

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АЭРОТЕНКОВ

Олейник А.Я.¹, Айрапетян Т.С.²

¹ Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

² Харьковский национальный университет городского хозяйства
им. А.Н. Бекетова

С помощью математического моделирования обоснована эффективность применения устройств с прикрепленным биоценозом для повышения качества очистки сточных вод в аэротенках.

Ключевые слова: математическое моделирование, биологическая очистка, прикрепленный биоценоз, аэротенк.

За допомогою математичного моделювання обґрунтовано ефективність застосування пристроїв з прикріпленням біоценозом для підвищення якості очищення стічних вод в аеротенках.

Ключеві слова: математичне моделювання, біологічне очищення, прикріплений біоценоз, аеротенк.

Due to the mathematical modeling the efficiency of applying the devices with attached biocenose to enhance the quality of wastewater treatment in the aeration tank is substantiated.

Keywords: the nmathematical modeling, biological treatment, attached biocenose, aeration tank

В практике очистки городских, бытовых и подобных по составу сточных вод наибольшее распространение получили биологические методы очистки. Классической технологической схемой такой очистки являются системы сооружений, основной составляющей которой есть биореактор-аэротенк.

Как известно, в аэротенке происходит удаление (биоокисление) сорбированных на хлопьях активного ила загрязнений, которые в основном состоят из микроорганизмов, взвешенных или растворенных в воде органических веществ. В зависимости от гидродинамического режима движения жидкости в биореакторе аэротенки подразделяются

на аэротенки-смесители и аэротенки-вытеснители [1, 2]. На практике большое распространение получили аэротенки-смесители, в которых поступающие сточные воды и активный ил мгновенно перемешиваются между собой и поэтому концентрация микроорганизмов и загрязнений, а также растворенного кислорода принимаются одинаковыми по всему объему реактора. Особенности удаления органических и других загрязнений (ОЗ) в системах биологической очистки в аэротенках-смесителях описаны в многочисленной литературе, в частности [2, 3].

Проведенный анализ показал, что эффективность удаления загрязнений в аэротенках можно значительно повысить, если наряду со взвешенным биоценозом (активным илом) обеспечить устройство в объеме аэротенка дополнительной загрузки (сеток, насадок и т. п.), на поверхности которой образуется биопленка с высокой концентрацией микроорганизмов. Известно, что такая комбинированная биологическая очистка сточных вод в сооружениях с закрепленной биомассой (биопленкой) по мнению многих специалистов имеет ряд существенных технологических преимуществ и широко используется на практике [2, 4, 5].

Для оценки и анализа совместного удаления органических загрязнений (ОЗ) взвешенным и прикрепленным биоценозом в аэротенках любой конструкции была создана общая математическая модель в виде уравнений материального баланса, которые описывают изменение концентраций ОЗ в объеме аэротенка. При этом считается, что в процесс биохимического окисления в достаточном количестве обеспечен кислородом, т.е. поступление кислорода не будет лимитировать кинетику окисления, как взвешенного, так и закрепленного биоценоза.

На основании анализа общей модели для дальнейшей реализации приведем его к известному уравнению материального баланса ОЗ в аэротенке-смесителе в виде [6,7]

$$W_p \frac{\partial L_a}{\partial t} = Q_a(L_0 - L_a) - F_{\delta_1} N - R_0 W_p, \quad (1)$$

$$W_p = \varepsilon W_a, \quad F_{\delta_1} = F_{\delta} l$$

R_0 - общая скорость утилизации ОЗ взвешенным биоценозом;

F_{δ_1} - общая площадь поверхности биопленки (загрузки) в аэротенке;

W_p - объем жидкости в аэротенке;

F_{δ} - площадь поверхности биопленки на единицу длины аэротенка l ;

W_a - общий объем аэротенка; Q_a - расход жидкости в аэротенке;

L_0, L_a – соответственно концентрации ОЗ на входе и в аэротенке;
 N – поток (транспорт) ОЗ через поверхность биопленки для их утилизации закрепленным биоценозом (биопленкой).

В практических расчетах достаточно рассмотреть уравнение (1) в стационарных условиях и привести его к виду [8-10]

$$L_0 - L_a - R_s = 0 \quad (2)$$

$$R_s = \lambda_a N - (R_a - R_c) T_a \quad (3)$$

$$R_0 = R_a - R_c$$

R_a, R_c соответственно скорости реакций утилизации ОЗ взвешенным биоценозом (активным илом) и образованных веществ при отмирании ила.

$$\varepsilon = 1 - \frac{W_\delta}{W_a} = \frac{W_p}{W_a}, \quad \lambda_a = \frac{F_{\delta l}}{Q_a}, \quad T_a = \frac{W_p}{Q_a}$$

В дальнейшем будем использовать уравнения (2), (3) для разработки инженерных расчетов.

