – пробовідбірна лінія; 9 – збиральна лійка; 10 – розподільник газу; 11 – 0 – 5В до ЕОМ; 12 – вакуум-насос.

Відповідно до рис. 3 ступенева зміна концентрації кисню (індикатор) на вході в колону 3 виконувалось за рахунок введення чистого кисню в загальний потік повітря за

допомогою соленоїдних вентилів СВ_{1,2}. Для збору та відбору проб газу, що виходить з поз. 3 використовувалась лійка 9. На лінії відбору проб передбачено пристрій для видалення крапель води перед входом до ІЧ-аналізатора 7. Сигнал з аналізатора з напругою 0-5В кожні 0,5 с подавався на ЕОМ. Кожна крива відклику записувалась на диску в персональні файли даних для наступної обробки.

Процедура визначення k_{La} полягала в тому, що одним з відомих методів по відомому рівнянню, яке здобує з використанням перетворень Фур'є до кривих відклику, будувались теоретичні криві відклику за рівнянням:

$$y(t) = \frac{t}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n}{\omega_n} \sin(\omega_n t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{\omega_n} [1 - \cos(\omega_n t)], \quad (9)$$

де T – час, необхідний для досягнення 99.5% стаціонарного сигналу (період рядів Фур'є), с; $\omega_n = 2\pi R/T$; $a_n = -(2/T) \cdot J_m[F\{j\omega_n\}]$; $b_n = \{2/T\} \cdot \text{Re}[F\{j\omega_n\}]$, Re – функція дійсної частини, J_m – функція уявної частини. Вибір кращих параметрів k_{La} – відповідає значенню R , яке мінімізує суму квадратів відхилень між теоретичною кривою та експериментальною кривою відклику. R – номер лінійного рівняння.

В розділі доведено, що методи і методики, які використовувались в роботі, дозволяють достовірно оцінювати як біоценоз, так і гідродинамічні обставини в аеротенку, а також визначення k_{La} .

В четвертому розділі представлені результати експериментальних досліджень процесу масопередачі між газом і рідиною у трифазній системі на експериментальній установці. На рисунку 4 представлено типи барботерів, які використовувались під час досліджень.

Експериментальні результати визначення залежності величин k_{La} від різних чинників (u_r – швидкості газу; u_L – швидкості рідини; u_T – швидкості осідання часток; типу контактора; густини і розміру матеріалу часток; $\epsilon_{\text{в}}$ – утримуючої здатності по твердій фазі, в'язкості рідини) наведени на рисунках 5-10.

Повний аналіз отриманих результатів приведено в дисертації. Основний висновок з аналізу спостережень той, що система вода-повітря-тверде підпорядковується відомим закономірностям, які впливають з теорії масопередачі в двофазних і трифазних системах. Густина часток твердої фази та їхній розмір і концентрація впливають на величину газотримання. зменшують міжфазну поверхню і зменшують k_{La} . Як і слід було очікувати, значення k_{La} зростає одночасно із зростанням швидкості газу u_r . Швидкість рідини u_L має невеликий вплив на k_{La} . Значний вплив має величина в'язкості рідини (системи). Взагалі з наведених даних випливає, що при інших рівних умовах основним чинником, що впливає на k_{La} , є тип контактора, тобто аератора.

1 – перфорований конус; 2 – перфорована тарілка; 3 – опора корпусу абсорбційної

КОЛОНИ

1 – барботер (а), отвори 0,015 м, шаг між отворами 0,007 м; 2 – перфорована тарілка, отвори $d=0,002-0,003$ м, вільний переріз 40%

1 – контактор (в), 2 – кільцевий розподільувач (тор), діаметр тора 0,010 м, 38 – еквидистант отворів $d = 0,001$ м

1, 2 – два кільцевих розподільувача,
1 – складає 0,5 діаметра 2

Рис.4 Типи барботерів, які використовувались на експериментальній установці

Від типу аератора залежить газотримання і величина міжфазної поверхні. Окрім цього (рис. 10) встановлено, що поведінка реальної системи вода-повітря-активний мул практично ідентична модельним системам (рис. 5-9). Залежності зміни k_{La} від різних чинників в реальній системі і граничні значення k_{La} також практично ідентичні, тобто реальна система підпорядковується тим же закономірностям. Усі експериментальні дані, які отримані в четвертому розділі, були оброблені з використанням нелінійного регресійного аналізу, в результаті були здобуті рівняння для розрахунку k_{La} при використанні найбільш ефективних контакторів (г) і (д) (рис.4) від u_T та в'язкості системи.

