

Айрапетян Т.С.*Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова
(вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002, Україна)***Карагяур А.С.***Харьковский национальный университет строительства и архитектуры
(вул. Сумська, 40, Харків, 61002, Україна; e-mail: ykg.knuca@ukr.net)*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ В КОМБИНИРОВАННЫХ АЭРОТЕНКАХ С ПРИКРЕПЛЕННЫМ БИОЦЕНОЗОМ

Усовершенствована двухуровневая математическая модель биологической очистки в комбинированных аэротенках (смеситель-вытеснитель) с прикрепленным биоценозом. Математическая модель базируется на уравнениях материального баланса (для реактора-смесителя) и переноса по длине аэротенка (для реактора-вытеснителя) концентрации органических загрязнений и концентрации активного ила, а также уравнениях переноса органических загрязнений и кислорода по толщине биопленки. Скорость окисления органических загрязнений взвешенным и прикрепленным биоценозом описывается уравнением Моно. Для биопленки учтено влияние кислородного режима. Представлены результаты теоретических исследований, в которых изучено влияние соотношения объемов реактора-смесителя и реактора-вытеснителя на эффективность очистки. Обоснована эффективность варианта, при котором прикрепленный биоценоз сосредоточен во второй части реактора-вытеснителя.

Ключевые слова: биологическая очистка, реактор-смеситель, реактор-вытеснитель, активный ил, прикрепленный биоценоз, органические загрязнения, математическая модель.

Введение. В практике очистки городских сточных вод наибольшее распространение получили биологические методы, что объясняется их универсальностью и относительно низкими эксплуатационными затратами. Биологическая очистка сточных вод обеспечивает деструкцию сложных органических загрязнений, осуществляемую безреагентным путем в обычных физико-химических условиях и с минимальными затратами энергии.

Основными элементами технологической схемы сооружений биологической очистки сточных вод являются аэрационные ёмкости – аэротенки, в которых осуществляются биохимические процессы окисления органических загрязнений и вторичные отстойники для отделения активного ила от очищенной сточной воды [1-5].

В зависимости от гидродинамического режима движения жидкости аэротенки подразделяют на аэротенки-смесители и аэротенки-вытеснители. В аэротенке-смесителе 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. В аэротенки-вытеснители отсутствует перемешивание, сточная вода вместе с активным илом движется от места впуска до места выпуска в реакторе и в результате окисления концентрация загрязнений уменьшается по длине аэротенка.

В процессе биологической очистки сточная вода очищается от многих органических примесей. Однако, степень удаления органических и биогенных загрязнений в сооружениях биологической очистки во многих случаях не удовлетворяет необходимым нормативным требованиям. Недостаточная степень очистки сточных вод способствует поступлению в водоёмы большого количества загрязняющих веществ и приводит соответственно до ухудшения экологической ситуации в регионах. Поэтому актуальными являются исследования, направленные на повышение эффективности работы аэрационных сооружений.

Выполненные исследования и проведенный анализ показали, что эффективность удаления органических загрязнений

(ОЗ) в аэротенках можно значительно повысить, если наряду со взвешенным биоценозом (активным илом) устроить в объеме аэротенка дополнительную загрузку (сетки, насадки, перфорированные перегородки и т.п.) на поверхности которой образуется биопленка в виде прикрепленного биоценоза с высокой концентрацией микроорганизмов [6-8].

Математическое моделирование позволяет исследовать процесс совместной очистки в широком диапазоне основных влияющих факторов, а также обосновать рациональные параметры аэротенков с дополнительными устройствами. Однако, существующие модели [9-12] не рассматривают одновременное окисление органических примесей прикрепленным и взвешенным биоценозом, поэтому необходимо их усовершенствование. Так в работах [7, 13] с помощью математического моделирования выполнена оценка и анализ совместного удаления органических загрязнений взвешенным и прикрепленным биоценозом в аэротенках-смесителях, а в работах [14, 15] – в аэротенках-вытеснителях. Преимущество применения смесителей или вытеснителей определяется соотношением следующих параметров: исходная концентрация ОЗ, исходная концентрация активного ила, концентрация ОЗ на выходе из сооружения, а также концентрация ОЗ, соответствующая минимуму функции $1/R(L_a)$, где $R(L_a)$ – скорость окисления ОЗ [9]. Поэтому представляет интерес исследование работы комбинированного аэротенка (смесителя-вытеснителя) с прикрепленным биоценозом.

