

3. Пат. 810 ВУ, МКИ С 02F 3/10. Устройство для биологической очистки сточных вод / В.Н. Яромский, М.В. М.В. Яковчиц № u20020178; заявл. 17.06.2002; Опубл. 1.11.2002 / Гос. реестр полезн. моделей.
4. Рамм, В.М. Адсорбция газов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
5. Кафаров, В.В. Основы массопередачи. М.: Стройиздат, 1962. – 655 с.
6. Марченко, Ю.Г. Методика экспериментальных исследований массообменных характеристик аэраторов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – № 12 ч. 1. – 20 с.
7. Аэров, М.Э., Меньшиков, В.А., Трайкина, С.С. ЖПХ, 1967. Т. 40, № Н. – С. 852-863.
8. Винтер, А.А., Багачев, Э.С. Теория и практика перемешивания в жидких средах. М.: НИИТЭхим, 1976. – С. 113-115.
9. Ленский, Б.П., Климухин, В.Д. Массообменные свойства биофильтров с различными нагрузками // Химия и технология воды. № 6, 1992. – С. 469-475.
10. Traitment biologique aerobie: l'apport de l'electricite / Gardais D. // Industrie (fr.). – 1991. – №8 – р. 53 – 55. // РЖ “Химия”, 19И. Общие вопросы химической технологии, №6, М. 1992. – 48 с.
11. Саутин, С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. – Л.: Химия, 1975. – 48 с.
12. Городецкий, И.Я., Васин, А.А. [и др.]. Вибрационные массообменные аппараты. – М.: Химия, 1980. – 188 с.

УДК 628.543

В.Н. Яромский (отдел проблем Полесья НАН Беларуси),
М.В. Яковчиц (БГТУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЛЬСАЦИОННОГО БИОРЕАКТОРА

При расчете сооружений биологической очистки необходимо использовать истинное значение кинетических коэффициентов [1].

С целью получения зависимостей, позволяющих осуществить технологический расчет пульсационного биореактора необходимо было определить:

- удельную скорость изъятия органических загрязнений при различных органических нагрузках на аппарат - ρ ;
- максимальную удельную скорость изъятия органических загрязнений в биореакторе - ρ_{\max} ;
- константу полунасыщения - K_L .

Исследования проводились на базе ОАО «Пружанский молочный комбинат» на пилотной установке, изображенной на рисунок 1. Технологическая схема с максимальной производительностью 1,5 м³/сут состояла из пульсационного биореактора (2) с рабочим объемом 0,031 м³, вторичного отстойника (4) общим объемом 0,143 м³ и уплотнителя-регенератора (6) емкостью 0,05 м³.

Сточная жидкость к экспериментальной установке подводилась по напорному трубопроводу (1). Рециркуляционная биомасса из вторичного отстойника (4), пройдя уплотнение в уплотнителе-регенераторе (6), подавалась в пульсационный биореактор при помощи рециркуляционного насоса (7). Воздух в аппарат подавался при помощи компрессора УК-1М (8), расход воздуха определялся при помощи ротаметра РС-5 (9).

После пульсационного биореактора (2) смесь сточной жидкости и биомассы, пройдя через воздухоотделитель (3), подавалась во вторичный вертикальный отстойник (4), где происходила седиментация биомассы, участвующей в процессе биологической очистки.

Осветленная во вторичном отстойнике жидкость при помощи гибкого шланга (5) сбрасывалась в колодец городской канализации.

Насадка биореактора состояла из набора перфорированных дисков, изготовленных из винилпласта, диаметром 200 мм, толщиной 6 мм. Площадь перфорации - 3,84 % площади диска, диаметр перфорированных отверстий - 8 мм. Расстояние между дисками составляло 12 мм, общее число дисков - 15 шт. Возвратно-поступательные колебания насадке сообщались с частотой $n = 1,3$ Гц и амплитудой $s = 67$ мм.

При проведении исследований была выявлена следующая закономерность - удельная скорость изъятия загрязнений ρ при изменении исходной концентрации L_0 меняется и это происходит до тех

пор, пока удельная скорость изъятия загрязнений ρ не станет ρ_{\max} – максимальной.