Для в'язких здобуто емпіричне рівняння:

$$k_{La}/D_T^{0.5} = 2988 u_T^{0.5} u_L^{0.4} M_{eff}^{-0.3} u_T^{0.7}, \quad (10)$$

де D_T - коефіцієнт дифузії кисню в рідині.

Рис. 5 Значення k_{La} в залежності від типу контактора (К), Δ - К(а); \blacktriangle - К(в); \circ - К(б); \bullet - К(г); \square - К(д) (рис. 4)

Рис.6 Вплив утримуючої здатності по твердій фазі e_s на k_{La} , $u_L = 0.82$ см/с; частки полістиролу 1 мм;
 \bullet - $e_s = 0.137$; \blacksquare - $e_s = 0.047$;
К(г)

Рис.7 Вплив характерних твердих часток і лінійних швидкостей рідини на k_{La} , $u_L = 0.82$ см/с; Δ - частки активного мулу – 0.5 мм; \blacktriangle -частки полістиролу 1 мм; $(\bullet$ - частки полістиролу – 1 мм, * - частки найлону – 2.5 мм; $u_{La} = 2.5$ см/с), $e_s = 0.136$.

Рис.8 Залежність k_{La} від ефективної в'язкості при $u_L = 0.051$ м/с; $e_s = 0.41$; полістирол – 1 мм; Δ - вода; \circ, \bullet - розчини КМЦ; ----- літературні джерела з скляними кульками $d = 2$ мм

Рис. 9 Значення k_{La} при різних псевдопластичних рідинах (тв. част. – полістирол, $e_s = 0.136$; К(г). Рідина: вода, розчин КМЦ з різною в'язкістю; $u_L = 0.82$ см/с, \bullet - вода – 0.685 МПа.с; \blacktriangle - 20 МПа.с; - 50 МПа.с

Рис. 10. Значення k_{La} в залежності від типу контактора (К). Система: стічна вода – активний мул – повітря. Доза

активного мулу - 4 г/л,
 $e_s = 0.047$; Δ - K(a); \bullet - K(r);
 \square - K(d); $u_L = 0.82$ м/с

Здобує рівняння є справедливим в таких діапазонах зміни змінних величин:
 $0.017 \leq u_T \text{ м/с} \leq 0.25$; $0.01 \leq u_L \text{ м/с} \leq 0.25$; $0.001 \leq M_{\text{eff}} \text{ Па.с} \leq 0.2$, $0.08 \leq u_T \text{ м/с} \leq 0.6$, чисел Рейнольдса до 4800.

Для нев'язких систем справедливим є таке рівняння:

$$(k_{La})_{O_2} = 12; u_T^{0.8} (C_s \text{ до } 10 \text{ кг/м}^3; u_T < 0.06 \text{ м/с}) \quad (11)$$

Здобує також рівняння, яке відображає залежність рівноважної концентрації кисню по висоті шару рідини:

$$C_0^1 = y_0 P / He = y_0 P_T [1 + Y(1-e)] / He, \quad (12)$$

де P - тиск у зрідженому шарі, He - константа Генрі, P_T – атмосферний тиск, y_0 – мольна доля кисню у повітрі, змінна Y визначається рівністю:

$$Y = (e_s c_s + e_e c_e + e_g c_g) gH / P_T, \quad (13)$$

де e_s , e_e , e_g – відповідно об'ємні доли твердої, рідкої та газової фаз в системі; c_s , c_e , c_g – відповідно густини фаз.

Таким чином, отримані в розділі 4 експериментальні дані дозволили визначити величину k_{La} в досліджуваній системі, вивести рівняння для розрахунку цієї величини, а також концентрацій кисню по висоті шару рідини. Здобуті дані дозволяють ефективно користуватись математичною моделлю процесу (розділ 2).

