

Анализ влияния внешних факторов на процессы биологической очистки

О. И. Брикова¹, С. Е. Душин²

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

¹kapulinaolga@gmail.com, ²dushins@yandex.ru

Аннотация. Существующие модели биоочистки не учитывают влияния внешних факторов, поэтому цель работы – исследование влияния температуры и pH на процессы биологической очистки сточных вод. Решаемые задачи заключаются в анализе влияния температуры внешней среды на поведение моделей нитрификации и денитрификации. В результате исследований найдены оптимальные условия для развития биоценоза активного ила, которые могут быть положены в основу создания математической модели типа ASM.

Ключевые слова: биологическая очистка; активный ил; нитрификация; денитрификация; математическое моделирование; температура

I. ВВЕДЕНИЕ

Расширение населенных пунктов, развитие промышленного и сельскохозяйственного производства приводит к увеличению потребности в использовании питьевой, промышленной и технической воды. В связи с этим возрастает потребность в улучшении существующих методов и технологий очистки сточных вод или в разработке новых. Метод биологической очистки активным илом относится к числу наиболее перспективных и эффективных. В основе данного метода лежит способность микроорганизмов активного ила использовать субстрат в качестве источника питания. В 1987 г. группой исследователей во главе с Могенсом Хенце была предложена модель для систем очистки сточных вод, названная ASM1. Она стала ядром для разработки многочисленных моделей и их модификаций, послужила мотивацией для дальнейших исследований, а также способствовала созданию единой системы обозначений в области моделирования очистки сточных вод. Модель основана на базовых моделях Герберта и Моно, т. е. описывает процессы роста и распада бактерий-нитрификаторов и денитрификаторов. Кроме того, модель включает математическое описание процесса окисления, изменения щелочности, а также гидролиза органического вещества (разложения органического вещества в воде с образованием новых соединений) и аммонификации (гниение). Авторами модели выделен процесс нитрификации и денитрификации из ASM1, что позволило использовать только часть уравнений в модифицированном виде. Бактерии-автотрофы обеспечивают процесс нитрификации при наличии кислорода, в результате чего аммонийный азот окисляется до нитратного. Процесс денитрификации обусловлен

действием бактерий-гетеротрофов, которые в бескислородных условиях удаляют нитратный азот, преобразуя его в газообразный.

II. МОДЕЛЬ НИТРИФИКАЦИИ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

Одними из основных загрязнителей сточных вод являются соединения азота. К ним относятся аммонийный азот, нитриты и нитраты. Аммонийный азот удаляется из воды благодаря процессу нитрификации в результате деятельности бактерий-нитрификаторов. Нитрификация происходит повсеместно в естественной среде, где развиваются нитрифицирующие бактерии. При биологической очистке в биореакторе-нитрификаторе создается искусственный биоценоз из группы бактерий-автотрофов – организмов, способных синтезировать органические вещества из неорганических. Процесс состоит из двух этапов. Вначале аммонийный азот окисляется кислородом до нитрита, затем нитрит окисляется до нитратного азота. На каждом этапе процесс подвергается влиянию определенной группы бактерий-нитрификаторов. В рамках данного исследования преобразование аммонийного азота в нитрат рассматривается без промежуточного состояния нитрита. При этом полагается, что процесс денитрификации отсутствует в изучаемом технологическом объеме. Также предполагается, что во входном потоке присутствуют только аммонийный и нитратный растворимый азот. Основные процессы, сопровождающие нитрификацию, величины (реагенты), участвующие в реакции, их взаимное влияние характеризуются концептуальной моделью нитрификации, которая может быть представлена в виде схемы, приведенной рис. 1.

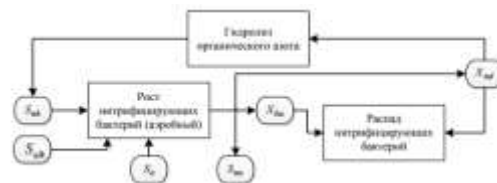


Рис. 1. Концептуальная схема нитрификации

Процессы, вписанные на схеме в прямоугольники, связываются между собой через концентрации реагентов, изображаемые в виде овалов. Стрелка, направленная от процесса (прямоугольник) к концентрации реагента (овал), означает увеличение данной концентрации в результате

этого процесса. Стрелка, идущая от концентрации реагента к процессу, отвечает снижению данной концентрации. Концентрации растворимых веществ обозначаются символом S , взвешенных – X .