В зависимости от расположения систем загрузки в объеме (площади) аэротенка возможны варианты, когда элементы загрузки (насадки, сетки и т.п.) равномерно расположены по всему объему (длине) аэротенка или только на отдельных участках аэротенка. В последнем случае аэротенк будет состоять из двух частей или реакторов, при этом реактор с закрепленным биоценозом может быть расположен в первой или во второй части аэротенка. В зависимости от его расположения в целом, существенно меняется технология очистки в аэротенке. Заметим, что в обеих частях аэротенка реакторы работают по схеме аэротенка-смесителя.

В данной статье рассмотрим технологическую схему аэротенка-смесителя, в которой элементы загрузки (насадки, сетки и т.п.) расположены по всему объему аэротенка (рис. 1). В этом случае площадь $F_{\delta l}$ будет общей площадью поверхности загрузки в аэротенке; $F_{\delta n} = \frac{F_{\delta l}}{W_a}$ - удельной площадью загрузки. В этом случае

согласно уравнения (2) извлечение загрязнений происходит в биопленке закрепленным биоценозом и в объеме жидкости аэротенка взвешенным биоценозом. Для определения загрязнений закрепленным биоценозом необходимо определить поток загрязнений, которые поступают в биопленку N .

$$N = -D_L \frac{\partial L}{\partial z} = K_L (L_a - L|_{z=0}) \quad (4)$$

$$L|_{z=0} = L_\delta$$

где L, L_δ, L_a - соответственно концентрации ОЗ в биопленке, на поверхности биопленки и в аэротенке;
 D_L - коэффициент молекулярной диффузии в биопленке;
 K_L - коэффициент массопереноса ОЗ в жидкостной пленке.

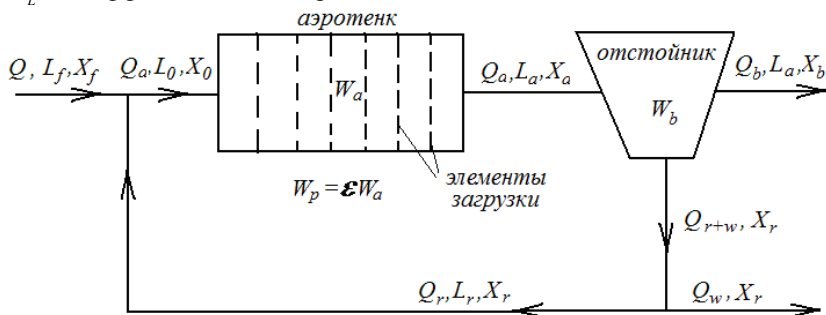


Рис. 1 Балансовая схема аэротенка-смесителя с расположенным полностью закрепленным биоценозом

В зависимости от вида скорости кинетических реакций, которые принимаются в биопленке с закрепленным биоценозом и взвешенным биоценозом (активным илом) в объеме аэротенка, рассмотрим такие варианты (технологические схемы) изъятия ОЗ в целом.

При этом отметим, что кинетика реакций R первого и нулевого порядков со взвешенным и закрепленным биоценозом отвечают различным исходным концентрациям ОЗ. Согласно [11] в практических расчетах это отвечает соотношениям $\beta_L = K_m / L_0 > 2$ и $\beta_L < 0,25$. В пределах $0,25 < \beta_L < 2,0$ при расчете кинетики реакций R необходимо использовать известное нелинейное уравнение Моно, примеры использования которого приведены ниже.

В качестве примера рассмотрим случай, когда скорость реакции в биопленке принимается первого порядка, а именно

$$R_L = kL, \quad k = \frac{\mu_m X}{YK_{mL}} = \frac{\rho_m}{K_{mL}}, \quad (5)$$

а в аэротенке – скорость реакции нулевого порядка, а именно

$$R_a = w_a, \quad w_a = \rho_{ma} = \frac{\mu_{ma} X_a}{Y_a}. \quad (6)$$

Здесь μ_m, μ_{ma} – удельные максимальные скорости роста микроорганизмов в биопленке и в объеме аэротенка,
 X, X_a – соответственно концентрации закрепленной по ОЗ и взвешенной биомассы микроорганизмов;

K_{mL} – коэффициент насыщения (полунасыщения);

$Y = \frac{dX}{dL}$ – стехиометрический коэффициент прироста биомассы в биопленке.