П'ятий розділ присвячено дослідженню і керуванню процесом біологічного очищення технологічних стічних вод в промисловому аеротенку. Спочатку були проведені дослідження на існуючому промисловому аеротенку, в якому використовувались стандартні аератори – фільтросні труби, укладені по дну аеротенка. При дослідженні було виявлено, що розподіл концентрацій кисню по висоті шару рідини і по зонах аеротенка нерівномірний. Так, в безпосередній близькості до фільтросних труб концентрація кисню складає біля 5 мг/л, через 1.5 м по висоті шару вона падає до 2 мг/л, а на виході з аеротенка в зоні подачі рідини у вторинний відстійник, концентрація кисню менше 2 мг/л, тобто менше $C_{\text{min } O_2}$. Вочевидь, що конструкція аеротенка не забезпечує режим повного змішування, внаслідок чого на виході з аеротенку ступінь очищення стічних вод складає 83-85%, а середнє значення k_{La} не перевищує 0.076 с^{-1} . При цьому співвідношення основних груп мікроорганізмів *Pseudomonas/Bacterium/ Bacillus/Protozoa* складає 1:1,15:0.125:0.6, тобто в біоценозі переважає вид *Bacterium*, який, як відомо повільніше окислює органічні домішки, ніж *Pseudomonas*.

Далі в розділі були обґрунтовані інженерні рішення щодо реконструкції аеротенка з використанням аераторів по типу (Г), (Д) (див. розділ 4). Після реконструкції досліджувалось два типи аеротенків, в яких біли реалізовані комірчаста модель потоку та комбінована модель потоку: ідеальне змішування та ідеальне витіснення. Результати досліджень довели, що в обох типах аеротенків біоценоз мав таке співвідношення мікроорганізмів *Pseudomonas/Bacterium/ Bacillus/Protozoa* = 1:0.41:0.2:0.4. Тобто очевидно, що після реконструкції переважає вид *Pseudomonas*. При цьому градієнт концентрації розчиненого кисню по висоті шару рідини не перевищує 0.5 мг/л, концентрація розчиненого кисню в аеротенку і на виході складає в середньому 3.4- 3.8 мг/л. Ступінь

очищення стічних вод на виході з аеротенку складає 91-92%, середнє значення k_{La} складає 0.12 с^{-1} , тобто сягає граничних значень, які визначені в розділі 4. При цьому слід відзначити, що наведені показники в реконструйованих аеротенках досягнуті при значному зменшенні витрат повітря на аерацію. Так, відповідно регламенту, у промисловому аеротенку витрати повітря на аерацію складають $\approx 17 \text{ м}^3 / \text{м}^3$, в аеротенках після реконструкції витрати повітря на аерацію склали $(8-11) \text{ м}^3 / \text{м}^3$. Окрім того в реконструйованих аеротенках була доведена можливість зменшення дози мулу в 2,5 рази і зниження масової долі повернення мулу з 60 до 40%.

Таким чином, в розділі 5 було доведено, що запропоновані в розділі 2 механізм процесу і математична модель є адекватними. Доведено перевагу нових типів аераторів, що використані при реконструкції аеротенків. Визначено, що в реконструйованих аеротенках підвищується ступінь очищення стічних вод на 4-6% і зменшується витрата повітря на аерацію в 1,5-2 рази.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено науково-практичне завдання моделювання, інтенсифікації процесом масообміну в аеротенках при очищенні технологічних стічних вод. На основі цих досліджень запропоновані перспективні конструкції аераторів і інженерні заходи для реконструкції аеротенків.

1. Проаналізовано сучасний стан рівня знань щодо механізму, кінетики процесів біологічного окислення в аеротенках, проаналізовано апаратурно-технологічне оформлення процесу, встановлено ряд задач, відсутність рішення яких не дозволяє провести інтенсифікацію процесу і утруднює керування ним.