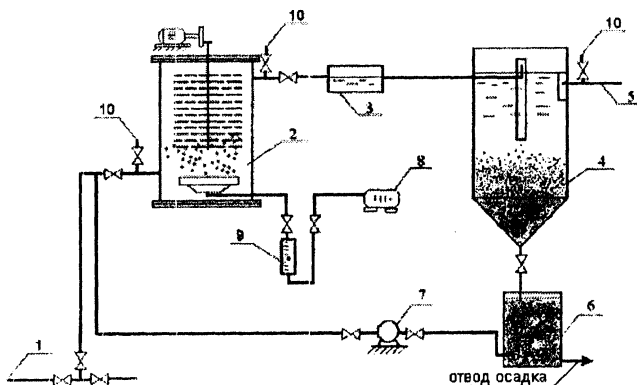


Рисунок 1 – Схема пилотной установки пульсационного биореактора
 1 – напорный трубопровод производственной канализации; 2 – пульсационный биореактор; 3 – воздухоотделитель; 4 – вторичный отстойник; 5 – отвод очищенных стоков; 6 – уплотнитель регенератор рециркуляционной биомассы; 7 – рециркуляционный насос; 8 – компрессор; 9 – ротаметр; 10 – проботборник

При установившемся значении исходной концентрации загрязнений L_0 периодически, через каждые 10 мин, отбирали пробы для проведения анализа ХПК, этот процесс длился до постоянства скорости изъятия органических загрязнений ($\rho = \text{const}$) для данной L_0 . С момента изменения L_0 меняется и ρ , промежуток времени τ , необходимый для установления постоянного значения ρ называется временем адаптации биоценоза.

Условия проведения эксперимента перечислены в таблице 1.

В процессе проведения эксперимента определяли удельную скорость изъятия загрязнений ρ , по формуле

$$\rho = \frac{L_0 - L_e}{\left(a_{\text{эвз}} + \frac{a_{\text{нр}} \cdot F}{V_e \cdot 1000}\right) \cdot (1 - z) \cdot t}, \frac{\text{мг}}{\text{г} \cdot \text{ч}}, \quad (1)$$

где t – время пребывания (аэрации) сточных вод в биореакторе, ч.

Таблица 1 – Условия проведения эксперимента

Наименование показателя	Интервал изменения
Температура, °С	18 – 26
Активная реакция среды pH	6,5 – 8
Исходная концентрация загрязнений по БПК _{полн} L_0 , мг/л	849 – 3500
Гидравлическая нагрузка, суг^{-1}	41,16
Время аэрации, ч	0,583
Доза взвешенной биомассы $a_{\text{взв}}$, г/л по сухому веществу	4,2 – 4,8
Концентрация прикрепленной биомассы $a_{\text{пр}}$, г/м ² по сухому веществу	14,0 – 16,0

После чего построили график вида $\rho = f(L_e)$, построенная по данным эксперимента зависимость показала асимптотическую стабилизацию ρ при возрастании L_e (рост концентрации L_e обусловлен увеличением исходной концентрации загрязнений L_0), это дает возможность аппроксимировать результаты эксперимента зависимостью вида (2), (3):

$$\text{- модель Моно: } \rho(L_e) = \frac{\rho_{\max} \cdot L_e}{K_L + L_e}, \quad (2)$$

$$\text{- модель Вавилина: } \rho(L_e) = \frac{\rho_{\max} \cdot L_e^2}{K_L^2 + L_e^2}. \quad (3)$$

Определение параметров ρ_{\max} и K_L выполнили по методу наименьших квадратов [2, 3].

Рассмотрим функции невязок, и исследуем их на минимум:

$$- \text{ для модели (2): } f(K_L, \rho_{\max}) = \sum_{i=1}^n \left(\rho_i - \frac{\rho_{\max} \cdot L_i}{K_L + L_i} \right)^2; \quad (4)$$

$$- \text{ для модели (3): } f(K_L, \rho_{\max}) = \sum_{i=1}^n \left(\rho_i - \frac{\rho_{\max} \cdot L_i^2}{K_L^2 + L_i^2} \right)^2, \quad (5)$$

где ρ_i, L_i – значения i -ого эксперимента;

n – количество опытов.