Такую технологическую схему очистки можно использовать в частности при доочистке сточных вод закрепленным биоценозом, после основной очистки активным илом в аэротенке. Значение потока ОЗ через поверхность биопленки N находится в результате решения уравнения, которое характеризует изъятие ОЗ образованной на поверхности материала загрузки биопленкой, насыщенной микроорганизмами концентрацией X .

$$D_L \frac{\partial^2 L}{\partial z^2} - R_L = 0 \quad (7)$$

при граничных условиях: N при $z=0$ и $\frac{\partial L}{\partial z} = 0$ при $z=\delta$. Такое решение получено в работе [8], которое позволяет определить изменение концентрации по толщине биопленки $L(z)$ и, главное, необходимую для дальнейших расчетов концентрацию L_δ на поверхности биопленки

$$L_\delta = L_a - AL_a, \quad (8)$$

где

$$A = \frac{1 + e^{-\varphi}}{(1 + e^{-\varphi}) + \eta(1 + e^{-\varphi})}, \quad \varphi = 2\sqrt{\alpha}, \quad \alpha = \frac{k\delta^2}{D_L}, \quad \eta = \frac{\sqrt{kD_L}}{K_L}. \quad (9)$$

По формуле (9) в работе [8] построен расчетный график

$A = \frac{L_\delta}{L_a} = f(\varphi, \eta)$. Согласно (4) поток ОЗ в биопленку будет

$$N = K_L L_a (1 - A) \quad (10)$$

$$\text{или } N = -D_L \left. \frac{\partial L}{\partial z} \right|_{z=0} = D_L \frac{th\sqrt{\alpha}}{a_0} L_\delta = k_1 L_\delta, \quad k_1 = \frac{th\sqrt{\alpha}}{\alpha_0}, \quad \alpha_0 = \sqrt{\frac{D}{k}}. \quad (11)$$

Используя уравнение (2), которое в данном случае будет иметь вид

$$L_0 - L_a - \lambda L_a (1 - A) - T_a w_a = 0, \quad \lambda = \frac{F_{sl}}{Q_a} K_L, \quad (12)$$

получим зависимость для определения концентрации в аэротенке L_a в условиях извлечения ОЗ закрепленным и взвешенным биоценозом

$$L_a = \frac{L_0 - T_a W_a}{1 + \frac{F_{sl}}{Q_a} K_L (1 - A)}. \quad (13)$$

Как правило, аэротенки работают в режиме рециркуляции. В этом случае при коэффициенте рециркуляции r значение исходных параметров, которые входят в уравнение и зависимости, необходимо принимать такими [6, 9]

$$Q_0 = Q(1+r), \quad L_0 = \frac{L_f}{1+r} + \frac{rL_a}{1+r} \approx \frac{L_f}{1+r},$$

$$T = \frac{T_a}{1+r}, \quad T = \frac{W_p}{Q}, \quad T_a = \frac{W_p}{Q_a} = \frac{W_p}{Q(1+r)}, \quad X_0 = \frac{rX_r}{1+r}, \quad X_f = 0,$$

которые получены из общих уравнений материального баланса

$$QL_f + rQL_r - (1+r)QL_a - W_p R_3 = W_p \frac{dL_a}{dt}. \quad (14)$$

$$QX_f + rQX_2 + W_p (R_x - b_a X_a) = (1+r)X_a + W_p \frac{dX_a}{dt}.$$

Здесь Q – расход, который поступает в сооружения очистки, L_f, X_f – концентрации ОЗ и активного ила на входе в сооружения очистки ($X_f \approx 0$), X_r – концентрация активного ила, которая поступает в аэротенк от отстойника, X_0 – концентрация микроорганизмов на входе в аэротенк, b_a – константа скорости отмирания.

С учетом режима рециркуляции, а также процесса отмирания значение концентрации X_a в аэротенке в формуле (13) принимается таким образом

$$X_a = \frac{X_0}{1 - T_a (\mu_{ma} - b_a)}. \quad (15)$$

Решение данной технологической схемы (рис. 1) выполнено также для случая когда скорость реакций в биопленке и в аэротенке принимаются первого порядка, а именно по формуле (5) в биопленке и в аэротенке по следующей формуле

$$R_a = k_a L_a, \quad k_a = \frac{\mu_{ma} X_a}{Y K_{ma}}, \quad (16)$$

Рассмотрен и реализован также общий случай, когда скорость реакций R в биопленке и в аэротенке происходят в соответствии с известным нелинейным уравнением Моно, а именно в биопленке

$$R_L = \frac{\rho_m L}{K_m + L}, \quad \rho_m = \frac{\mu_m X}{Y} \quad (17)$$

в аэротенке

$$R_{La} = \frac{\rho_{ma} L_a}{K_{ma} + L_a}, \quad \rho_{ma} = \frac{\mu_{ma} X_a}{Y_a} \quad (18)$$

В уравнениях (17) и (18) не учитывается возможное ингибирующее влияние других веществ.

Перепишем уравнение (13) в виде

$$\frac{L_a}{L_0} = \frac{1 - \tau}{1 + \gamma}, \quad (19)$$

где $\tau = \frac{T_a w_a}{L_0}$, $\gamma = \frac{F_{\delta l}}{Q_a} K_L (1 - A)$.

