

УДК 628.35

В. И. НЕЗДОЙМИНОВ

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры

КИНЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОДНОИЛОВЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ОКИСЛЕНИЕМ УГЛЕРОДА, НИТРИФИКАЦИИ И ДЕНИТРИФИКАЦИИ

Предложены модели для упрощенного описания процессов одноиловых биологических систем с окислением углерода, нитрификации и денитрификации при совместном культивировании гетеротрофных и автотрофных организмов активного ила при очистке сточных вод, содержащих органический субстрат и соединения азота.

нитрификация, денитрификация, автотрофные и гетеротрофные микроорганизмы, анаммокс-процесс

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Повышение эффективности очистки сточных вод непосредственно связано с разработкой кинетических моделей одноиловых биологических систем активного ила с одновременным окислением органических загрязнений и соединений азота.

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Сложные процессы развития бактериальных клеток активного ила регулируются целым рядом ферментов, локализованных в цитоплазме, катализирующих окислительно-восстановительные реакции. Поэтому закономерности роста клеток активного ила и изъятие субстрата с большой достоверностью могут описываться кинетикой ферментативных реакций.

Обычно кинетика роста описывается уравнением Моно [1]

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{1}{Y} \frac{\mu_m S}{K_s + S} X, \quad (1)$$

где X – биомасса микроорганизмов;

Y – максимальный коэффициент прироста биомассы;

μ_m – максимальная скорость роста культуры без лимитирования субстратом;

S – субстрат;

K_s – константа Михаэлиса, численно равная концентрации субстрата, при которой стационарная скорость реакции равна половине максимальной скорости.

Уравнение Моно, невзирая на простоту математической модели, способно описывать микробиологические процессы при совместном культивировании гетеротрофных и автотрофных организмов активного ила при очистке сточных вод, содержащих органический субстрат и соединения азота [2].

Для описания процессов, проходящих в системах с активным илом, наибольшее применение нашли предложенные Международной Водной Ассоциацией модели ASM1 и ASM3. В настоящее время в зарубежных научных изданиях указывается, что модель ASM1 является наиболее оправданной для упрощенного описания процессов биологической очистки сточных вод, содержащих органические загрязнения и соединения азота [3].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Теоретические предпосылки использования модели ASM1 для описания одноиловых биологических систем при очистке сточных вод.

© В. И. Нездойминов, 2013

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Модель ASM1 может быть использована для описания процессов одноилловых биологических систем с окислением углерода, нитрификации и денитрификации при условии, что биомасса гомогенна и не претерпевает значительных изменений в видовом составе во времени. Прирост ила рассматривается как общий прирост биомассы в пересчете на массу вещества, удаленного из сточных вод.

Прирост гетеротрофных микроорганизмов $X_{ГМ}$ в основном формируется от трех разных процессов: аэробного роста, анаэробного роста и распада. Прирост аэробной гетеротрофной биомассы может лимитироваться легкоокисляемым субстратом S_s либо кислородом S_o . Константа полунасыщения гетеротрофов кислородом $K_{O,H}$ зависит от размера флокул ила и концентрации кислорода. С увеличением размеров флокул ухудшается диффузия кислорода.

Вклад в общую массу гетеротрофов вносят и денитрифицирующие микроорганизмы, прирост которых зависит от концентрации нитритов и нитратов S_{NO} и коэффициента полунасыщения K_{NO} денитрифицирующих гетеротрофов. Однако их прирост меньший, чем у аэробных гетеротрофов, что учитывается понижающим коэффициентом коррекции η_g . Этот понижающий коэффициент учитывает фракцию гетеротрофных бактерий, способных проводить денитрификацию [4].

Распад биомассы приводит к тому, что в биореакторе увеличивается концентрация медленно разлагаемого вещества, которое затем гидролизуется для построения нового клеточного материала с потреблением кислорода (аэробные условия) или нитрата (анаэробные условия). Распад описывается линейным уравнением по биомассе $X_{ГМ}$ с константой распада b_1 .

Дифференциальное уравнение аэробного роста гетеротрофов имеет вид [5]

$$\frac{dX_{ГМ}}{dt} = \mu_{ГМ} \frac{S_s}{K_s + S_s} \cdot \frac{S_o}{K_{O,H} + S_o} X_{ГМ} + \eta_g \mu_{ГМ} \frac{S_s}{K_s + S_s} \cdot \frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_o} \cdot \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} X_{ГМ} - b_1 X_{ГМ}, \quad (2)$$

где $\mu_{ГМ}$ – максимальная скорость роста гетеротрофных микроорганизмов.

