

Т.С. АЙРАПЕТЯН, кандидат технических наук  
Харьковский национальный университет городского хозяйства имени  
А.Н. Бекетова

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АЭРОТЕНКОВ-ВЫТЕСНИТЕЛЕЙ С ПРИКРЕПЛЕННЫМ БИОЦЕНОЗОМ И УЧЕТОМ КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМА

*Розроблено дворівневу математичну модель біологічного очищення в аеротенках-витискувачах з закріпленням біоценозом. В моделі враховується ступінь забезпечення процесу киснем. Швидкість окиснення органічних забруднень і споживання кисню зваженим і закріпленням біоценозом описується рівнянням Моно. Представлені результати теоретичних досліджень, в яких вивчено вплив кисневого режиму, а також розташування і розподілу елементів з закріпленням біоценозом на ефективність очищення.*

**Ключові слова:** стічні води, аеротенки-витискувачі, активний мул, закріплений біоценоз, органічні забруднення, математична модель, кисневий режим.

*Разработана двухуровневая математическая модель биологической очистки в аэротенках-вытеснителях с прикрепленным биоценозом. В модели учитывается степень обеспечения процесса кислородом. Скорость окисления органических загрязнений и потребления кислорода взвешенным и прикрепленным биоценозом описывается уравнением Моно. Представлены результаты теоретических исследований, в которых изучено влияние кислородного режима, а также расположения и распределения элементов с прикрепленным биоценозом на эффективность очистки.*

**Ключевые слова:** сточные воды, аэротенки-вытеснители, активный ил, прикрепленный биоценоз, органические загрязнения, математическая модель, кислородный режим.

*A two-level mathematical model of biological purification in aerotank-displacers with fixed biocenosis was developed. The model takes into account the degree of oxygen supply on the process. The rate of oxidation of organic pollution and oxygen consumption by a suspended and fixed biocenosis is described by the Mono equation. The results of theoretical studies of the influence of the oxygen regime, and also the location and distribution of elements with an fixed biocenosis on the purification efficiency are presented.*

**Keywords:** wastewater, aerotank-displacer, active sludge, fixed biocenosis, organic pollution, mathematical model, oxygen regime

Биологическая очистка бытовых сточных вод является важной составляющей в технологии их обработки. Наиболее распространенными сооружениями, в которых для удаления растворенных органических примесей применяется биохимическое окисление, являются аэротенки. Для очистки бытовых сточных вод, относительно малоконцентрированных в сравнении с производственными, в основном применяют аэротенки-вытеснители. Возрастающие требования к качеству очистки сточных вод перед их сбросом в водоем требуют усовершенствования данных сооружений.

Среди многочисленных решений по повышению эффективности работы аэротенков можно выделить следующие: создание участков с аэробными и анаэробными условиями окисления [1, 2; 2, 3], применение неравномерно рассредоточенного впуска сточных вод [3, 2; 4, 333], подача технического кислорода [4, 346], добавление реагентных препаратов [5, 2] и др.

Также интенсифицировать биологической очистку в аэротенках можно за счет применения дополнительной загрузки с прикрепленным биоценозом. Преимущества иммобилизованных микроорганизмов заключаются в возможности создания высокой их концентрации и лучшей извлекающей способности при невысоком содержании органических загрязнений (ОЗ). Такая комбинированная очистка имеет ряд технологических преимуществ и широко используется на практике [6, 198; 7, 55].

Обеспечение процесса деструкции субстрата кислородом является фактором, который оказывает значительное влияние на эффективность очистки [8, 4]. Особенно это важно для биопленки, когда кислород в результате его поглощения не проникает в нижние слои, поэтому процесс удаления ОЗ происходит не по всей ее толщине.

Математическое моделирование позволяет обосновать рациональные параметры аэротенков с прикрепленным биоценозом [9, 188; 10, 39]. Для получения более объективных и универсальных данных, кроме влияния содержания кислорода, необходимо также учитывать нелинейность зависимости скорости утилизации ОЗ и потребления кислорода от соответствующих концентраций.