2. В результаті реалізації системного підходу до формалізації феноменологічних даних по біохімічному очищенню стічних вод і результатів контролю за промисловим процесом в аеротенку. Запропоновано структурну схему і механізм процесу, а також математичну модель процесу, які дозволяють трактувати практично всі суперечні явища і питання, відомі з літературних джерел. Розроблена математична модель та її аналіз дозволили виявити стаціонарні стани процесу при основних керуючих змінних: швидкості потоку, концентрації забруднень у вхідному потоці та інтенсивність масопередачі кисню, яка визначається значенням об'ємного коефіцієнту масовіддачі (k_{La}).

3. Виявлено роль розчиненого кисню в процесі біохімічного очищення стічних вод, яка полягає в тому, що від концентрації розчиненого кисню і рівномірності розподілу концентрації по об'єму залежить кількісний і видовий склад біоценозу, який здійснює багатостадійні процеси біохімічної деструкції органічних речовин. Встановлені граничні концентрації розчиненого кисню, при яких біоценоз забезпечує ефективне очищення стічних вод, виявлений кількісний і видовий склад мікроорганізмів для цих умов.

4. Визначено, що граничні концентрації розчиненого кисню однозначно визначаються величиною k_{La} , яка залежить від гідродинамічних обставин і моделі потоку, що реалізується в аеротенку, при цьому визначну роль має тип і конструкції аератора.

5. Встановлені граничні значення об'ємного коефіцієнта масовіддачі k_{La} , які можуть бути досягнуті при реалізації різних систем аерації і моделей потоків в аеротенку. В результаті досліджень виявлені найбільш раціональні конструкції систем аерації і конструкцій аеротенків, що забезпечують реалізацію комірчастої та комбінованої (ідеальне змішування-ідеальне витіснення) моделей потоків.

6. Доведено адекватність математичної моделі процесу і методів керування процесом за допомогою вищезазначених змінних при проведенні промислових експериментів в аеротенках, в яких реалізовані різні схеми аерації і, відповідно, моделі потоків.

7. Визначені режими процесів біологічного очищення стічних вод, при яких досягається підвищення ступеню очищення на 4-6%, зниження витрат повітря на аерацію в 1,5-2 рази, зменшення доля зворотного мулу на 30% і покращання показників у вторинному

відстійнику. На основі цих режимів розроблені і видані рекомендації з удосконалення конструкції аеротенків і процесу біологічного очищення стічних вод, які прийняті до практичного впровадження і будуть використані при реконструкції очисних споруд ВАТ "Чернівцілегмаш".

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Фахреддин Абдаллах Вахаб, Шапоров В.П. Очистка бытовых сточных вод. Обзор// Вісник Національного технічного університету "ХПІ".- Харків: НТУ "ХПІ". – 2003.- Вип. 15 -С. 92-108.

Здобувачу належить узагальнення даних щодо процесу біохімічного очищення стічних вод і конструкціям аеротенків

2. Фахреддин Абдаллах Вахаб, Новожилова Т.Б., Шапоров В.П. Инженерные аспекты очистки сточных вод // Вісник Національного технічного університету "ХПІ".- Харків: НТУ "ХПІ".- 2004.- Вип. 13 – С. 57-70.

Здобувачем проведено аналіз і дослідження ефективності різних конструкцій аераторів і порівняння їх ефективності

3. Шапоров В.П., Фахреддин Абдаллах Вахаб , Лопухина О.А. Механизм и математическая модель процесса биологической очистки сточных вод от органических соединений в аэротенках // Восточно-Европейский журнал передовых технологий.- Харьков: Технологический центр.- 2004.- №2 [8]- С. 45-52.

Здобувачу належить розробка математичного опису процесу масообміну.

4. Фахреддин Абдаллах Вахаб, Шапоров В.П., Новожилова Т.Б. Использование реакторов псевдооживленного слоя в биотехнологии – перспективное направление создания новых технологий очистки сточных вод// Матеріали Третьої Міжнародної конференції "Молодь у вирішенні регіональних та транскордонних проблем екологічної безпеки. Перспективи формування Паневропейської Екологічної мережі (м. Чернівці, 21-22 квітня 2004 р.).- Чернівці: Зелена Буковина.-2004 .-С. 148-153.

Здобувачу належить розробка рекомендацій з удосконалення процесу біохімічного очищення стічних вод.