Анализируя уравнение (2) видно, что для одноилловых систем с аэробным и анаэробным ростом кислород оказывает двойное влияние на прирост гетеротрофных микроорганизмов. Если концентрация кислорода $S_o = 0$, то и величина $(S_o / (K_{O,H} + S_o)) = 0$ прирост аэробных гетеротрофных микроорганизмов отсутствует, зато максимальный прирост получают денитрифицирующие микроорганизмы, использующие связанный кислород нитратов $(K_{O,H} / (K_{O,H} + S_o)) = 1$. Увеличение концентрации кислорода приводит к снижению прироста денитрифицирующих микроорганизмов, и наоборот, прирост получают аэробные гетеротрофные микроорганизмы. Проанализируем изменения значений $(S_o / (K_{O,H} + S_o))$ и $(K_{O,H} / (K_{O,H} + S_o))$ при различных значениях S_o при условии, что единственным фактором, лимитирующим рост гетеротрофной биомассы, является концентрация кислорода. Величины $\mu_{ГМ}$ и $X_{ГМ}$ условно приняты постоянными.

Результаты расчетов при $K_{O,H} = 0,2$ г $O_2/м^3$ [4] сведены в табл.

Таблица – Результаты расчета

$S_o, \text{ мг/дм}^3$	$\frac{S_o}{K_{O,H} + S_o}$	$\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_o}$
0,1	0,33	0,67
0,5	0,71	0,29
1	0,83	0,17
2	0,91	0,09
3	0,94	0,06
4	0,95	0,05
5	0,96	0,04

Расчетные данные табл. показали, что суммарный вклад $K_{O,H} / (K_{O,H} + S_o)$ и $S_o / (K_{O,H} + S_o)$ в прирост гетеротрофной биомассы в диапазоне концентраций кислорода от 0,1 до 5,0 г $O_2/м^3$ есть величина постоянная.

Значения этих величин, определяющих прирост микроорганизмов, постоянно перераспределяются в зависимости от изменения концентрации кислорода. Приросту денитрифицирующих микроорганизмов явно преобладают концентрации кислорода в диапазоне 0...1 мг/дм³. В зарубежной практике такие условия принято называть условиями кислородного лимитирования [5].

Для культивирования аэробных гетеротрофных микроорганизмов предпочтительней повышенные концентрации кислорода. Таким образом, содержание кислорода в воде по-разному влияет на

рост аэробных гетеротрофных и денитрифицирующих микроорганизмов. При низких концентрациях кислорода эти два процесса могут идти одновременно. В соответствии с (рис.) концентрация кислорода $0,29 \text{ мг/дм}^3$ благоприятна для одновременного роста аэробных гетеротрофных и денитрифицирующих микроорганизмов, хотя скорости обоих процессов уменьшаются в два раза.

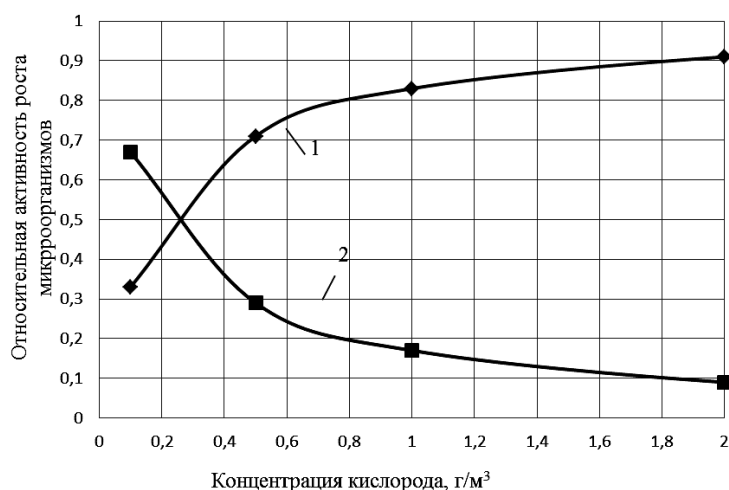


Рисунок – Зависимость относительной активности роста микроорганизмов от концентрации кислорода:
1 – аэробные гетеротрофные микроорганизмы; 2 – денитрифицирующие микроорганизмы.

