

ДИНАМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЯЕМЫХ БИОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Е. К. ГРУДЯЕВА, С. Е. ДУШИН, Н. Н. КУЗЬМИН

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
„ЛЭТИ“ им. В. И. Ульянова (Ленина), 197022, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: lizayo@yandex.ru*

Представлены нелинейные динамические модели процессов нитрификации и денитрификации в биореакторе с соответствующими зонами и управляемым контуром рециркуляции. Модели основаны на модели Хенце ASM1 и описывают микробиологические процессы в активном иле, при которых происходит удаление соединений азота из сточных вод, изменяются щелочность, концентрации растворимого субстрата и инертных соединений, а также популяции бактерий. Приведены графики переходных процессов, полученные в результате компьютерного моделирования.

Ключевые слова: очистка сточных вод, трехзонный биореактор, активный ил, нитрификация, денитрификация, регулирование.

Введение. Процессы биологической очистки стоков активным илом описываются математическими моделями различной степени сложности и адекватности реальным объектам. Потребность в таких моделях обусловлена требованием высокого качества управления технологическим процессом, ограниченным набором средств измерения, а также временными затратами на проведение лабораторных исследований и сложностью качественного анализа проб иловой массы.

Одной из математических моделей, представляющих основные процессы в активном иле, является модель ASM1 [1, 2]. Эта нелинейная модель описывает процессы удаления соединений азота в результате жизнедеятельности групп бактерий. 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.

Типовая технологическая схема очистных сооружений с предвключенной денитрификацией приведена в работе [3]. В ней предусмотрен также рецикл из зоны нитрификации (Н) в зону денитрификации (Д). Недостаток схемы состоит в том, что кислород из зоны Н поступает в зону Д, препятствуя эффективному удалению нитратов. В схеме, представленной на рис. 1, учитывается этот недостаток, поскольку рецикл направлен из последующей зоны (З), в которой кислород отсутствует.

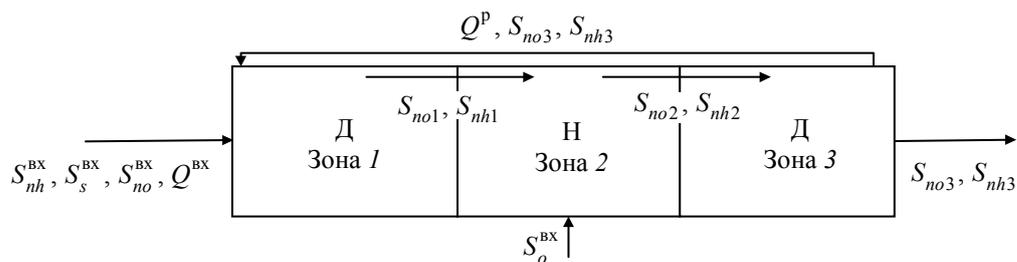


Рис. 1

На рисунке приняты следующие обозначения*: Q^{BX} — расход сточных вод на входе биореактора; Q^P — расход рециркуляционного потока; S_o^{BX} — концентрация растворенного кислорода на входе в реактор; S_{nhi}, S_{noi} — концентрации соответственно аммонийного и нитратного азота в i -й зоне реактора, $i=1, 2, 3$; S_s^{BX} — концентрация легко биологически разлагаемого вещества.

Анализ моделей процессов нитрификации и денитрификации. Как показали исследования [4], математические модели процессов нитрификации и денитрификации характеризуются тремя состояниями равновесия, одно из которых физически неосуществимо. В зависимости от значений входных концентраций субстратов и кислорода, а также времени нахождения в зонах реактора модели переходят в состояние равновесия: точку вымывания ила из реактора или точку роста популяции (у каждой модели — собственная особая точка). При этом точка роста может быть как устойчивым узлом, так и устойчивым фокусом. Также в работе [4] для модели денитрификации определены наиболее эффективные, относительно очистки, интервалы времени реакции и значения входных концентраций субстратов.

Управление подачей кислорода (при нитрификации) и входным расходом в случае обедненных стоков позволяет сохранять популяцию бактерий без вымывания их из реактора, а в случае залповых загрязнений должно обеспечивать значения концентраций загрязнений на выходе биореактора в пределах установленных норм.

