И.В. Лапшакова, А.А. Пангаева, В.Н. Зенцов (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация)

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БИОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Irina V. Lapshakova, Alexandra A. Pangaeva, Vyacheslav N. Zentsov
(Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation)

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE WASTE WATER TREATMENT BIOLOGICAL METHOD

Введение

При проектировании новых и реконструкции действующих очистных сооружений основной задачей является обеспечение оптимальных технологических параметров, необходимых для качественной очистки хозяйственно-бытовых сточных вод. Для выполнения этой задачи необходимы изучение основных закономерностей проведения биологической очистки и разработка математической модели данного процесса.

Цели и задачи

Изучение основных закономерностей процесса биологической очистки, разработка математической модели. Поскольку традиционные технологии с применением биофильтров и аэротенков не обеспечивают нормативные требования по удалению биогенных загрязнений, необходимо определить кинетические закономерности разрушения органических загрязнений в максимальном широком диапазоне изменения концентраций.

Результаты

Получены кинетические зависимости окисления органических веществ на основе исследований на действующих очистных сооружениях.

Background

When designing new and reconstructing existing treatment facilities, the main task is to ensure the optimal technological parameters necessary for high-quality treatment of domestic wastewater. To accomplish this task, it is necessary to study the basic laws of biological treatment and develop a mathematical model of this process.

Aims and Objectives

Study of the basic laws of the biological treatment process, development of a mathematical model. Since traditional technologies using biofilters and aerotanks do not provide regulatory requirements for the removal of biogenic contaminants, it is necessary to determine the kinetic regularities of the destruction of organic contaminants in the widest possible range of concentration changes.

Results

The kinetic dependences of the oxidation of organic substances were obtained on the basis of studies at existing treatment facilities.

Они оценивались через показатель биохимического потребления кислорода на каждой стадии биологической очистки для свободно плавающей и иммобилизированной на загрузочных материалах микрофлоры. Разработка математической модели биологического метода удаления биогенных элементов представляет практический интерес при проведении нитрификации и денитрификации.

They were assessed through the indicator of biochemical oxygen consumption at each stage of biological treatment for microflora freely floating and immobilized on loading materials. The development of a mathematical model of a biological method for removing nutrients is of practical interest when carrying out nitrification and denitrification.

Ключевые слова: биологическая очистка; биофильтр; аэротенк; математическая модель; биохимическая потребность кислорода; нитрификация и денитрификация

Keywords: biological treatment; biofilter; aeration tank; mathematical model; biochemical oxygen demand; nitrification and denitrification

Введение

При проектировании новых и реконструкции действующих очистных сооружений основной задачей является обеспечение оптимальных технологических параметров, необходимых для качественной очистки хозяйственно-бытовых сточных вод. Для выполнения этой задачи необходимы изучение основных закономерностей проведения биологической очистки и разработка математической модели данного процесса.

На основании многочисленных экспериментальных исследований установлено, что уравнения ферментативных реакций, служащие для описания процесса биологической очистки сточных вод, могут быть применены для анализа кинетики окисления отдельных загрязнений сточных вод.

Известно, что ферментативные реакции, учитывающие активацию процесса биологической очистки кислородом и ингибирование продуктами метаболизма микроорга-

низмов активного ила, описываются уравнением окислительной мощности OM (мг/л):

$$OM = \left(\frac{V_m S_t C_0 X}{(K_s C_0 + R_0 S + C_0 S)(1 + \phi X)} \right) K_t, \quad (1)$$

где V_m - максимальная удельная скорость биохимической деструкции субстрата, отнесенная к единице активной биомассы микроорганизмов, мг/л ч;

S_t - концентрация субстрата, количество органических веществ в очищенной воде, мг (биохимическое потребление кислорода) БПК/л;

C_0 - концентрация растворенного кислорода, мг/л;

X - концентрация микроорганизмов активного ила, мг/л;

K_s - константа «полунасыщения», учитывающая влияние концентрации субстрата;

K_o - константа «полунасыщения», учитывающая влияние концентрации растворенного кислорода;

K_t - коэффициент, учитывающий влияние температуры среды;

φ - константа, учитывающая влияние ингибирования продуктами метаболизма микроорганизмов активного ила.