Условия минимума целевой функции:

$$\begin{aligned} \frac{df}{d\rho_{\max}} &= 0; \\ \frac{df}{dK_L} &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Результаты дифференцирования:

$$\begin{aligned} - \text{ для модели (2)} \quad \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i}{K_L + L_i} - \rho_{\max} \sum_{i=1}^n \frac{L_i^2}{(K_L + L_i)^2} &= 0; \\ \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i}{(K_L + L_i)^2} - \rho_{\max} \sum_{i=1}^n \frac{L_i^2}{(K_L + L_i)^3} &= 0; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} - \text{ для модели (3)} \quad \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i^2}{K_L^2 + L_i^2} - \rho_{\max} \sum_{i=1}^n \frac{L_i^4}{(K_L^2 + L_i^2)^2} &= 0; \\ \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i^2}{(K_L^2 + L_i^2)^2} - \rho_{\max} \sum_{i=1}^n \frac{L_i^4}{(K_L^2 + L_i^2)^3} &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Системы (7), (8) нелинейные относительно параметра K_L , в то время, каждое из уравнений системы можно разрешить относительно ρ_{\max} :

$$- \text{ для модели (2) } \rho_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i}{K_L + L_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i^2}{(K_L + L_i)^2}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i}{(K_L + L_i)^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i^2}{(K_L + L_i)^3}}; \quad (9)$$

$$- \text{ для модели (3) } \rho_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i^2}{K_L^2 + L_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i^4}{(K_L^2 + L_i^2)^2}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i^2}{(K_L^2 + L_i^2)^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i^4}{(K_L^2 + L_i^2)^3}}. \quad (10)$$

Так как знаменатели соотношений (9), (10) не обращаются в нуль, то для определения K_L можно составить функцию $F(K_L)$ и найти ее нули: для (9):

$$F(K_L) = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i}{K_L + L_i} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_i^2}{(K_L + L_i)^3} - \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i}{(K_L + L_i)^2} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_i^2}{(K_L + L_i)^2}; \quad (11)$$

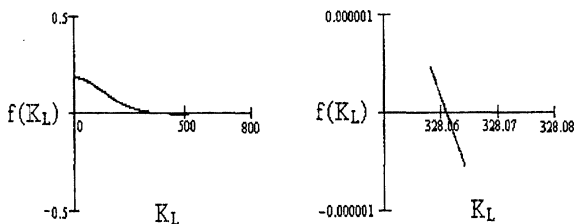
для (10)

$$F(K_L) = \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i^2}{K_L^2 + L_i^2} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_i^4}{(K_L^2 + L_i^2)^3} - \sum_{i=1}^n \frac{\rho_i L_i^2}{(K_L^2 + L_i^2)^2} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_i^4}{(K_L^2 + L_i^2)^2}; \quad (12)$$

Итак, задача определения K_L свелась к решению уравнений $F(K_L)=0$. Вследствие нелинейности уравнений решение вышеупомянутой задачи можно получить только подбором. Подбор был реализован математическим пакетом MATCAD.

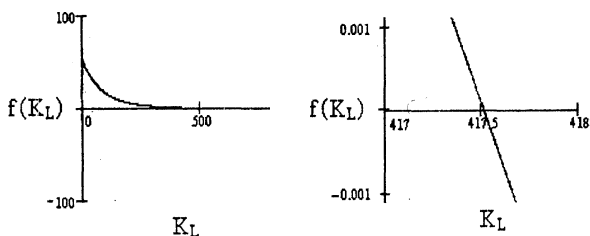
На рисунках 2 и 3 изображены значения K_L , полученные в результате подбора для уравнений (11), (12) соответственно

Для K_L , полученной по функции (11) находим ρ_{\max} по формуле (9), аналогично для K_L , полученной по функции (12) находим ρ_{\max} по формуле (10).



$$K_L = 328,061$$

Рисунок 2 – Значение константы полунасыщения для (11)



$$K_L = 417,51$$

Рисунок 3 – Значение константы полунасыщения для (12)

Исходные данные и построенные теоретически зависимости представлены на графиках (рисунки 4, 5).

Оценку точности результатов аппроксимации выполнили по среднеквадратичному отклонению:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left(\rho_i - \frac{\rho_{\max} L_i}{K_L + L_i} \right)^2}{n}} . \quad (13)$$

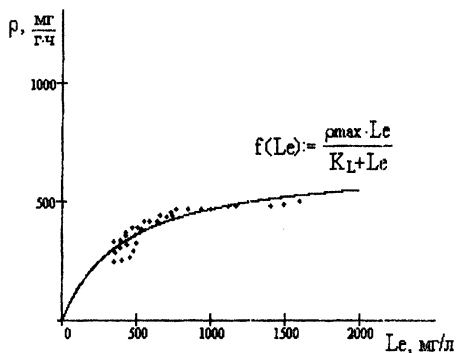


Рисунок 4 – Зависимость удельной скорости от концентрации загрязнений по математической модели Моно (2)