В зоне нитрификации управление концентрацией растворенного кислорода ограничивается фиксированной температурой воды, причем при низкой концентрации аммония во входном потоке посредством увеличения подачи кислорода можно более эффективно удалять загрязнения, чем при средней или высокой концентрации. Существует предельно допустимая концентрация растворенного кислорода для удаления нитратов.

Постановка задачи и моделирование управляемых процессов. На сегодняшний день для каждой субстанции загрязнения при технологическом расчете системы очистки используются фиксированные средние концентрации загрязнений. На основе этих данных рассчитываются конструктивные параметры реактора и значение входного расхода. Проведенные исследования [5—7] для управляемых моделей многозонного реактора с контуром рециркуляции и подачей кислорода показали результаты на порядок хуже, чем требуется по российским нормам [8].

Моделирование технологического процесса проводилось при входных значениях концентраций загрязнений, усредненных по 28 объектам очистки. Были определены средние и максимальные значения концентраций загрязнений по аммоний, нитратам и легко биологически разлагаемому веществу. Объем всех зон принимался одинаковым и равным 100 м^3 . Расходы жидкости на входе реактора и в контуре рециркуляции фиксированы. Поскольку при подаче на вход реактора „средних“ загрязнений получаемая на выходе концентрация аммония выше установленных норм, требуется обеспечить эффективное его удаление из системы.

Ставится задача разработать универсальную систему регулирования для установок биологической очистки стоков с широким диапазоном концентраций загрязнителей в составе исходной воды, что позволит обеспечить концентрации загрязнителей на выходе в пределах допустимых норм.

Предлагаемая система регулирования включает регуляторы расхода и концентраций. Один регулятор предназначен для управления расходом при рецикле и учитывает средне-взвешенные ошибки регулирования по концентрациям аммония и нитратов; другой регулятор

* В настоящей статье используются обозначения, принятые в работах [1, 2].

управляет входной концентрацией кислорода с учетом ошибки концентрации аммония. Зависимость концентрации аммония от расхода кислорода не учитывалась.

При разработке математической модели принимались следующие ограничения и допущения:

- зоны биореактора характеризуются идеальным перемешиванием иловой массы;
- состав активного ила образован нитрифицирующими и денитрифицирующими бактериями;
- температура в аппарате фиксирована и равна 20 °С;
- на вход биореактора поступают аммонийный азот, нитратный азот, растворенное биологически разлагаемое органическое вещество; входные стоки также характеризуются щелочностью.

Модель управляемого трехзонного биореактора с подачей кислорода во вторую зону представлена системой из трех групп уравнений — по 11 уравнений в каждой группе (всего 33 уравнения) [1, 2]:

$$\frac{dX_{ba(i)}}{dt} = \rho \frac{U^P}{V_i} X_{ba3} - \frac{Q^{BX} + U^P}{V_i} (X_{ba(i)} - X_{ba(i-1)}) + r_{ba}(S_{nh(i)}, S_{o(i)}, X_{ba(i)});$$

$$\frac{dX_{bh(i)}}{dt} = \rho \frac{U^P}{V_i} X_{bh3} - \frac{Q^{BX} + U^P}{V_i} (X_{bh(i)} - X_{bh(i-1)}) + r_{bh}(S_{no(i)}, S_{s(i)}, S_{o(i)}, X_{bh(i)});$$

$$\begin{aligned} \frac{dS_{nh(i)}}{dt} = \rho \left(\frac{Q^{BX}}{V_i} S_{nh}^{BX} + \frac{U^P}{V_i} S_{nh3} \right) - \frac{Q^{BX} + U^P}{V_i} (S_{nh(i)} - S_{nh(i-1)}) + \\ + r_{nh}(S_{nh(i)}, S_{no(i)}, S_{s(i)}, S_{o(i)}, S_{nd(i)}, X_{ba(i)}, X_{bh(i)}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dS_{no(i)}}{dt} = \rho \left(\frac{Q^{BX}}{V_i} S_{no}^{BX} + \frac{U^P}{V_i} S_{no3} \right) - \frac{Q^{BX} + U^P}{V_i} (S_{no(i)} - S_{no(i-1)}) + \\ + r_{no}(S_{no(i)}, S_{s(i)}, S_{o(i)}, S_{nd(i)}, X_{ba(i)}, X_{bh(i)}); \end{aligned}$$