На основе зависимости (19) построен расчетный график $\frac{L_a}{L_0} = f(\tau, \gamma)$ (рис. 1). На рис. 2 показан график $\frac{L_a}{L_0} = f(\tau, \gamma)$ при $\gamma = 0$, т.е., когда очистка сточных вод осуществляется только с помощью взвешенного биоценоза.

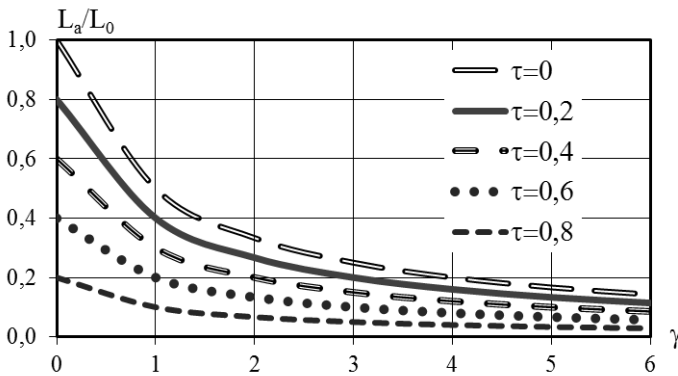


Рис. 2 График зависимости $\frac{L_a}{L_0} = f(\tau, \gamma)$

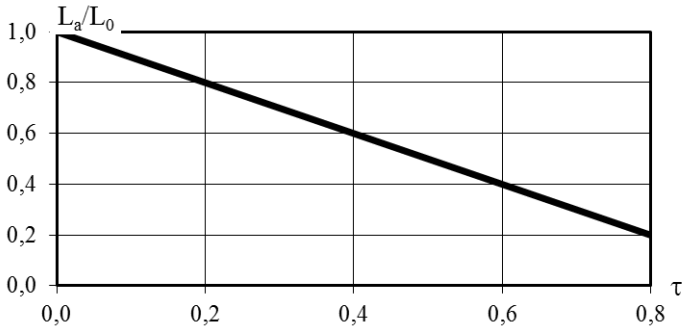


Рис. 3 График зависимости $\frac{L_a}{L_0} = f(\tau, \gamma)$ при $\gamma = 0$

Данные, представленные на рис. 2, 3, показывают, что нагрузка с прикрепленным биоценозом оказывает значительное влияние на процесс биологической очистки в аэротенке.

Таким образом, представленные зависимости и выполненные расчеты позволяют обосновать повышение эффективности работы аэротенков с помощью равномерного размещения в его объеме элементов загрузки с прикрепленным биоценозом.

1. Яковлев С.В., Воронов Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод. - М. АСВ, 2002 - 704 с.

2. Henze M.M., Van Loosdrecht M.C., Ekama V.A., Bzdjanovic D. Biological Wasterwater Treatment // Iwe Publishing, London, 2008. - 511 p.

3. Евилевич М. А., Наумов А.В, Блохин В.Е., Швитев А.В. Математическое исследование процесса биологической очистки на хлопьях активного ила // Водные ресурсы. – 1978. – №1. – с. 143-151.

4. Wanner O., Ebert N.L., Rittan B.E. Mathematical modeling of biofilms // Scientific and Technical report. - 2006 - N18 - 208 p.

5. Олейник А.Я. Василенко Т.В., Рибаченко С.А., Хамад Ихаб Ахтад Моделирование процессов доочистки хозяйственно-бытовых сточных вод на фильтрах // Проблемы водопостачання, водовідведення та гідраліки. Наук.-техн. зб.- К.: КНУБА, 2006. - Вип. 7. - С.85-97.

6. Вавилин В.А., Васильев В.В математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод. – М.: Наука, 1979. – 116 с.

7. Henze M., Harremoes P., Jansen C., Arwin E. Wasterwater Treatment.-Springer-Berlin, New York, 2002.-430p.

8. Олійник О.Я., Колпакова О. А. Моделювання і розрахунки біологічної очистки стічних вод на краплинних біофільтрах //

Екологічна безпека та природокористування. Зб. наук. праць. – К.: КНУБА, 2014. – Вип. 16. – С. 68-86.

9. Олійник О.Я., Зябліков С.М. Особливості очистки стічних вод у системі аеротенк-відстійник-регенератор // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. Наук.-техн. зб. - К.: КНУБА, 2005. - Вип. 4. - С.46-53.

10. Олійник О.Я., Айрапетян Т.С. Моделювання очистки стічних вод від органічних забруднень в біореакторах – аеротенках зі зваженим (вільноплаваючим) і закріпленим біоценозом // Доповіді НАНУ. – 2015. – №5.

11. Рибаченко С.О. Аеробна доочистка стічних вод на затоплених фільтрах. – Дис. канд. техн. наук 05.23.04: КНУБА, 2011. – 143 с.