Цель и задачи. Целью исследований является теоретическое исследование работы комбинированного аэротенка с реактором-смесителем и реактором вытеснителем, содержащего дополнительные элементы с прикрепленным биоценозом.

Для этого необходимо решить следующие задачи:

1) усовершенствовать математическую модель удаления ОЗ прикрепленным и взвешенным биоценозом;

2) провести численные расчеты для комбинированного аэротенка, выявить рациональные параметры устройства.

Материалы и методы исследования. При разработке математической модели, описывающей процесс биологической очистки в комбинированном аэротенке, содержащим элементы с прикрепленным биоценозом, приняты следующие допущения:

- 1) процесс утилизации субстрата взвешенным и прикрепленным биоценозом, а также процесс потребления кислорода в биопленке, являются установившимися;
- 2) за счет постоянного аэрирования 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;
- 3) в реакторе, работающем как смеситель, перенос субстрата происходит в результате идеального перемешивания;
- 4) в реакторе, работающем как вытеснитель, диффузионным переносом субстрата в свободном объеме аэротенка можно пренебречь;
- 5) толщина биопленки на дополнительных элементах и концентрация активного ила в свободном объеме аэротенка являются постоянными величинами;
- 6) 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 комбинированного аэротенка с взвешенным и прикрепленным биоценозом и учетом кислородного режима в биопленке составляют следующие уравнения и зависимости:

1) Уравнение переноса органических загрязнений по длине реактора-вытеснителя

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

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, м²; Q_a – расход очищаемой воды, м³/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), $\frac{M}{c} \frac{Mz}{l}$; $\lambda_\delta = F_{\delta l}/F$ – конструктивный параметр, м⁻¹; $F_{\delta l}$ – удельная площадь поверхности биопленки (на единицу длины аэротенка), м; $\varepsilon = 1 - \frac{W_\delta}{W_a} = \frac{W_{жс}}{W_a}$ – коэффициент, учитывающий уменьшение свободного объема аэротенка, вызванное размещением дополнительной загрузки (насадок) с прикрепленным биоценозом; W_a – рабочий объем аэротенка, м³; $W_{жс}$ – объем жидкости в аэротенке, м³; W_δ – объем загрузки (насадок) с прикрепленным биоценозом, м³.

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

2) Уравнение материального баланса загрязнений в реакторе-смесителе

$$L_{a0} - L_a - \frac{F_\delta}{Q_a} N_L - \varepsilon T_a R_a = 0, \quad (2)$$

где F_δ – площадь поверхности биопленки, м²; $T_a = \frac{W_a}{Q_a}$ – время пребывания очищаемой воды в реакторе-смесителе, с.

3) Уравнение переноса активного ила по длине реактора-вытеснителя

$$V \frac{\partial X_a}{\partial x} = R_x, \quad (3)$$

где X_a – концентрация активного ила, мг/л; R_x – скорость роста активного ила, мг/(л·с).

Уравнение (3) решается при следующим граничном условии: $x = 0 X_a = X_{am}$, где X_{am} – концентрация активного ила на входе в реактор-вытеснитель, мг/л.

4) Уравнение материального баланса активного ила в реакторе-смесителе

$$X_{a0} - X_{am} + \varepsilon T_a R_x = 0, \quad (4)$$

где X_{a0} – концентрация активного ила в исходной воде, мг/л.

5) Уравнение переноса органических загрязнений по толщине биопленки (необходимо для вычисления параметра N_L)

$$D_L \frac{d^2 L}{dy^2} - R_L = 0, \quad (5)$$

где y – координата, м, которая изменяется в пределах от 0 до δ (толщина биопленки); L – концентрация ОЗ в биопленке, мг/л; D_L – коэффициент молекулярной диффузии в биопленке, м²/с; R_L – скорость утилизации ОЗ прикрепленным биоценозом в биопленке, мг/(л·с).