Целью исследований является обоснование с помощью математического моделирования и учетом кислородного режима эффективности применения загрузки с прикрепленным биоценозом в аэротенках-вытеснителях.

При разработке математической модели, описывающей процесс биологической очистки в аэротенке-вытеснителе, содержащим элементы с прикрепленным биоценозом, приняты следующие допущения:

- процесс утилизации субстрата взвешенным и прикрепленным биоценозом, а также процесс потребления кислорода в биопленке, являются установившимися;

- процесс биохимического окисления взвешенным биоценозом в достаточном количестве обеспечен кислородом, его концентрация в

свободном объеме аэротенка имеет постоянное значение, поступление кислорода лимитирует кинетику биоокисления только прикрепленным биоценозом;

- диффузионным переносом субстрата в свободном объеме аэротенка можно пренебречь;

- толщина биопленки на дополнительных элементах является постоянной величиной;

- при изменении места расположения и распределения элементов (насадок) с прикрепленным биоценозом по длине аэротенка их количество и площадь остается одинаковой, меняется только удельная площадь, т.е. плотность распределения.

С учетом принятых допущений основу математической модели работы аэротенка-вытеснителя с взвешенным и прикрепленным биоценозом и учетом кислородного режима в биопленке составляют следующие уравнения и зависимости.

1. Уравнение переноса органических загрязнений по длине аэротенка:

$$V \frac{dL_a}{dx} + R_\delta + \varepsilon R_a = 0, \quad (1)$$

где  $x$  – горизонтальная координата, м, которая изменяется в пределах от 0 до  $S$  (длина аэротенка);  $t$  – время, с;  $L_a$  – концентрация ОЗ в аэротенке, мг/л;  $V = Q_a/F$  – средняя скорость потока в аэротенке, м/с;  $F$  – площадь поперечного сечения аэротенка, м<sup>2</sup>;  $Q_a$  – расход очищаемой воды, м<sup>3</sup>/с;  $R_\delta = \lambda_\delta N_L$  – скорость утилизации ОЗ прикрепленным биоценозом в объеме аэротенка, мг/(л·с);  $R_a$  – скорость утилизации ОЗ взвешенным биоценозом (активным илом), мг/(л·с);  $N_L$  – поток (транспорт) ОЗ через поверхность биопленки для их утилизации прикрепленным биоценозом (биопленкой),  $\frac{\text{м мг}}{\text{с л}}$ ;  $\lambda_\delta = F_{\delta l}/F$  – конструктивный параметр, м<sup>-1</sup>;  $F_{\delta l}$  – удельная

площадь поверхности биопленки (на единицу длины аэротенка), м;

$\varepsilon = 1 - \frac{W_\delta}{W_a} = \frac{W_j}{W_a}$  – коэффициент, учитывающий уменьшение свободного

объема аэротенка, вызванное размещением дополнительной загрузки (насадок) с прикрепленным биоценозом;  $W_a$  – рабочий объем аэротенка, м<sup>3</sup>;  $W_j$  – объем жидкости в аэротенке, м<sup>3</sup>;  $W_\delta$  – объем загрузки (насадок) с прикрепленным биоценозом, м<sup>3</sup>.

Уравнение (1) решается при следующем граничном условии:  $x = 0 \quad L_a = L_{a0}$ , где  $L_{a0}$  – концентрация ОЗ в исходной воде, мг/л.

2. Уравнение переноса органических загрязнений по толщине биопленки (необходимо для вычисления параметра  $N_L$ ):

$$D_L \frac{d^2 L}{dy^2} - R_L = 0, \quad (2)$$

где  $y$  – координата, м, которая изменяется в пределах от 0 до  $\delta$  (толщина биопленки);  $L$  – концентрация ОЗ в биопленке, мг/л;  $D_L$  – коэффициент

молекулярной диффузии в биопленке, м<sup>2</sup>/с;  $R_L$  – скорость утилизации ОЗ прикрепленным биоценозом в биопленке, мг/(л·с).