Математическая модель нитрификации с учетом влияния температурного фактора представлена следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dX_{ba}}{dt} &= -\frac{dX_{ba}}{T} + (\mu_{ma}^{20^\circ C} \exp^{\gamma(\theta-20)} \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} - b_a) X_{ba}; \\ \frac{dS_{nh}}{dt} &= \frac{S_{nh}^{bx} - S_{nh}}{T} - \left(\frac{1}{Y_a} + i_{xb} \right) \mu_{ma}^{20^\circ C} \exp^{\gamma(\theta-20)} \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} X_{ba} + \\ &+ k_h X_{nd}; \\ \frac{dS_{no}}{dt} &= \frac{S_{no}^{bx} - S_{no}}{T} + \frac{1}{Y_a} \mu_{ma}^{20^\circ C} \exp^{\gamma(\theta-20)} \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} X_{ba}; \\ \frac{dS_o}{dt} &= \frac{S_o^{bx} - S_o}{T} - \left(\frac{4,57 - Y_a}{Y_a} \right) \mu_{ma}^{20^\circ C} \exp^{\gamma(\theta-20)} \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} X_{ba}; \\ \frac{dX_{nd}}{dt} &= -\frac{X_{nd}}{T} + i_{xb} (\mu_{ma}^{20^\circ C} \exp^{\gamma(\theta-20)} \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} - b_a) - k_h X_{nd}; \\ \frac{dS_{alk}}{dt} &= \frac{S_{alk}^{bx} - S_{alk}}{T} - \left(\frac{1}{7Y_a} + \frac{i_{xb}}{14} \right) \mu_{ma}^{20^\circ C} \exp^{\gamma(\theta-20)} \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} X_{ba}; \end{aligned}$$

В таблице приведены наименование, обозначения и единицы измерения веществ и параметров участвующих в процессе нитрификации для принятой модели.

ТАБЛИЦА I НАИМЕНОВАНИЕ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ МОДЕЛИ НИТРИФИКАЦИИ

Наименование величин и параметров	Обозначение	Единицы измерения
Концентрация бактерий-нитрификаторов	X_{ba}	г ХПК/м ³
Концентрация взвешенного органического медленного разлагаемого азота	X_{nd}	г N/м ³
Концентрация аммонийного азота	S_{nh}	г NH ₄ ⁺ /м ³
Концентрация нитратного азота	S_{no}	г NO ₃ ⁻ /м ³
Концентрация растворенного кислорода	S_o	г NO ₂ /м ³
Щелочность	S_{alk}	экв/м ³
Константа насыщения по кислороду для автотрофов	K_{oa}	г O ₂ /м ³
Константа насыщения по аммонии при нитрификации	K_{nh}	г NH ₄ ⁺ /м ³
Фракция азота в биомассе активного ила	i_{xb}	г Nобш/г ХПК
Константа распада нитрифицирующих бактерий	b_a	сут-1
Максимальный коэффициент прироста биомассы для нитрифицирующих бактерий	Y_a	г ХПК/г N
Константа гидролиза в реакции первого порядка	k_h	сут-1

Наименование величин и параметров	Обозначение	Единицы измерения
Максимальная удельная скорость роста автотрофов при 20°C	$\mu_{ma}^{20^\circ C}$	сут-1
Температурный коэффициент	γ	-
Температура среды	θ	°C

Для исследования влияния температуры внешней среды на процессы биологической очистки были приняты температурные диапазоны, приведенные в табл. 2.

ТАБЛИЦА II ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ

№ температурного режима	Возрастание температуры θ	Убывание температуры θ
1	От 5°C до 15°C	До 15°C
2	От 10°C до 20°C	До 10°C
3	От 10°C до 30°C	До 10°C
4	От 20°C до 30°C	До 20°C
5	От 20°C до 40°C	До 20°C

В результате компьютерного моделирования были получены графики в соответствии с рис. 3 и 4.

Как видно из полученных графиков, высокотемпературный режим 5 способствует наилучшему росту бактерий-нитрификаторов и соответственно уменьшению концентраций кислорода, нитратного и аммонийного азота и щелочности. Взвешенный органический азот растет в результате роста нитрификаторов и снижается при более низких температурных режимах.