$$\frac{dS_{s(i)}}{dt} = \rho \left(\frac{Q^{BX}}{V_i} S_s^{BX} + \frac{U^P}{V_i} S_{s3} \right) - \frac{Q^{BX} + U^P}{V_i} (S_{s(i)} - S_{s(i-1)}) + r_{ss}(S_{no(i)}, S_{s(i)}, S_{o(i)}, X_{bh(i)}, X_{s(i)});$$

$$\begin{aligned} \frac{dS_{o(i)}}{dt} = \rho \frac{Q^P}{V_i} S_{o3} - \frac{Q^{BX} + U^P}{V_i} (S_{o(i)} - S_{o(i-1)}) + v \frac{Q^{BX} + U^P}{V_i} U_o + \\ + r_o(S_{nh(i)}, S_{s(i)}, S_{o(i)}, X_{ba(i)}, X_{bh(i)}); \end{aligned}$$

$$\frac{dX_{s(i)}}{dt} = \rho \frac{U^P}{V_i} X_{s3} - \frac{Q^{BX} + U^P}{V_i} (X_{s(i)} - X_{s(i-1)}) + r_{xs}(S_{no(i)}, S_{o(i)}, X_{ba(i)}, X_{bh(i)}, X_{s(i)});$$

$$\frac{dS_{nd(i)}}{dt} = \rho \frac{U^P}{V_i} S_{nd3} - \frac{Q^{BX} + U^P}{V_i} (S_{nd(i)} - S_{nd(i-1)}) + r_{snd}(S_{no(i)}, S_{o(i)}, S_{nd(i)}, X_{bh(i)}, X_{nd(i)}, X_{s(i)});$$

$$\frac{dX_{nd(i)}}{dt} = \rho \frac{U^P}{V_i} X_{nd3} - \frac{Q^{BX} + U^P}{V_i} (X_{nd(i)} - X_{nd(i-1)}) + r_{xnd}(S_{no(i)}, S_{o(i)}, X_{ba(i)}, X_{bh(i)}, X_{nd(i)}, X_{s(i)});$$

$$\frac{dS_{alk(i)}}{dt} = \rho \frac{U^P}{V_i} S_{alk3} - \frac{Q^{BX} + U^P}{V_i} (S_{alk(i)} - S_{alk(i-1)}) + r_{alk}(S_{nh(i)}, S_{no(i)}, S_{s(i)}, S_{o(i)}, S_{nd(i)}, X_{ba(i)}, X_{bh(i)});$$

$$\frac{dX_{p(i)}}{dt} = \rho \frac{U^P}{V_i} X_{p3} - \frac{Q^{BX} + U^P}{V_i} (X_{p(i)} - X_{p(i-1)}) + r_{xp}(X_{ba(i)}, X_{bh(i)}), \quad i = 1, 2, 3,$$

где

$$\rho = \begin{cases} 1, & i = 1; \\ 0, & i = 2, 3, \end{cases} \quad \nu = \begin{cases} 1, & i = 2; \\ 0, & i = 1, 3, \end{cases} \quad U^P = \begin{cases} C_p, & Q^P > C_p; \\ Q^P, & 0 \leq Q^P \leq C_p; \\ 0, & Q^P < 0, \end{cases} \quad U_o = \begin{cases} C_o(\theta), & S_o^{BX} > C_o; \\ S_o^{BX}, & 0 \leq S_o^{BX} \leq C_o; \\ 0, & S_o^{BX} < 0, \end{cases}$$

при этом если индекс какой-либо переменной концентрации X_i или S_i принимает нулевое значение ($i = 0$), то соответствующая переменная равна нулю ($X_0 = 0, S_0 = 0$); ρ — коэффициент, учитывающий концентрации элементов рециркуляционного потока и их концентрации во входном потоке; ν — коэффициент, учитывающий концентрации растворенного кислорода, подаваемого в зону 2 (нитрификации); r — скорости изменения концентраций в результате химических реакций, представляющие собой нелинейные функции концентраций; U^P — сигнал управления расходом при рецикле; U_o — сигнал управления концентрацией кислорода; C_p, C_o — ограничения сверху для управляющих сигналов U^P и U_o ; θ — температура иловой смеси в реакторе; V_i — объем i -й зоны; концентрации аммонийного S_{nh} и нитратного S_{no} азота являются регулируемыми на выходе переменными.