Объем реактора или объем зоны окисления, m^3 , определяется по формуле:

$$W = t_{aep} Q,$$

где Q - расход сточных вод, $m^3/ч$;

t_{aep} - продолжительность пребывания, ч:

$$t_{aep} = \frac{S_0 - S_t}{OM}, \quad (2)$$

где S_0 - концентрация загрязнений по БПК_{полн} в исходной сточной воде, мг/л;

S_t - концентрация органических загрязнений по БПК_{полн} в очищенной воде, мг/л.

Величина V_m зависит от природы органических веществ, которые входят в состав загрязнений сточных вод, и от степени адаптации к ним микроорганизмов активного ила. С увеличением степени адаптации величина V_m , а, следовательно, и OM сооружения может существенно возрастать.

При повышении концентрации субстрата OM возрастает.

В реакторах-смесителях это связано с ухудшением качества очищенной воды.

В реакторах-вытеснителях это обстоятельство вызывает существенное повышение окислительной мощности сооружения в целом за счет значительного увеличения скорости процесса на его начальных стадиях.

Наряду с субстратом заметное влияние на скорость биохимической деструкции в аэробных условиях оказывает концентрация растворенного кислорода C_o .

Оптимальное значение концентрации растворенного кислорода зависит от нагрузки

на аэротенк и его типа экономичности аэрационного оборудования.

Повышение дозы ила также существенно увеличивает окислительную мощность очистных сооружений, но она возрастает не пропорционально дозе ила, а постепенно затухает с увеличением последней до 14,2 г/л. В обычных аэротенках доза ила ограничивается возможностями вторичных отстойников, которые при нормальных гидравлических нагрузках не позволяют поднять концентрацию ила свыше 10 г/л.

Экспериментальная программа

Наиболее доступными и эффективными в инженерном плане являются методы интенсификации сооружений биологической очистки, основанные на увеличении биомассы активного ила в аэрационных сооружениях.

Заметного увеличения дозы ила в аэротенках удается достичь при использовании загрузочных материалов.

На основании большого объема экспериментальных данных [1-4] показано, что кинетика окисления органических загрязнений, оцениваемых по БПК, а также окисление специфических ингредиентов в аэротенках подчиняются закономерностям ферментативной кинетики, выражаются гиперболической функцией и описываются известным уравнением Михаэлиса-Ментен:

$$\rho = \frac{V_m S}{K_s + S}. \quad (3)$$

В соответствии с этим уравнением при сравнительно малых концентрациях субстрата, когда $S < K_s$, скорость реакции приближенно является функцией концентрации субстрата.

Если $S > K_s$, то $\rho > V_m$, и при возрастании концентрации субстрата скорость достигает некоторого максимального значения. При дальнейшем увеличении концентрации органического вещества она не возрастает.

Для описания более сложных ферментативных реакций разработаны соответствующие модификации этого уравнения, отражающие механизмы взаимодействия фермента, субстрата, ингибиторов и других компонентов реакции.

Так, при субстратном торможении скорость реакции выражается уравнением:

$$\rho = \frac{V_m SK_s \alpha}{K_s + S + S^2}, \quad (4)$$

где α - константа торможения.

Определение константы торможения представляет практический интерес, поскольку позволяет оценить характер и вид торможения, и тем самым определить пути снятия этого торможения, что весьма существенно в решении проблемы биохимической очистки сточных вод, содержащих токсичные компоненты.

Величина $\alpha > 1$ свидетельствует о конкурентном механизме торможения субстратом, которое зависит от концентраций субстрата, фермента и от их сродства.

При таком механизме торможения снизить токсический эффект, можно уменьшив концентрацию органических загрязнений в процессе очистки, либо увеличив дозу активного ила, либо снизив величину K_s путем длительной адаптации активного ила (если это возможно). С увеличением константы α торможение уменьшается до тех пор, пока совсем не исчезнет при константе торможения равной бесконечности. В этом случае уравнение (4) принимает вид уравнения (3). При неконкурентном торможении, когда константа торможения $\alpha \leq 1$, степень торможения может быть уменьшена только путем снижения концентрации самого токсичного вещества, содержащегося в сточной воде.

Использование уравнений (3) и (4) удобно при обработке экспериментальных данных с целью определения кинетических констант для оценки и сравнения различных видов сточных вод или компонентов их загрязнений, отличающихся по своей способности к биоокислению.

При разработке технологии биологической очистки сточных вод от органических веществ и соединений азота необходимо определять и анализировать кинетические закономерности их деструкции в максимально широком диапазоне изменения концентраций.