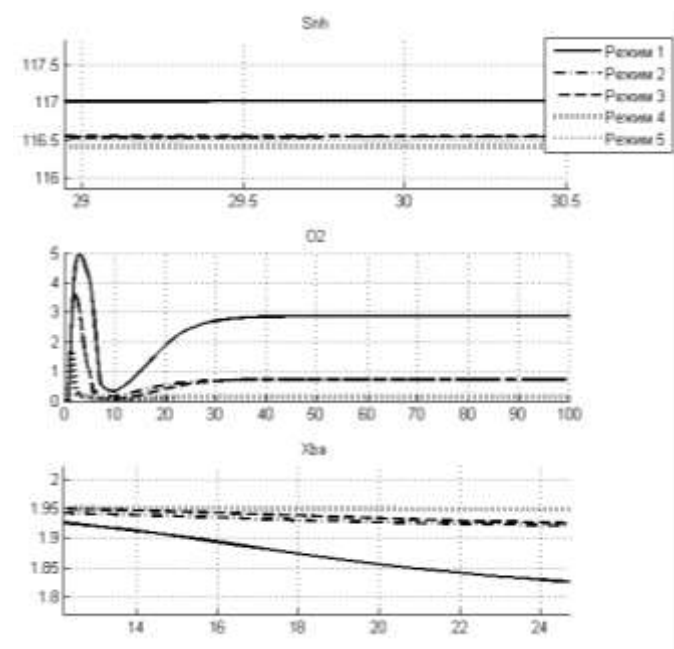


Рис. 2. Графики результатов моделирования влияния температуры на концентрацию аммонийного азота, бактерий-нитрификаторов и кислорода

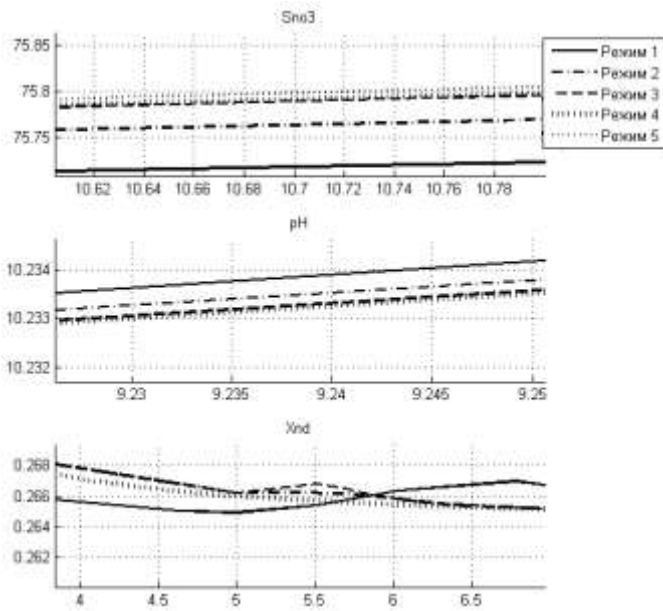


Рис. 3. Графики результатов моделирования влияния температуры на щелочность, концентрацию взвешенного органического медленного разлагаемого азота, концентрацию нитратного азота

Управление процессом нитрификации в свою очередь осуществляется при помощи подачи кислорода. Однако данное исследование также показало зависимость популяции бактерий-нитрификаторов от температуры.

III. МОДЕЛЬ ДЕНИТРИФИКАЦИИ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФАКТОРА

Денитрификация – это микробиологический процесс превращения нитрата в атмосферный азот в результате действия бактерий. Процесс протекает в условиях отсутствия кислорода, причем окисляющим элементом является нитрат. Такие условия принято называть анаэробическими. В случае наличия кислорода денитрифицирующие бактерии преимущественно используют его как окислитель. При рассмотрении модели денитрификации предполагается, что процесс нитрификации отсутствует в рассматриваемом объеме. Также полагается, что во входном потоке присутствуют только аммонийный и нитратный растворимый азот. В результате детального изучения процесса денитрификации получена концептуальная модель в виде схемы (рис. 4).



Рис. 4. Концептуальная схема процесса денитрификации

Эта схема, как и схема модели нитрификации, позволяет проследить основные реакции данного процесса

и взаимное влияние отдельных компонент друг на друга. Стрелки на схеме носят тот же смысл, что и для концептуальной модели нитрификации.