На рис. 2 приведены графики переходных процессов концентраций аммонийного и нитратного азота на выходах двух- и трехзонного реакторов (кривые 1 и 2 соответственно) равного объема при одинаковых постоянных воздействиях на входе. Как видно из графиков, трехзонный реактор при одном и том же расходе входного потока обеспечивает лучшую очистку от соединений азота. По нитратному азоту отклонение переходного процесса от установившегося значения меньше и время установления также меньше.

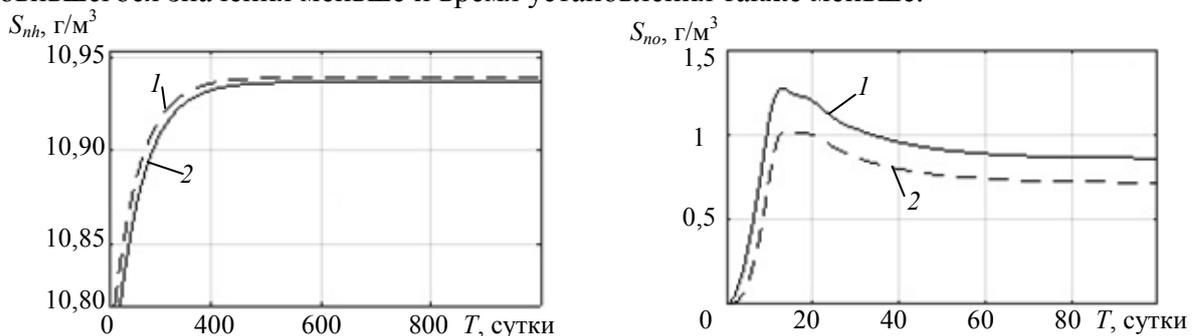


Рис. 2

На рис. 3 представлены графики концентраций аммонийного и нитратного азота на выходе трехзонного реактора с регулируемым рециклом из зоны нитрификации и регулируемой концентрацией растворенного кислорода в этой зоне. Переходные процессы получены при постоянном уровне подачи „средних“ загрязнений (кривая 1) и залповой подаче в течение 5 дней максимальных загрязнений в состоянии равновесия на 200-е сутки (кривая 2), а также при залпе максимальных загрязнений в начале процесса (кривая 3).

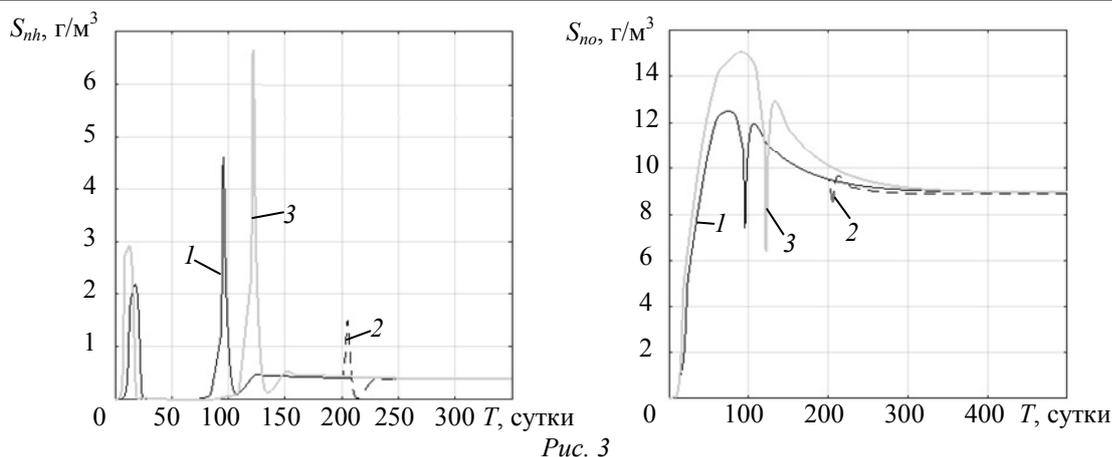


Рис. 3

Заключение. Разработанные динамические математические модели управляемых процессов нитрификации и денитрификации для трехзонного биореактора могут быть положены в основу построения установок биологической очистки сточных вод. Проведенные исследования с использованием предложенных моделей показали, что регулирование расхода рециркуляционного потока и концентрации растворенного кислорода в зоне нитрификации при фиксированном входном расходе позволяет обеспечить допустимые концентрации загрязнений на выходе при „средних“ концентрациях на входе. Система регулирования способна справляться с залповыми нагрузками, подаваемыми в различные моменты времени. Трехзонный реактор обеспечивает лучшую очистку, чем двухзонный за счет снижения негативного влияния кислорода при рецикле на денитрификацию. Таким образом, за счет предлагаемой схемы регулирования система может обеспечивать необходимое качество очистки при сравнительно широком диапазоне входных концентраций загрязнений. Это позволяет проектировать реакторы меньшего объема и, следовательно, снизить стоимость очистной установки.