Исследования на проточных моделях и в контактных условиях с индивидуальными органическими веществами, присутствующими в бытовых и промышленных сточных водах, позволяют получить кинетические зависимости окисления органических веществ. Они оцениваются через БПК и специфические загрязнения (нефтепродукты, синтетические поверхностно-активные вещества, фенолы, фосфор- и хлорорганические соединения, аммонийный азот в процессах нитрификации и др.) на каждой стадии биологической очистки как для свободноплавающей, так и для иммобилизованной на загрузкиных материалах микрофлоры.

На рисунке 1 представлена кинетика окисления органических загрязнений, оцениваемых по БПК, некоторых населенных пунктов Республики Башкортостан.

На основе проведенных исследований промышленных сточных и городских вод получены основные кинетические зависимости процессов нитрификации и денитрификации с учетом материального баланса (убыли азота с активным илом и снижением БПК за счет процессов ассимиляции).

На рисунках 2 и 3 представлены кинетики нитрификации и денитрификации изученных промышленных и городских сточных вод, которые описываются уравнениями ферментативной кинетики (3) и (4).

Обобщение результатов экспериментальных исследований позволило создать базу данных кинетических констант и коэффициентов для различных видов сточных вод и отдельных диктующих компонентов, на основании которой можно рассчитать сооружения до любой заданной степени очистки конкретного вида сточной воды с учетом окисления отдельных ингредиентов.

Рисунок 1. Кинетика окисления органических загрязнений по БПК

Рисунок 2. Кинетика процесса нитрификации, описываемая уравнением ферментативных реакций

1 - поселок Краснохолмский;
2 - село Кушнаренково;
3 - село Калтасы

Рисунок 3. Кинетика процесса денитрификации, описываемая уравнением ферментативных реакций.

Полученные зависимости позволяют рассчитать сооружения для любой степени очистки, а также указывают на экономическую целесообразность применения ступенчатых схем для очистки концентрированных сточных вод с целью сокращения общего объема сооружений.

Однако характер кривых на графиках (рисунки 2, 3) показывает, что даже для одно-

типных предприятий (нефтепереработка, городские сточные воды) абсолютные значения удельных скоростей окисления существенно различаются, хотя характеры кинетики окисления и тип торможения идентичны. Это указывает на необходимость корректировки кинетических констант для каждого конкретного объекта на основе экспериментальных данных.

Обсуждение результатов

Выполненные исследования показали, что закономерности биохимического окисления органических загрязнений сточных вод и изъятия соединений азота подчиняются уравнениям ферментативных реакций, что послужило основой для разработки новых универсальных методов расчета всего комплекса сооружений биологической очистки сточных вод как со свободноплавающей, так и с прикрепленной микрофлорой — аэротенков, биофильтров вторичных отстойников, биосорберов (рисунки 2, 3).

Одним из путей повышения производительности очистных сооружений без дополнительного строительства и эффективности их работы является применение загрузочных материалов. Это приводит к увеличению биомассы в системе (в виде биопленки) и позволяет повысить окислительную мощность аэротенков (в 2,0-2,5 раза) и производительность очистных сооружений по воде.

Кроме того, экспериментально установлено, что активный ил из аэротенков с загрузкой обладает лучшими седиментационными свойствами и более низким иловым индексом по сравнению со свободноплавающим активным илом, что позволяет увеличить гидравлическую нагрузку на отстойники и сократить их количество.

Иммобилизация микроорганизмов в виде биопленки также создает благоприятные условия для адаптации, осуществления процессов автоселекции и отбора, приводящих к формированию специфических биоценозов, микроорганизмов-деструкторов сложных органических веществ, обладающих эффективным метаболизмом и низкой скоростью роста, которые не способны развиваться в сооружениях со свободноплавающей микрофлорой.

За счет иммобилизации достигается более глубокая очистка по БПК и химическому потреблению кислорода (ХПК).

Исследованы различные виды загрузочных материалов, как в подвижном, так и стационарном состоянии.

Установлено, что насадка должна быть размещена в объеме аэрационного сооруже-

ния таким образом, чтобы был обеспечен максимальный эффект массопередачи с точки зрения снабжения иммобилизованных микроорганизмов органическим субстратом и кислородом воздуха, и в то же время исключено застание загрузочного материала избыточной биомассой.

Процесс с прикрепленной микрофлорой на практике реализуется в сооружениях со стационарной загрузкой типа биофильтр, биоротор, а также в реакторах со взвешенным слоем загрузочного материала.