Для биореактора с одноиловой системой, где культивируются аэробные гетеротрофные и денитрифицирующие микроорганизмы, необходимо обеспечивать непрерывное прохождение биомассы активного ила через аэробные и аноксидные зоны с небольшим временем пребывания в них. Это позволит поддерживать достаточно высокую относительную активность аэробных гетеротрофных и денитрифицирующих микроорганизмов. Учитывая значительную инерционность биологической системы «активный ил» по отношению к растворенному кислороду, то в определенном диапазоне значений кислорода активность этих двух групп микроорганизмов будет достаточно высокой. В соответствии с рис. оптимальный диапазон концентраций растворенного кислорода должен находиться в пределах $0,3...1,0 \text{ мг/дм}^3$.

Особенность биологической очистки сточных вод заключается в том, что концентрация органического субстрата, аммонийного азота и кислорода в обрабатываемой воде по ряду причин может меняться в течение нескольких часов. Поэтому в биологическом реакторе в зависимости от содержания в обрабатываемой воде органического субстрата и окисленных форм азота следует перераспределять объемы аэробных и аноксидных зон, не изменяя габаритные размеры самого сооружения. При этом не следует забывать, что в аноксидных зонах необходимо обеспечивать интенсивное перемешивание объема жидкости и не допускать донных отложения ила.

Из технологических и экономических соображений наиболее предпочтительным сооружением для одноиловых систем с активным илом являются биореакторы с эрлифтной системой аэрации. Изменить соотношения объемов аэробных и аноксидных зон в сооружении можно за счет изменения расхода воздуха, подаваемого в эрлифт. Установка эрлифтной системы наиболее оправдана в сооружениях большого заглубления, имеющих малые размеры в плане и значительную глубину.

Модель ASM1 не учитывает наличие аноксидических зон внутри флокулы, в которых процесс денитрификации не тормозится при повышенных концентрациях кислорода в жидкой фазе.

Аэробный рост автотрофной биомассы связан непосредственно с нитрификацией и зависит от концентрации аммония S_{NH} и кислорода S_O , а также от распада автотрофных микроорганизмов X_{AOB} с константой b_2 . Частично аммоний используется для синтеза биомассы. Дифференциальное уравнение, описывающее прирост автотрофов при нитрификации для аммонийокисляющих бактерий (АОБ)

$$\frac{dX_{AOB}}{dt} = \mu_{AOB} \frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \cdot \frac{S_O}{K_{O1} + S_O} X_{AOB} - b_2 X_{AOB}, \quad (3)$$

для нитритокисляющих бактерий (НОБ):

$$\frac{dX_{\text{НОБ}}}{dt} = \mu_{\text{НОБ}} \frac{S_{\text{NO}}}{K_{\text{NO}} + S_{\text{NO}}} \cdot \frac{S_{\text{O}}}{K_{\text{O}_2} + S_{\text{O}}} X_{\text{НОБ}} - b_2 X_{\text{НОБ}} \quad (4)$$

У этих групп нитрифицирующих микроорганизмов различное сродство к кислороду, которое оценивается константой полунасыщения O_2 . Значение K_{O_1} для АОБ равно 0,3 мг/дм³, а K_{O_2} для НОБ равно 1,2 мг/дм³ [4]. Это означает, что при одной и той же концентрации кислорода прирост АОБ в четыре раза превышает прирост НОБ. Исследованиями установлено [5], что малые концентрации кислорода благоприятствуют росту аммонийоокисляющих бактерий и частично ингибируют рост нитрифицирующих бактерий. Наличие нитритов и аммония (при отсутствии ингибирования) способствуют развитию анаммокс-бактерий, для которых нитрит является акцептором электронов.