В ходе исследования не учитывалось изменение температуры в реакторе и ее влияние на кинетические параметры системы и степень ограничения регулирования кислорода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Henze M., Grady C. P. L., Gujer W., Marais G. v. R., Matsuo T. Activated Sludge Model No. 1: Scientific and Technical Report. London: IAWPRC, 1987. 37 p.
2. Хенце М., Армозс П., Ля-Кур-Янсен Й., Арван Э. Очистка сточных вод. М.: Мир, 2009. 480 с.
3. Большаков Н. Ю. Биотехнологии на страже экосистемы // СтройПРОФИ. 2013. № 2(11). С. 54—56.
4. Грудяева Е. К., Душин С. Е. Анализ динамики процесса нитрификации в модели биологической очистки сточных вод ASM1 // Изв. СПбГЭТУ „ЛЭТИ“. 2015. Вып. 1. С. 12—17.
5. Гордеева Ю. Л., Гордеев Л. С. Математическая модель непрерывного процесса в биореакторе с рециклом субстрата и биомассы // Вестник АГТУ. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. № 2. С. 9—18.
6. Weijers S. R. Modelling, Identification and Control of Activated Sludge Plants for Nitrogen Removal. Eindhoven: Techn. Univ. Eindhoven, 2000. 235 p.
7. Stahl T., Duffy G., Kestel S., Gray M. Dissolved oxygen control based in real-time oxygen uptake rate estimation // Florida Water Resources Journal. 2013. N 4. P. 50—53.
8. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения. М.: ОАО „ЦПП“, 2012. 97 с.

Сведения об авторах

- Елизавета Камаловна Грудяева** — аспирант; СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, кафедра автоматки и процессов управления; E-mail: lizayo@yandex.ru
- Сергей Евгеньевич Душин** — д-р техн. наук, профессор; СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, кафедра автоматки и процессов управления; E-mail: dushins@yandex.ru

Николай Николаевич Кузьмин — канд. техн. наук, профессор; СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, кафедра автоматике и процессов управления; E-mail: nnkuzmin@etu.ru

Рекомендована кафедрой
автоматики и процессов управления

Поступила в редакцию
22.04.15 г.

Ссылка для цитирования: Грудяева Е. К., Душин С. Е., Кузьмин Н. Н. Динамические модели управляемых биохимических процессов очистки сточных вод // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 9. С. 732—737.

**DYNAMIC MODELS OF THE CONTROLLED BIOCHEMICAL PROCESSES
OF WASTEWATER TREATMENT**

E. K. Grudyaeva, S. E. Dushin, N. N. Kuzmin

*Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", 197022, Saint Petersburg, Russia
E-mail: lizayo@yandex.ru*

Nonlinear dynamic models of nitrification and denitrification processes in the bioreactor with the corresponding zones and the controlled recirculation contour are presented. The models are based on ASM1 model proposed by Henze to describe the microbiological processes in active sludge that involve removal of nitrogen compounds from wastewater, change of alkalinity, concentration of soluble substratum and inert compounds, as well as bacteria populations. Graphs of transient processes obtained with computer modeling are demonstrated.

Keywords: wastewater treatment, three-zone bioreactor, active sludge, nitrification, denitrification, control.

Data on authors

- Elizaveta K. Grudyaeva** — Post-Graduate Student; ETU "LETI", Department of Automation and Control Processes; E-mail: lizayo@yandex.ru
- Sergey E. Dushin** — Dr. Sci., Professor; ETU "LETI", Department of Automation and Control Processes; E-mail: dushins@yandex.ru
- Nikolay N. Kuzmin** — PhD, Professor; ETU "LETI", Department of Automation and Control Processes; E-mail: nnkuzmin@etu.ru

For citation: Grudyaeva E. K., Dushin S. E., Kuzmin N. N. Dynamic models of the controlled biochemical processes of wastewater treatment // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 9. P. 732—737 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-9-732-737