Уравнение (2) решается при следующих граничных условиях:

$$y = \delta \frac{dL}{dy} = 0; \quad y = 0 \quad N_L = -D_L \frac{dL}{dy} = K_L(L_a - L|_{y=0}), \quad L|_{y=0} = L_\delta, \quad (3)$$

где  $K_L$  – коэффициент массопереноса ОЗ в жидкостной пленке, м/с;  $L_\delta$  – концентрация ОЗ на поверхности биопленки, мг/л.

3. Уравнения кинетики (зависимости для определения скорости утилизации ОЗ взвешенным и прикрепленным биоценозом  $R_a$  и  $R_L$ , а также скорости потребления кислорода в биопленке  $R_C$ )

$$R_a = -\frac{\mu_a X_a}{Y_a} \frac{L_a}{K_{mL_a} + L_a}, \quad (4)$$

$$R_L = -\frac{\mu_L X_L}{Y_L} \frac{L}{K_{mL} + L} \frac{C}{K_{mC} + C}, \quad (5)$$

$$R_C = \alpha_1 R_L + \alpha_2 b_L \frac{C}{K_{mC} + C} X_L, \quad (6)$$

где  $\mu_a, \mu_L$  – максимальная удельная скорость роста биомассы микроорганизмов, с<sup>-1</sup>;  $K_{mL_a}, K_{mL}, K_{mC}$  – константы полунасыщения, мг/л;  $X_a, X_L$  – концентрации микроорганизмов, мг/л;  $Y_a, Y_L$  – коэффициенты трансформации субстрата в биомассу;  $R_C$  – скорость потребления кислорода в биопленке, мг/(л·с);  $C$  – концентрация кислорода в биопленке, мг/л;  $\alpha_1, \alpha_2$  – стехиометрические коэффициенты расхода кислорода при окислении единицы ОЗ и для самоокисления продуктов отмирания микроорганизмов в биопленке;  $b_L$  – константа отмирания микроорганизмов в биопленке, с<sup>-1</sup>.

4. Уравнение переноса кислорода по толщине биопленки:

$$D_C \frac{d^2 C}{dy^2} - R_C = 0, \quad (7)$$

где  $D_C$  – коэффициент молекулярной диффузии кислорода в биопленке, м<sup>2</sup>/с.

5. Уравнение (7) решается при следующих граничных условиях:

$$y = \delta \frac{dC}{dy} = 0; \quad y = 0 \quad N_C = -D_C \frac{dC}{dy} = K_L(C_a - C|_{y=0}), \quad C|_{y=0} = C_\delta, \quad (8)$$

где  $K_C$  – коэффициент массопереноса ОЗ в жидкостной пленке, м/с;  $C_\delta$  – концентрация кислорода на поверхности биопленки, мг/л.

6. Зависимость для расчета коэффициента  $\varepsilon$  при расположении насадок не по всей длине сооружения, а только в его части, с учетом сохранения их объема и, соответственно, увеличения плотности распределения:

$$\varepsilon = 1 - (1 - \varepsilon_0) \frac{S}{S_L}, \quad (9)$$

где  $\varepsilon_0$  – коэффициент уменьшения свободного объема аэротенка при равномерном распределении насадок по всей длине сооружения;  $S_L$  – длина участка аэротенка, на котором расположены насадки, м.

Система уравнений и зависимостей (1)-(9), которая составляет основу математической модели, решается численно методом конечных разностей. С помощью математической модели были проведены численные исследования процесса биологической очистки в аэротенке-вытеснителе, содержащим элементы с прикрепленным биоценозом, с учетом кислородного режима в биопленке.

Рассмотрен вариант, когда насадки располагаются или по всей длине аэротенка, или во второй его части по течению жидкости (рис. 1).