Принятые для модели денитрификации наименования величин, а также их обозначения и единицы измерения сведены в табл. 3. В соответствии с приведенной концептуальной схемой ММ процессов биореактора-денитрификатора с учетом влияния температуры записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dX_{bh}}{dt} &= -\frac{dX_{bh}}{T} + (\mu_{bh}^{20^\circ\text{C}} \exp^{\gamma(\theta-20)} \eta_g \frac{S_s}{S_s + K_s} \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}} - \\ &\quad - b_h) X_{bh}; \\ \frac{dS_{nh}}{dt} &= \frac{S_{nh}^{BX} - S_{nh}}{T} + (-i_{xi} \mu_{bh}^{20^\circ\text{C}} \exp^{\gamma(\theta-20)} \eta_g \frac{S_s}{S_s + K_s} \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \\ &\quad \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}} + k_a S_{nd}) X_{bh}; \\ \frac{dS_{no}}{dt} &= \frac{S_{no}^{BX} - S_{no}}{T} - \frac{1 - Y_h}{2,86 Y_h} \mu_{bh}^{20^\circ\text{C}} \exp^{\gamma(\theta-20)} \eta_g \frac{S_s}{S_s + K_s} \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \\ &\quad \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}} X_{bh}; \\ \frac{dS_s}{dt} &= \frac{S_s^{BX} - S_s}{T} - \frac{1}{Y_h} \mu_{bh}^{20^\circ\text{C}} \exp^{\gamma(\theta-20)} \eta_g \frac{S_s}{S_s + K_s} \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}} \\ &\quad X_{bh} + k_h X_s; \\ \frac{dX_s}{dt} &= -\frac{X_s}{T} + (1 - i_{xi}) b_h X_{bh} - k_h X_s; \\ \frac{dX_{nd}}{dt} &= -\frac{X_{nd}}{T} + i_{xb} b_h X_{bh} - k_h X_{nd}; \\ \frac{dS_{nd}}{dt} &= -\frac{S_{nd}}{T} + k_h X_{nd} - k_a S_{nd} X_{bh}; \\ \frac{dS_{alk}}{dt} &= \frac{S_{alk}^{BX} - S_{alk}}{T} + \left(\frac{1 - Y_h}{14 \cdot 2,86 Y_h} - \frac{i_{xb}}{14} \right) \mu_{bh}^{20^\circ\text{C}} \exp^{\gamma(\theta-20)} \eta_g \frac{S_s}{S_s + K_s} \\ &\quad \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}} X_{bh} + \frac{1}{14} k_a S_{nd} X_{bh}; \\ \frac{dX_i}{dt} &= -\frac{X_i}{T} + i_{xi} b_h X_{bh}. \end{aligned}$$

ТАБЛИЦА III НАИМЕНОВАНИЕ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ МОДЕЛИ ДЕНИТРИФИКАЦИИ

Наименование величин и параметров	Обозначение	Единицы измерения
Концентрация биомассы гетеротрофов	X_{bh}	г ХПК/м ³
Концентрация растворенного органического азота	S_{nd}	г N/м ³
Концентрация взвешенного органического медленно разлагаемого вещества	X_s	г ХПК/м ³
Концентрация растворенного биологически разлагаемого органического вещества	S_s	г ХПК/м ³
Концентрация взвешенного инертного органического вещества	X_i	г ХПК/м ³

Наименование величин и параметров	Обозначение	Единицы измерения
Константа насыщения по кислороду для гетеротрофов	K_{oh}	г O_2 /м ³
Константа полунасыщения по аммонiu при нитрификации	K_{nh}	г NH_4^+ /м ³
Константа полунасыщения по легко разложимому органическому субстрату при денитрификации	K_s	г ХПК/м ³
Константа полунасыщения по нитрату при денитрификации	K_{no}	г NO_3 /м ³
Фракция азота в биомассе активного ила	i_{xb}	г $N_{общ}$ /г ХПК
Фракция азота в массе продуктов распада	i_{xi}	г $N_{общ}$ /г ХПК
Корректирующий фактор скорости роста гетеротрофов в анаэробных условиях	η_g	-
Константа распада денитрифицирующих бактерий	b_h	сут ⁻¹
Максимальный коэффициент прироста биомассы для гетеротрофных бактерий	γ_h	г ХПК/г N
Константа гидролиза в реакции первого порядка	k_h	сут ⁻¹
Скорость аммонификации	k_a	г NH_4^+ /(г N сут ⁻¹)
Максимальная удельная скорость роста автотрофов при 20°C	$\mu_{bh}^{20^\circ C}$	сут ⁻¹
Температурный коэффициент	γ	-
Температура среды	θ	°C