Подобные сооружения являются более эффективными за счет улучшенного массообмена. Биологическая обработка и адсорбция хорошо сочетаются между собой при удалении из сточных вод органических загрязнений, взаимно дополняя друг друга в отношении типов молекул, которые они способны удалять.

Совмещение биологических и адсорбционных стадий в единый «биофизико-химический» процесс позволяет максимально использовать преимущества адсорбционно-биологической кооперации и является перспективным направлением совершенствования технологии биологической очистки.

Биоразлагаемые компоненты субстрата окисляются в биопленке на активированном угле по механизму, качественно аналогичному окислению в свободном объеме или на инертных носителях. Биорезистентные компоненты могут непрерывно удаляться только при условии, что при адсорбции возникает возможность их ферментативной трансформации (модификации) в биоразлагаемую форму.

Эти превращения происходят только с адсорбированными субстратами в микропористой структуре сорбента при участии иммобилизованных в этой же структуре экзоферментов микроорганизмов. Модифицированный субстрат теряет способность удерживаться сорбентом и диффундирует из микропористой структуры к биопленке, где происходит его окончательное окисление.

Интенсивность биосорбционного окисления определяется тремя видами процессов: переносом субстрата и продуктов его

окисления, сорбцией на поверхности пор сорбента и биохимическими превращениями.

Практическое применение результатов

На основе представленной теории разработана принципиально новая технология и сооружения для ее реализации – биосорберы со взвешенным слоем загрузочного материала, в частности, активированного гранулированного угля.

Установки для очистки воды биосорбционным способом – биосорберы предназначены для глубокой доочистки сточных вод до нормативов сброса в водоемы рыбохозяйственного назначения, удаления из сточных вод трудноокисляемых и токсичных веществ (нефтепродукты, синтетические поверхностно-активные вещества, жиры, красители, различные хлор- и фосфорпроизводные и др.),

локальной очистки отдельных потоков производственных сточных вод с целью их повторного использования, а также для очистки природных вод в процессах приготовления питьевой воды [2, 5-8].

На рисунке 4 представлена кинетика окисления нефтепродуктов (на примере гексадекана) в биосорберах с углем.

На рисунке 5 представлена кинетика окисления синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ) в двухступенчатых биосорберах. На первой ступени использована инертная загрузка дробленый керамзит, на второй – активированный уголь.

Ход кривых на рисунках 4 и 5 указывает, что кинетика окисления органических веществ в биосорберах также подчиняется закономерностям ферментативной кинетики и может описываться соответствующими уравнениями (3), (4).

Рисунок 4. Кинетика окисления гексадекана в биосорберах с углем и керамзитом (1 ступень)

Рисунок 5. Кинетика окисления СПАВ в биосорберах

Выводы

Установлено, что расчет кинетических параметров сооружений как со свободноплавающим, так и иммобилизованным биоценозом производится по идентичным зависимостям.

Отмечено, что традиционные технологии и сооружения биологической очистки, в частности аэротенки и биофильтры, не обес-

печивают нормативные требования по удалению биогенных элементов. Наибольший практический интерес представляет разработка математической модели биологического метода удаления биогенных элементов в процессе нитри-денитрификации, который не требует дорогостоящих и дефицитных реагентов, не увеличивает солесодержания стоков и объемы образующихся осадков.

Список литературы

1. Shvetsov V.N. Deep Biological Treatment of Concentrated Wastewater: Doct. Engin. Sci. Diss. M.: 1988.
2. Yakovlev S.V., Shvetsov V.N., Morozova I.V. Application of Biosorbents for the Removal of Residual Organic Matter after Biological Treatment // Theoretical Foundations of Chemical Technology. 1993. Vol. 27. No. 1.
3. Yakovlev S.V., Shvetsov V.N., Skirdov I.V., Bondarev A.A. Technological Calculation of Modern Biological Wastewater Treatment Plants // Water Supply and Sanitation Engineering. 1994. No. 2.
4. Швецов В.Н., Морозова К.М., Нечаев И.А., Петрова Л.А. Нитрификация и денитрификация

References

1. Shvetsov V.N. Deep Biological Treatment of Concentrated Wastewater: Doct. Engin. Sci. Diss. Moscow, 1988.
2. Yakovlev S.V., Shvetsov V.N., Morozova I.V. Application of Biosorbents for the Removal of Residual Organic Matter after Biological Treatment. *Theoretical Foundations of Chemical Technology*, 1993, Vol. 27, No. 1.
3. Yakovlev S.V., Shvetsov V.N., Skirdov I.V., Bondarev A.A. Technological Calculation of Modern Biological Wastewater Treatment Plants. *Water Supply and Sanitation Engineering*, 1994, No. 2.
4. Shvetsov V.N., Morozova K.M., Nechaev I.A., Petrova L.A. Nitrifikatsiya i denitrifikatsiya stochnykh

сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 1995. № 11.