5. Новожилова Т.Б., Фахреддин Абдаллах Вахаб , Утилизация осадков городских сточных вод с получением биогаза // УІ Міжнародная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Экология. Человек. Общество" (14-17 мая.- 2003.- Киев: Украина, Сб. тезисов докладов) –Київ, НТУУ "КПІ" .-2003.- С. 169-170.

Здобувачем розроблено рекомендації з подальшого удосконалення процесу біологічного очищення стічних вод.

АНОТАЦІЇ

Фахреддін Абдаллах Вахаб . Моделирование та інтенсифікація процесу масообміну в реакторах-аеротенках. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України, Харків, 2005 р.

Дисертацію присвячено науковому обґрунтуванню та розробці напрямків інтенсифікації процесу очищення технологічних стічних вод в аеротенках з метою підвищення якості очищеної води і зменшення матеріальних і енергетичних витрат.

В результаті реалізації системного підходу щодо процесу біохімічного очищення стічних вод вперше запропоновано структурну модель і механізм процесу, а також математичну модель. Розроблена математична модель і її аналіз дозволили виявити стаціонарні стани процесу при основних керуючих змінних, таких як швидкість потоку, концентрації забруднень у вхідному потоку і інтенсивність масопередачі кисню, що визначається значенням об’ємного коефіцієнту масовіддачі. Визначено роль розчиненого кисню в процесі біохімічного очищення стічних вод, яка полягає в тому, що від концентрації розчиненого кисню і рівномірності розподілу концентрації по об’єму залежить кількісний і видовий склад біоценозу. Встановлені граничні концентрації розчиненого кисню, при яких біоценоз забезпечує ефективне очищення стічних вод. Визначено, що граничні концентрації кисню однозначно визначаються величиною об’ємного коефіцієнту масовіддачі, котра залежить від гідродинамічних обставин і реалізації моделі потоку в аеротенку, при цьому визначну роль має тип і конструкція аератора. Встановлені граничні значення об’ємного коефіцієнту масовіддачі при реалізації різних систем аерації і моделей потоків в аеротенку. Доведено, що найбільш ефективно процес протікає, якщо в аеротенку реалізуються моделі потоків: “комірчаста” і комбінована (ідеальне змішування – ідеальне витіснення).

Використовуючи математичну модель і результати досліджень, були проведені розрахунки та обґрунтовано реконструкцію аеротенка. При реалізації процесу в реконструйованому аеротенку доведена адекватність математичної моделі. Реалізація нових рішень, здобутих в роботі, дозволяє підвищити ступінь очищення стічних вод на 4-6%, зменшити витрати повітря в 1,5-2 рази, а також зменшити долю зворотного мулу на 30% і покращити показники у вторинному відстійнику.

Ключові слова: Процес масообміну, масопередача, об’ємний коефіцієнт масовіддачі, аератор, аеротенк.

Фахреддин Абдаллах Вахаб. Моделирование и интенсификация процесса массообмена в реакторах-аэротенках. - Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии – Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт” Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2005 г.

Диссертация посвящена моделированию и управлению процессом массообмена в аэротенках при очистке технологических сточных вод и разработке рекомендаций по интенсификации процесса.

Актуальность поставленной задачи очевидна, так как несмотря на то, что аэротенки используются более 50 лет, а процессы, которые в них протекают исследовались еще раньше, представление об основных закономерностях противоречивы и недостаточны. В литературе практически отсутствуют надежные данные о механизме и кинетике процесса,

роли растворенного кислорода, гидродинамике и др. Использование известных результатов исследований микробиологических процессов, которые характерны для производств кормовых дрожжей, антибиотиков, ферментов, аминокислот для рассматриваемой системы неприменимы. Поэтому в данной работе и была поставлена задача разработки адекватной математической модели процесса, выявления основных управляющих переменных процессом и на основе этого разработки рекомендаций по усовершенствованию конструкции аэротенка и интенсификации процесса. В результате реализации системного подхода к процессу биохимической очистки сточных вод впервые предложена структурная модель и механизм процесса, а также разработана математическая модель. Математическая модель и ее анализ позволили выявить стационарные состояния системы при таких основных управляющих переменных: скорость потока, концентрация загрязнений во входном потоке, интенсивность массопередачи по кислороду, определяемая значением объемного коэффициента массопередачи. Определена роль растворенного кислорода в процессе биохимической очистки сточных вод, которая заключается в том, что от концентрации растворенного кислорода и равномерности его распределения по объему системы зависит количественный и видовой состав биоценоза. Определены предельные концентрации растворенного кислорода, при которых биоценоз обеспечивает эффективную очистку сточных вод.