Результаты компьютерного моделирования модели денитрификации с учетом температурного фактора представлены в виде графиков в соответствии с рис. 5.

Из графиков видно, что температурный режим 5, отвечает наибольшим изменениям в процессе денитрификации. Все остальные температурные режимы приводят к схожим изменениям. Повышение температуры до 40 °C приводит к приросту численности бактерий-нитрификаторов, а дальнейшее снижение температуры до первоначального значения уменьшают их концентрацию до значения равного при 20 °C.

Увеличение температуры до 40 °C снижает концентрацию нитратов и аммония, увеличивая щелочность уменьшению концентраций нитратов и аммония и среды. Рост бактерий-денитрификаторов приводит к увеличению концентрации азота. Увеличение температуры, причем именно до 40 °C способствовало снижению концентрации растворенного биологически разлагаемого вещества. В связи с этим, можно сделать вывод, что процесс денитрификации необходимо более подробно рассмотреть в условиях повышенной температуры среды.

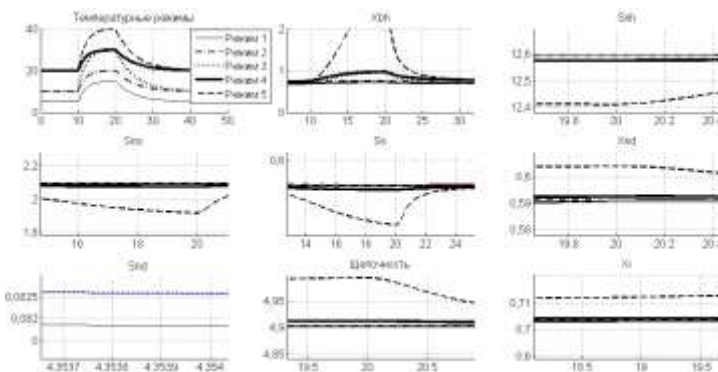


Рис. 5. Результаты компьютерного моделирования процесса денитрификации с учетом параметров внешней среды

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом данного исследования являются математические и компьютерные модели нитрификации и денитрификации с учетом влияния температуры на скорость роста биологического процесса. Одним из главных результатов данного исследования является подтверждение чувствительности процессов нитрификации и денитрификации к температуре среды. Определены температурные режимы, при которых достигаются наилучшие показатели роста бактерий-нитрификаторов и денитрификаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Фролов, Ю.П., Розенберг Г.С. Управление биологическими системами. Надорганизменный уровень. Самара: Самарский университет, 2002. 191 с.
- [2] Грудяева Е.К., Душин С.Е., Шолмова Н.Е. Анализ технологического процесса очистки сточных вод с мембранным биореактором // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. №5. С.48–56.
- [3] Душин С. Е., Красов А.В., Кузьмин Н. Н. Моделирование систем управления: Учеб. пособие для вузов / под ред. С. Е. Душина. М.: Студент, 2012. 348 с.
- [4] Липунов И.Н. Очистка сточных вод в биологических реакторах с биопленкой и активным илом (расчет биофильтров и аэротенков): учебное пособие. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. университет, 2015. 110 с.
- [5] Яковлев, С. В., Карюхина Т. А. Биохимические процессы в очистке сточных вод. Стройиздат, 1980. 200 с.
- [6] Henze, M. Activated Sludge Model No. 1 / M. Henze, C. P. L. Grady, W. Gujer, G. v. R. Marais, T. Matsuo. London: IAWPRC, 1987.
- [7] Henze, M. Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3 / M. Henze, W. Gujer, T. Mino. London, 2000.
- [8] Gujer, W. Activated sludge model no. 3 / W. Gujer, M. Henze, T. Mino [et. al.] // Water Science and Technology. 1999. Vol. 39 Iss.1. P.183–19