5. Shvetsov V.N., Yakovlev S.V., Morozova K.M. Nitrification and Denitrification of Wastewater // Water Supply and Sanitation. 1995. No. 11.

6. Zentsov V.N., Nazarov V.D., Lapshakova I.V., Abdrakhmanova Yu.F. Closed-Circuit Water Supply System for Settlements with Physical-Chemical Wastewater Treatment Plants // Water: Problems and Solutions: Collection of Reports from the All-Russian Scientific and Practical Conference. 2011. P. 64-67.

7. Zentsov V.N., Nikitina O.G., Lapshakova I.V., Vasileva A.S. Intensifying the Operation of Wastewater Treatment Plants // Northern Sea Route, Water and Land Transport Corridors as the Basis for the Development of Siberia and the Arctic in the XXI Century: Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference. 2018. P. 95-100.

8. Zentsov V.N., Nazarov V.D., Abdrakhmanova Yu.F., Lapshakova I.V. Closed-Circuit Water Supply and Sanitation Systems for Small Settlements // Water: Problems and Solutions: Collection of Reports from the All-Russian Scientific and Practical Conference. 2011. P. 49-51.

vod [Wastewater Nitrification and Denitrification]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika - Water Supply and Sanitary Technique*, 1995, No. 11. [in Russian].

5. Shvetsov V.N., Yakovlev S.V., Morozova K.M. Nitrification and Denitrification of Wastewater. *Water Supply and Sanitation*, 1995, No. 11.

6. Zentsov V.N., Nazarov V.D., Lapshakova I.V., Abdrakhmanova Yu.F. Closed-Circuit Water Supply System for Settlements with Physical-Chemical Wastewater Treatment Plants. *Collection of Reports from the All-Russian Scientific and Practical Conference «Water: Problems and Solutions»*. 2011, pp. 64-67.

7. Zentsov V.N., Nikitina O.G., Lapshakova I.V., Vasileva A.S. Intensifying the Operation of Wastewater Treatment Plants. *Proceedings of the XX International Scientific and Practical Conference «Northern Sea Route, Water and Land Transport Corridors as the Basis for the Development of Siberia and the Arctic in the XXI Century»*. 2018, pp. 95-100.

8. Zentsov V.N., Nazarov V.D., Abdrakhmanova Yu.F., Lapshakova I.V. Closed-Circuit Water Supply and Sanitation Systems for Small Settlements. *Collection of Reports from the All-Russian Scientific and Practical Conference «Water: Problems and Solutions»*. 2011, pp. 49-51.

Авторы

• Лапшакова Ирина Васильевна, канд. техн. наук
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Доцент кафедры «Водоснабжение
и водоотведение»
Российская Федерация, 450080, г. Уфа,
ул. Менделеева, 195
e-mail: irvasya@rambler.ru

• Зенцов Вячеслав Николаевич, д-р техн. наук,
профессор
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Профессор кафедры «Водоснабжение
и водоотведение»
Российская Федерация, 450080, г. Уфа,
ул. Менделеева, 195
e-mail: ugntu-vv@mail.ru

• Пангаева Александра Андреевна
Уфимский государственный нефтяной
технический университет
Магистрант кафедры «Водоснабжение
и водоотведение»
Российская Федерация, 450080, г. Уфа,
ул. Менделеева, 195
e-mail: ugntu-vv@mail.ru

The Authors

• Lapshakova Irina V., Candidate of Engineering
Sciences
Ufa State Petroleum Technological University
Assistant Professor of Water Supply and Drainage
Department
195, Mendeleev str., Ufa, 450080,
Russian Federation
e-mail: irvasya@rambler.ru

• Zentsov Vyacheslav N., Doctor of Engineering
Sciences, Professor
Ufa State Petroleum Technological University
Professor of Water Supply and Drainage Department
195, Mendeleev str., Ufa, 450080,
Russian Federation
e-mail: ugntu-vv@mail.ru

• Pangaeva Alexandra A.
Ufa State Petroleum Technological University
Undergraduate Student of Water Supply
and Drainage Department
195, Mendeleev str., Ufa, 450080,
Russian Federation
e-mail: ugntu-vv@mail.ru