Уравнение (5) решается при следующих граничных условиях:

$$y = \delta \frac{dL}{dy} = 0; y = 0$$

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

$$L|_{y=0} = L_\delta, \quad (6)$$

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

6) Уравнения кинетики (зависимости для определения скорости утилизации ОЗ взвешенным и прикрепленным биоценозом R_a и R_L , а также скорости роста микроорганизмов R_x и потребления кислорода в биопленке R_C)

$$R_a = -\frac{\mu_a X_a}{Y_a} \frac{L_a}{K_{mL_a} + L_a}, \quad (7)$$

$$R_x = \frac{\mu_a X_a L_a}{K_{mL_a} + L_a}, \quad (8)$$

$$R_L = -\frac{\mu_L X_L}{Y_L} \frac{L}{K_{mL} + L} \frac{C}{K_{mC} + C}, \quad (9)$$

$$R_C = \alpha_1 R_L + \alpha_2 b_L \frac{C}{K_{mC} + C} X_L, \quad (10)$$

где μ_a , μ_L – максимальная удельная скорость роста биомассы микроорганизмов, с⁻¹;

K_{mL_a}, K_{mL}, K_{mC} – константы полунасыщения, мг/л; X_L – концентрация микроорганизмов в биопленке, 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; α_1, α_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⁻¹.

7) Уравнение переноса кислорода по толщине биопленки

$$D_C \frac{d^2 C}{dy^2} - R_C = 0, \quad (11)$$

где D_C – коэффициент молекулярной диффузии кислорода в биопленке, м²/с.

Уравнение (11) решается при следующих граничных условиях:

$$y = \delta \frac{dC}{dy} = 0; \quad y = 0$$

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

$$C|_{y=0} = C_\delta, \quad (12)$$

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

8) Зависимость для расчета коэффициента ε при расположении насадок не по всей длине сооружения, а только в его части, с учетом сохранения их объема и, соответственно, увеличения плотности распределения

$$\varepsilon = 1 - (1 - \varepsilon_0) \frac{S}{S_L}, \quad (13)$$

где ε_0 – коэффициент уменьшения свободного объема аэротенка при равномерном распределении насадок по всей длине сооружения; S_L – длина участка реактора, на котором расположены насадки, м.

Система уравнений и зависимостей (1) – (12), которая составляет основу математической модели, решается численно методом конечных разностей.

Результаты исследований. С помощью математической модели были проведены численные исследования процесса биологической очистки в комбинированном аэротенке. Принято, что в первой части сооружения расположен реактор-смеситель, во второй – реактор-вытеснитель.

Были рассмотрены два варианта:

а) очистка осуществляется только с помощью взвешенного биоценоза;

б) по всей длине сооружения расположены дополнительные элементы (насадки): очистка осуществляется с помощью взвешенного и прикрепленного биоценоза.

Критерием эффективности принят параметр, описывающий качество очистки – L_e/L_{a0} , где L_e – концентрация ОЗ на выходе из сооружения, мг/л.

На рис. 1 представлен пример расчета влияния приведенной длины реактора-смесителя S_m/S на эффективность работы сооружения L_e/L_{a0} .

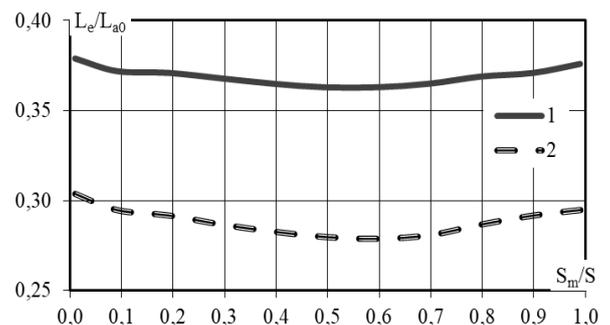


Рис. 1 Влияние соотношения приведенной длины реактора-смесителя на эффективность работы комбинированного аэротенка: 1 – очистка взвешенным биоценозом; 2 – комбинированная очистка прикрепленным и взвешенным биоценозом при расположении дополнительных элементов по всей длине сооружения

Расчеты проведены для следующих исходных данных: $L_{a0} = 450$ мг/л, $W_a = 8150$ м³; $Q_a = 0,556$ м³/с, $L_{a \min} = 240$ мг/л. Значение $L_{a \min}$ соответствующее минимуму функции $1/R(L_a)$ определяли по зависимости [9]:

$$L_{a \min} = K_{mL_a} \left(\sqrt{1 + \frac{X_{a0} + Y_a L_{a0}}{Y_a K_{mL_a}}} - 1 \right).$$