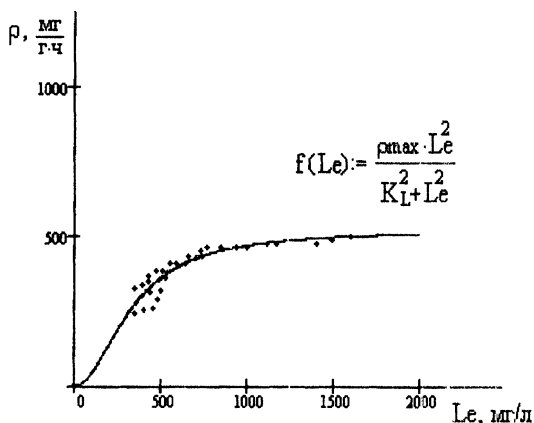


Рисунок 5 – Зависимость удельной скорости от концентрации загрязнений по обобщенной модели Вавилина (3)

Результаты расчетов сведены в таблице 2.

По оценкам среднеквадратичного отклонения можно сделать вывод о том, что обобщенная модель Вавилина вида (3) лучше аппроксимирует экспериментальные точки, чем классическая модель Моно (2). Таким образом, для расчета удельной скорости окисления

органических загрязнений ρ , при проектировании пульсационного биореактора, окончательно будет использоваться модель вида (3).

Таблица 2 – Кинетические константы, полученные в результате расчета

Тип установки, источник загрязнений	$\rho(L_e) = \frac{\rho_{\max} \cdot L_e}{K_L + L_e}$ (2)			$\rho(L_e) = \frac{\rho_{\max} \cdot L_e^2}{K_L^2 + L_e^2}$ (3)		
	$\rho_{\max}, \frac{мг}{г \cdot ч}$	$K_L, мг/л$	σ	$\rho_{\max}, \frac{мг}{г \cdot ч}$	$K_L, мг/л$	σ
Пульсационный биореактор, ПСВ Пружанского молочного комбината	695,391	417,510	32,511	521,801	328,061	28,572

Поскольку биохимический состав производственных сточных вод предприятий молокоперерабатывающей отрасли идентичен [4, 5], кинетические константы, полученные в процессе эксперимента для сточных вод Пружанского молочного комбината

($\rho_{\max} = 521,801 \frac{мг}{г \cdot ч}$; $K_L = 328,061$ мг/л) вполне применимы и для других предприятий данного профиля.

Таким образом, в результате проведения эксперимента были получены значения кинетических коэффициентов, характерных для процесса биологической очистки в пульсационном биореакторе, которые и будут приниматься за основу при технологическом расчете. В результате аппроксимации экспериментальных данных установлено, что процесс биологической очистки в пульсационном биореакторе наилучшим образом описывает обобщенная модель Вавилина вида (3), которая и будет взята за основу при проектировании биореактора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев, С.В., Карюхина, Т.А. Биохимические процессы в очистке сточных вод. М.: Стройиздат, 1980. – 200 с.
2. Валах, В.П. Очистка сточных вод маломощных молокоперерабатывающих предприятий на дисковых биофильтрах: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.04. – Полтава, 1987. – 137 с.
3. Корн, Г., Корн, Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: 1978. – 832 с.
4. Очистка сточных вод предприятий мясной и молочной промышленности. С.М. Шифрин, Г.В. Иванов [и др.]. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 272 с.
5. Шифрин, С.М., Мишуков, Б.Г. Очистка сточных вод предприятий молочной промышленности. - М.: Пищевая промышленность, 1968. – 117 с.

УДК 628.3

В.Н. Яромский (отдел проблем Полесья НАН Беларуси)

КОМБИНИРОВАННЫЕ СООРУЖЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Биологическая очистка сточных вод имеет вековой опыт практического использования и продолжает развиваться, а её резервы еще далеко не исчерпаны. В связи с возрастающим количеством сточных вод, которые необходимо очищать, на смену естественным методам очистки (поля фильтрации, поля орошения, биопруды) пришли азротенки и биофильтры. Однако, и эти главные сооружения искусственной биологической очистки сточных вод имеют существенные недостатки. Азротенкам присуща большая энергоёмкость, а биофильтрам небольшая пропускная способность.

Поиск оптимальных технологических решений в области очистки сточных вод способствовал созданию комбинированных сооружений, которые имеют признаки азротенков и биофильтров. Процесс биологической очистки в комбинированном сооружении зави-