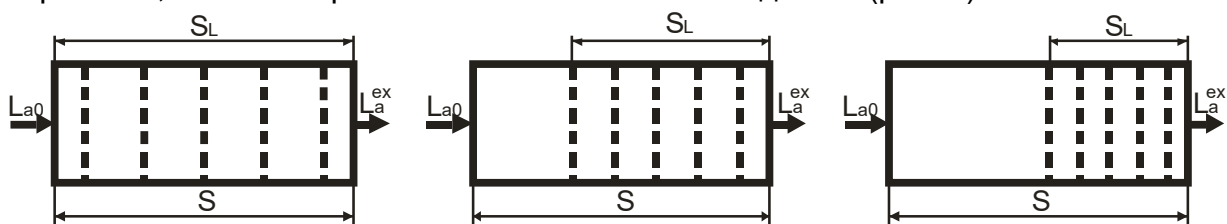


Рис. 1. Схема расположения насадок с прикрепленным биоценозом в аэротенке-вытеснителе

В качестве критерия эффективности принят параметр, позволяющий оценить вклад прикрепленного биоценоза в биологическую очистку от органических загрязнений

$$\Theta = 1 - \frac{(L_a^{ex})_L}{(L_a^{ex})_a},$$

где  $(L_a^{ex})_L$  – концентрация ОЗ на выходе из аэротенка-вытеснителя с прикрепленным биоценозом, мг/л;  $(L_a^{ex})_a$  – концентрация ОЗ на выходе из аэротенка-вытеснителя традиционной конструкции, мг/л.

При проведении расчетов значения констант из системы уравнений (1)-(11) принимались согласно рекомендациям, изложенным в работе [11, 135].

На рис. 2 представлен пример расчета влияния приведенной длины участка с прикрепленным биоценозом  $S_L/S$  на эффективность работы сооружения  $\Theta$ .

Данные, представленные на рис. 2, показывают, что при размещении насадок с прикрепленным биоценозом во второй части сооружения и повышении плотности их расположения лимитирующее влияние кислорода уменьшается. Это можно объяснить тем, что в конце сооружения концентрация ОЗ имеет уже небольшое значение за счет утилизации активным илом. Потребление кислорода в биопленке уменьшается, его концентрация возрастает.

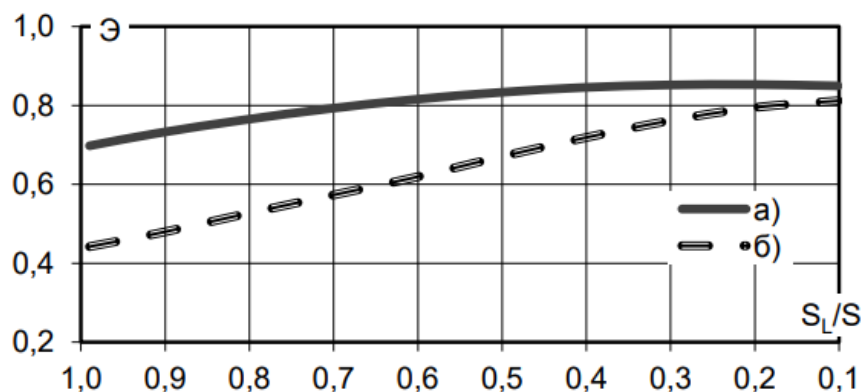


Рис. 2. Влияние места расположения и плотности распределения элементов с прикрепленным биоценозом на эффективность работы аэротенка с прикрепленным биоценозом: а) без учета кислородного режима; б) с учетом кислородного режима

Также изучено влияние толщины биопленки на степень обеспеченности кислородом и, соответственно, на процесс очистки в усовершенствованном сооружении (рис. 3).

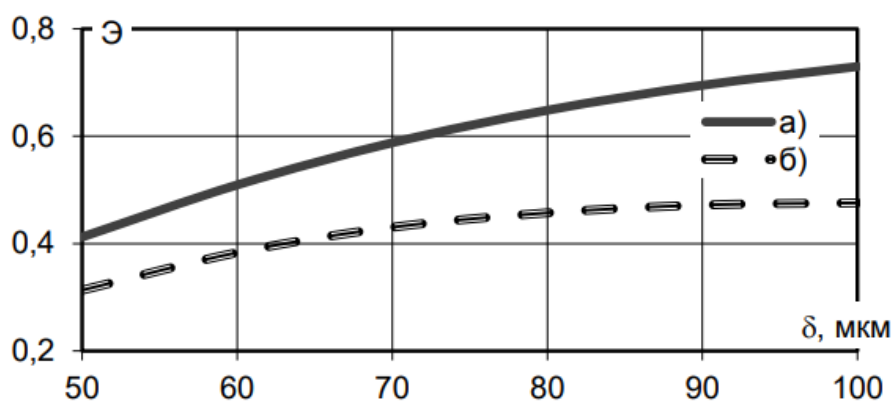


Рис. 3. Влияние толщины биопленки на эффективность работы аэротенка с прикрепленным биоценозом: а) без учета кислородного режима; б) с учетом кислородного режима