Как видно из рис. 1 концентрация ОЗ на выходе из сооружения $L_e < L_{a \min}$, что соответствует условию эффективности применения комбинированного сооружения

$$L_e < L_{a\min} < L_{a0}$$

Данные, представленные на рис. 1, подтверждают, что увеличение длины (объема) реактора-смесителя приводит к увеличению качества очистки до определенного значения. Дальнейшее увеличение S_m приводит к ухудшению качества очистки. Такая же зависимость соблюдается и для комбинированного аэротенка с прикрепленным биоценозом.

На рис. 2 представлен пример расчета влияния приведенной длины участка реактора-вытеснителя с дополнительными элементами (насадками), содержащими прикрепленный биоценоз S_l/S_d (где S_d – длина реактора-вытеснителя) на эффективность очистки. Реактор-смеситель работает без прикрепленного биоценоза, его длина (объем) составляет 60% от общей длины (объема) сооружения.

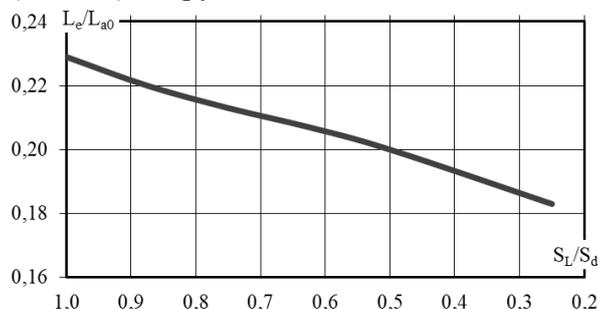


Рис. 2 Влияние расположения насадок с прикрепленным биоценозом на эффективность работы аэротенка

Данные, представленные на рис. 2, показывают, что сосредоточение дополнительных элементов с прикрепленным биоценозом во второй части реактора-вытеснителя способствует интенсификации процесса очистки.

Обсуждение результатов исследований. Проведенные исследования показывают, что для комбинированного аэротенка с прикрепленным биоценозом, существует рациональное значение объема реактора-смесителя, при котором качество очистки максимально. Это значение совпадает с величиной, которая получена для комбинированного аэротенка традиционной конструкции (без прикрепленного биоценоза) (рис. 1).

Сосредоточение дополнительных элементов во второй половине реактора-

вытеснителя обуславливает повышение качества очистки (рис. 2). Однако, повышенная концентрация насадок с прикрепленным биоценозом может создать трудности с аэрированием сточных вод на этом участке. Поэтому в дальнейших исследованиях необходимо учесть кислородный режим не только в биопленке, а и в свободном объеме аэротенка.

Выводы. С помощью усовершенствованной математической модели биологической очистки в комбинированном аэротенке с прикрепленным биоценозом, проведены теоретические исследования, которые позволяют рассчитать рациональные параметры сооружения. Показана целесообразность применения при определенных условиях для аэротенка с прикрепленным биоценозом комбинированного сооружения (смеситель-вытеснитель).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Водовідведення та очистка стічних вод міста. Курсове і дипломне проектування. Приклади та розрахунки: навч. посіб. / Василенко О., Епоян С., Смірнова Г. [та ін.]. – Київ – Харків, КНУБА, ХНУБА, 2012. – 572 с.
2. Воронов Ю. Водоотведение и очистка сточных вод. Учебное пособие / Ю. Воронов. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. – 760 с.
3. Жмур Н. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н. Жмур. – М.: АКВАРОС, 2003. – 512 с.
4. Von Sperling M. Biological wastewater treatment series. Vol. 5: Activated sludge and aerobic biofilm reactors [Text] / M. Von Sperling. – London: IWA Publishing, 2007. – 328 p.
5. Biological Wastewater Treatment / Henze M., M. Van Loosdrecht M., Ekama G., Brdjanovic D. – London: IWA Publishing, 2008. – 511 p.
6. Реконструкция и интенсификация сооружений водоснабжения и водоотведения: уч. пособ. / Василенко А., Грабовский П., Ларкина Г. [и др.]. – Киев – Одесса: КНУСА, ОГАСА, 2007. – 307 с.
7. Олійник О. Моделювання очистки стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аэротенках зі зваженим (вільноплаваючим) і закріпленим біоценозом /