Прирост анаммокс-бактерий можно выразить дифференциальным уравнением:

$$\frac{dX_{\text{Анам}}}{dt} = \mu_{\text{Анам}} \frac{S_{\text{NH}}}{K_{\text{NH}} + S_{\text{NH}}} \cdot \frac{S_{\text{NO}}}{K_{\text{NO}} + S_{\text{NO}}} \cdot \frac{K_{\text{OH}}}{K_{\text{OH}} + S_{\text{O}}} X_{\text{Анам}} - b_A X_{\text{Анам}} \quad (5)$$

Лимитирование кислородом S_{O} обеспечивает максимальный прирост анаммокс-бактерий. В случае относительного избытка кислорода получают развитие нитритоокисляющие бактерии, которые накопленный нитрит переводят в нитрат, снижая рост анаммокс-бактерий. Оптимальный рост нитрифицирующих АОБ и анаммокс-бактерий, а следовательно, и эффективность удаления соединений азота, зависит от соотношения концентраций аммония, нитритов и кислорода.

ВЫВОД

Рекомендуется для аналитического описания процессов одноилловых систем использовать «Модель Активного Ила № 1» (ASM1), которая учитывает особенности роста аэробных гетеротрофных, нитрифицирующих, денитрифицирующих микроорганизмов, а также анаммокс-бактерий при очистке сточных вод.

Произведен численный анализ влияния кислорода на прирост гетеротрофных аэробных и денитрифицирующих микроорганизмов. Максимальному приросту денитрифицирующих микроорганизмов соответствует концентрация кислорода 0...1 мг/дм³. При концентрации кислорода равной нулю рост аэробных микроорганизмов отсутствует.

Расчетом показано, что для одновременного роста аэробных гетеротрофных и денитрифицирующих микроорганизмов концентрацию кислорода нужно поддерживать 0,29 мг/дм³, хотя при этом скорости обоих процессов уменьшаются в два раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев, С. В. Биохимические процессы в очистке сточных вод [Текст] / С. В. Яковлев, С. В. Карюхина. – М.: Стройиздат, 1980. – 200 с.
2. Варфоломеев, С. Д. Биотехнология. Кинетические основы микробиологических процессов [Текст]: Учебное пособие / С. Д. Варфоломеев, С. В. Калужный. – М.: Высш. школа, 1990. – 296 с.
3. Jeppsson, U. Modelling aspects of wastewater treatment processes [Текст]: Ph.D. thesis / Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund Institute of Technology, U. Jeppsson. – Sweden, 1996. – 428 p.
4. Henze, Mogens. Activated Sludge Model: No. 2 [Текст] / Mogens Henze. – London: IWA Publishing, 1995. – 36 p. – ISBN 1-900222-00-0.
5. Activated Sludge Model No. 3 [Текст] / W. Gujer, M. Henze, T. Mino, Van Loosdrecht M. // Water Science and Technology. – 1999. – 39(1). – P. 183–193.

Получено 09.10.2013

В. І. НЕЗДОЙМІНОВ КІНЕТИЧНІ МОДЕЛІ ОДНОМУЛОВИХ БІОЛОГІЧНИХ СИСТЕМ З ОКИСЛЕННЯМ ВУГЛЕЦЮ, НІТРИФІКАЦІЇ ТА ДЕНІТРИФІКАЦІЇ Донбаська національна академія будівництва і архітектури

Запропоновано моделі для спрощеного опису процесів одномулових біологічних систем з окисленням вуглецю, нитрифікації і денітрифікації при спільному культивуванні гетеротрофних і автотрофні організмів активного мулу при очищенні стічних вод, що містять органічний субстрат і сполуки азоту.
нітрифікація, денітрифікація, автотрофні і гетеротрофні мікроорганізми, анаммокс-процес

VIKTOR NEZDOYMINOV
KINETIC MODELS OF BIOLOGICAL SYSTEMS WITH THE OXIDATION OF
CARBON, NITRIFICATION AND DENITRIFICATION

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

The models to describe the processes biological systems with carbon oxidation, nitrification and denitrification when co-cultured heterotrophic and autotrophic organisms in activated sludge wastewater containing organic substrate and nitrogen compounds have been suggested.

nitrification, denitrification, autotrophic and heterotrophic microorganisms anammox – process

Нездойминов Віктор Іванович – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри водопостачання, водовідведення та охорони водних ресурсів Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: біологічна очистка стічних вод.

Нездойминов Виктор Иванович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой водоснабжения, водотведения и охраны водных ресурсов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: биологическая очистка сточных вод.

Nezdoyminov Viktor – PhD, Associate Professor, Head of Department of Water Supply, Sanitation and Water Conservation, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: biological treatment of wastewater.