С увеличением толщины биопленки, с одной стороны, увеличивается степень изъятия  $O_3$  прикрепленным биоценозом, с другой стороны, уменьшается концентрация кислорода, особенно в нижних слоях. Кислородный режим все более лимитирует процесс утилизации субстрата, рост эффективности замедляется, и с какого-то момента толщина биопленки практически не влияет на степень очистки.

### Выводы

С помощью разработанной математической модели биологической очистки в аэротенке-вытеснителе с прикрепленным биоценозом и учетом потребления кислорода, проведены теоретические исследования. Скорость утилизации  $O_3$  прикрепленным и взвешенным биоценозом, а также скорость потребления кислорода в биопленке определялись с помощью уравнений нелинейной кинетики. Эти исследования показали, что плотное размещение

насадок во второй части сооружения является наиболее эффективным. Показано, что толщина биопленки на дополнительной загрузке должна соответствовать значению, при котором концентрация субстрата и концентрация кислорода оказывают равнозначное влияние на процесс утилизации ОЗ.

### Список литературы

1. *Грицина О.О.* Удосконалення методики розрахунку та конструкцій аеротенків із аноксидними і аеробними зонами: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.04 «Водопостачання, каналізація» / О.О. Грицина. Рівне: НУВГП, 2013. 20 с.
2. *Нездоймінов В.І.* Одномулова нітрифікація-денітрифікація в біологічних реакторах із затопленою ерліфтною системою аерації: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт техн. наук: спец. 05.23.04 «Водопостачання, каналізація» / В.І. Нездоймінов. Макіївка: ДонНАБА, 2013. 34 с.
3. *Горносталь С.А.* Підвищення ефективності роботи споруд біологічного очищення міських стічних вод: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.04 «Водопостачання, каналізація» / С.А. Горносталь. Харків: ХНУБА, 2013. 21 с.
4. *Ковальчук В.А.* Очистка стічних вод: Навч. посібник. Рівне: ВАТ Рівненська друкарня, 2003. 622 с.
5. *Кобелева Й.В.* Биологическая очистка коммунально-бытовых сточных вод с применением реагентных препаратов: автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 03.01.06 «Биотехнология (в том числе бионанотехнологии)» / Й.В. Кобелева. Казань: ФГБОУ ВО «КНИТУ», 2017. 16 с.
6. *Реконструкция и интенсификация сооружений водоснабжения и водоотведения: [учебное пособие] / [А.А. Василенко, П.А. Грабовский, Г.М. Ларкина и др.].* Киев - Одесса: КНУСА, ОГАСА, 2007. 307 с.
7. *Олійник О.Я.* Моделювання очистки стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аеротенках зі зваженим (вільноплаваючим) і закріпленим біоценозом / О.Я. Олійник, Т.С. Айрапетян // Доповіді НАНУ. 2015. №5. С. 55-60.
8. *Oleynik A.* Oxygen regime in research on the work of plugflow aeration tanks with fixed biomasses / A. Oleynik, T. Airapetian // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 4/10 (88) 2017. P. 4-12.
9. *Хенце М.* Очистка сточных вод / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван; [пер. с англ.]. М.: Мир, 2004. 480 с.
10. *Вавилин В.А., Васильев В.В.* Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод. М.: Наука, 1979. 116 с.
11. *Маслун Г.С.* Практичні рекомендації до розрахунку кисневого режиму при очистці стічних вод на затоплених фільтрах / Г.С. Маслун // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. К.: КНУБА, 2013. Вип. 21. С. 123-142.

Стаття надійшла до редакції 18.12.17