- О. Олійник, Т. Айрапетян // Доповіді НАНУ. – К., 2015. - №5. – С.55 – 59.
8. Gebara F. Activated sludge biofilm waste water treatment system / F. Gebara // Wat. Res. – 1999. – Vol.13. - №1. – P.230 -238.
 9. Вавилин В.А. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод / В.А. Вавилин, В.В. Васильев. – М.: Наука, 1979. – 116 с.
 10. Смирнов Н.В. Математическое моделирование процесса биологической очистки сточных вод / Н.В. Смирнов // Ярославский педагогический вестник. Сер. «Естественные науки». – 2012. – Т. 3, № 3. – С. 44-49.
 11. Wanner O., Ebert N., Rittan B. Mathematical modeling of biofilms // Scientific and Technical Report. – 2006 – №18 – 208 с.
 12. Кирилов А.Н. Математическая модель оптимизации процесса биоочистки сточных вод / А.Н. Кирилов, Н.В. Смирнов // Труды Карельского научного центра РАН. – 2016. – № 8. – С. 55-61.
 13. Олійник О. Підвищення ефективності біологічної очистки стічних вод в аеротенках за рахунок зваженого та закріпленого біоценозу / О. Олійник, Т. Айрапетян // Науковий вісник будівництва. – Х: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2015. - №3 (81). – С.106 – 109.
 14. Айрапетян Т.С. Теоретические исследования биологической очистки в аэротенках-вытеснителях с прикрепленным биоценозом / Т.С. Айрапетян // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2017. – № 4 (90). – С. 158-164.
 15. Айрапетян Т.С. Визначення раціональних параметрів аеротенків-витискувачів з закріпленням біоценозом та врахуванням кисневого режиму / Т.С. Айрапетян // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. - К.: КНУБА, 2017. - Вип. 28.– С. 12-18.

Айрапетян Т.С., Карагяур А.С. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ В КОМБІНОВАНИХ АЕРОТЕНКАХ З ЗАКРІПЛЕНИМ БІОЦЕНОЗОМ. Удосконалена дворівнева математична модель біологічного очищення в комбінованих аеротенках (змішувач-витискувач) з закріпле-

ним біоценозом. Математична модель базується на рівняннях матеріального балансу (для реактора-змішувача) та переносу по довжині аеротенка (для реактора-витискувача) концентрації органічних забруднень та концентрації активного мулу, а також на рівняннях переносу органічних забруднень та кисню по товщині біоплівки. Швидкість окиснення органічних забруднень зваженим і закріпленням біоценозом описується рівнянням Моно. Для біоплівки враховується вплив кисневого режиму. Представлені результати теоретичних досліджень, в яких вивчено вплив співвідношення об'ємів реактора-змішувача та реактора-витискувача на ефективність очищення. Обґрунтована ефективність варіанту, при якому закріплений біоценоз зосереджений у другій частині реактора-витискувача.

Ключові слова: біологічне очищення, реактор-змішувач, реактор-витискувач, активний мул, закріплений біоценоз, органічні забруднення, математична модель.

Airapetian T.S., Karahiaur A.S. THEORETICAL STUDIES OF BIOLOGICAL PURIFICATION IN COMBINED AEROTANKS WITH FIXED BIOCECENOSIS. A two-level mathematical model of biological purification in combined aerotanks (mixer-displacer) with fixed biocenosis was developed. The mathematical model is based on the equations of material balance (for reactor-mixer) of transport along the length of the aerotank (for reactor-displacer) of the concentration organic pollution and the concentration of activated sludge, and the equations of transport of organic pollution and oxygen over the thickness of the biofilm. The rate of oxidation of organic pollution by a suspended and fixed biocenosis is described by the Mono equation. For biofilm, the influence of the oxygen regime has been taken into account. The results of theoretical studies of the influence of the ratio of the volumes of the reactor-mixer and the reactor-displacer on the purification efficiency are presented. The effectiveness of the variant in which the fixed biocenosis is concentrated in the second part of the reactor-displacer is justified.

Keywords: biological purification, reactor-mixer, reactor-displacer, active sludge, fixed biocenosis, organic pollution, mathematical model.