Выявлено, что предельные концентрации кислорода однозначно определяются величиной объемного коэффициента массоотдачи, который зависит от гидродинамической обстановки и реализации той или иной модели потока в аэротенке. При этом определяющая роль отдается типу и конструкции аэратора. Определены предельные значения коэффициента массоотдачи при реализации различных систем и моделей потоков в аэротенке. Показано, что наиболее эффективно процесс протекает, если в аэротенке реализуются такие модели потоков: "ячеечная" и комбинированная (идеальное смешение – идеальное вытеснение).

Используя математическую модель и результаты исследований, были выполнены расчеты и обоснование для реконструкции аэротенка. При реализации процесса в реконструированных аэротенках доказана адекватность математической модели. Реализация новых решений, полученных в работе, позволила увеличить степень очистки на 4-6%, уменьшить расход воздуха в 1,5 – 2 раза, уменьшить долю возвращаемого ила на 30% и улучшить показатели во вторичных отстойниках.

Ключевые слова: Процесс массообмена, массопередача, объемный коэффициент массоотдачи, аэратор, аэротенк.

Fahreiddin Abdallah Vahab. Modelling and intensification by process of mass transfer in reactors - aerotenks . - Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science on a speciality 05.17.08 - processes and equipment of chemical technology - National technical university "the Kharkov polytechnic institute" Ministries of education and sciences of Ukraine, Kharkov, 2005.

The dissertation is devoted to modelling and process control of mass transfer in aerotenks at clearing technological sewage and development of the recommendations on intensification of process.

The urgency of the put task is obvious, as in spite of the fact that aerotenk more than 50 years will be utilised, and processes, which in them proceed were investigated even earlier, representation about the basic laws are inconsistent and are insufficient. In the literature practically there are no reliable data on the mechanism and kinetics of process, role of the dissolved oxygen,

hydrodynamics etc. Use of known results of researches of microbiological processes, which are characteristic for productions fodder of yeast, antibiotics, ferments, of amino acids for considered system are inapplicable. Therefore in the given work a task of development of adequate mathematical model of process, revealing of the basic managers of variable process also was put and on the basis of it of development of the recommendations on improvement of a design aerorenk and intensification of process. As a result of realisation of systems approach to process of biochemical clearing of sewage structural model and mechanism of process for the first time is offered, and also the mathematical model is developed. Mathematical model and its analysis have allowed to reveal stationary states of system at such basic managers variable: rate of flow, concentration of pollution in an entrance flow, intensity of material transfer on oxygen determined by meaning of a volumetric mass-transfer coefficient. The role of the dissolved oxygen is determined during biochemical clearing of sewage, which consists that on concentration of the dissolved oxygen and uniformity of his distribution on volume basis systems depends quantitative and composition biozenoz. The limiting concentration of the dissolved oxygen are determined, at which biozenoz provides effective clearing of sewage.

Is revealed, that the limiting concentration of oxygen are unique defined by size of volumetric factor mass feed back, which depends on hydrodynamic conditions and realisation of this or that model of a flow in aerorenk. Thus the determining role is given back to a type and design of an aerator. The limiting values of factor mass feed back are determined at realisation of various systems and models of flows in aerorenk. Is shown, that is most effective process proceeds, if in aerorenk such models of flows are realised: "cells" and combined (theoretical mixture - theoretical replacement).

Utilising mathematical model and the results of researches, were executed accounts and substantiation for reconstruction aerorenk. At realization of process in reconstructed aerorenk the adequacy to mathematical model is proved. The realization of the new decisions received in work, has allowed to increase a degree of clearing by 4-6 %, to reduce air consumption in 1,5 - 2 times, to reduce a share of reverted silt by 30 % and to improve index in secondary settling tanks.

Key words: Process material transfer, volume factor mass feed back, an aerator, aerotenk.