

О.И. Брикова, С.Е. Душин**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕССЫ
БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ В МОДЕЛЯХ НИТРИФИКАЦИИ
И ДЕНИТРИФИКАЦИИ**

Существующие модели, описывающие процесс биологической очистки сточных вод не учитывают влияния внешних факторов, таких как температура окружающей среды, pH и т.д. Целью данной работы является исследование влияния температуры окружающей среды на рост и развитие бактерий в процессе нитрификации и денитрификации. Модели нитрификации и денитрификации являются частями полной модели типа ASM1. В данной статье предложены нелинейные математические модели биохимической очистки сточных вод активным илом, построенные на основе динамических моделей нитрификации и денитрификации, с учетом влияния температуры окружающей среды. Приведены концептуальные модели процессов нитрификации и денитрификации, описывающие взаимосвязь компонентов в математической модели. В качестве влияющего внешнего фактора рассматривается изменение температуры окружающей среды. Развитие биоценоза происходит в ограниченном пространстве реактора при определенных технологических ограничениях и допущениях. Для описания зависимости скорости роста микроорганизмов от температуры внешней среды принимается эмпирическое уравнение Вант-Гоффа. Решаемые задачи заключаются в анализе влияния температуры внешней среды на биологические процессы нитрификации и денитрификации. На основе разработанных математических моделей были построены компьютерные модели в среде MATLAB/Simulink. Представлены результаты исследований для пяти различных температурных режимов. Изменение температурного режима осуществляется за счет постепенного увеличения и последующего снижения температуры окружающей среды до заданных значений. Приведены семейства графиков переходных процессов различных показателей при различных температурных режимах. Определены температурные режимы, которые создают наиболее благоприятные условия развития биоценоза бактерий и обеспечивают наиболее эффективную очистку. Представленные результаты моделирования подтверждают чувствительность поведения системы к температурным изменениям, а также необходимость поддержания постоянной температуры в биореакторе. Полученные результаты следует учитывать при построении многорежимной системы управления с целью улучшения показателей качества воды, снижения временных затрат на биологическую очистку и снижения конечной стоимости очистных сооружений.

Биологическая очистка; активный ил; нитрификация; денитрификация; математическое моделирование; температура внешней среды; ASM модели.

O.I. Brikova, S.E. Dushin**THE ANALYSIS OF INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS ON PROCESSES
OF BIOLOGICAL CLEANING IN NITRIFICATION AND DENITRIFICATION
MODELS**

The existing models describing process of a biological sewage disposal do not consider influence of external factors, such as environment temperature, pH etc. The purpose of this article is to study the temperature effect of a surrounding medium on body height and development of bacteria in the course of nitrification and denitrification. Models of nitrification and denitrification are parts of the complete ASM1 model. In this article the non-linear mathematical models of a biochemical sewage disposal by the fissile ooze constructed on the basis of dynamic models of nitrification and denitrification taking into account temperature effect of a surrounding medium are offered. The conceptual models of nitrification and denitrification processes describing interrelation of components in mathematical model are given. As the influencing external factor change of environment temperature is considered. Development of biocenosis occurs in restricted space of the reactor at particular technological restrictions and assumptions. For the description of dependence of growth rate of microorganisms on temperature of the external environment the empirical equation of Vant Hoff is accepted. Solvable tasks consist in the analysis of

temperature effect of the external environment on biological processes of nitrification and denitrification. On the basis of the developed mathematical models computer models in the environment of MATLAB/Simulink have been constructed. Results of studies in five various temperature schedules are presented. Change in a temperature schedule is carried out due to gradual increase and the subsequent decrease in environment temperature to the preset values. Families of schedules of transition phenomenons of various indexes at various temperature schedules are brought. Temperature schedules which create optimum conditions of bacteria biocenosis development are defined and provide the most efficient cleaning. The presented results of model operation confirm sensitivity of behavior of system to temperature changes and also need of maintaining of constant temperature for the bioreactor. The obtained results should be considered at creation of a multimode control system for the purpose of improvement in water quality indexes, decrease in time expenditure on biological cleaning and decrease terminating the cost of treatment facilities.

Biological cleaning; the fissile ooze; nitrifikation; denitrifikation; mathematical model operations; temperature of the external environment; ASM models.

1. Введение. С увеличением численности, развитие промышленного и сельскохозяйственного секторов возникает необходимость разработки новых или усовершенствования существующих методов биологической очистки сточных вод. К числу наиболее перспективных, эффективных и распространенных способов очистки сточных вод является биологический (биохимический) метод удаления загрязняющих веществ активным илом с использованием мембранной технологии. [5] Организмы активного ила преобразуют соединения азота и фосфора до безопасного для окружающей среды состояния. Очищенная таким способом вода предназначена для сброса в водные источники различного назначения (рыбохозяйственные, культурно-бытовые и т.д.) [4].

Одним из важных этапов проектирования систем управления технологическими процессами очистки сточных вод является разработка и исследование адекватных динамических моделей управляемых биохимических процессов. Потребность в математическом моделировании обусловлена сравнительно жесткими требованиями к очистке, ограниченным набором средств измерения, трудностью проведения натуральных экспериментов, а также временными затратами на проведение лабораторных исследований и сложностью качественного анализа проб активного ила. [3] В настоящее время потенциальные возможности математического моделирования не находят достаточного практического применения при создании систем управления технологическими процессами очистных сооружений.

На сегодняшний день в основу большинства систем управления процессами биологической очистки положены модели, в которых не учитываются все особенности взаимодействия микроорганизмов и влияния внешних факторов на их развитие.

В 1987 г. группой исследователей во главе с Могенсом Хенце была предложена модель для систем очистки сточных вод, названная ASM1. [7] 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 аммонификацию (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.

2. 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 био-реакторе-нитрификаторе создается искусственный биоценоз из группы бактерий-автотрофов – организмов, способных синтезировать органические вещества из неорганических [1]. 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 на рис. 1 [2, 6].

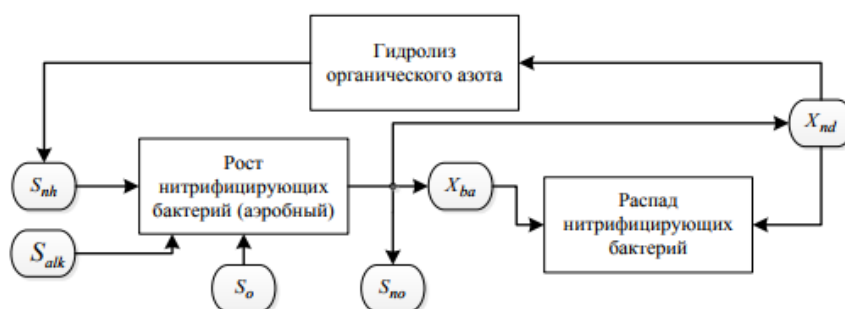


Рис. 1. Концептуальная схема нитрификации

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:

$$\frac{dX_{ba}}{dt} = -\frac{dX_{ba}}{T} + (\mu_{ma}^{20^{\circ}\text{C}} \exp^{\gamma(\theta-20)} \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} - b_a) X_{ba};$$

$$\frac{dS_{nh}}{dt} = \frac{S_{nh}^{bx} - S_{nh}}{T} - \left(\frac{1}{Y_a} + i_{xb} \right) \mu_{ma}^{20^{\circ}\text{C}} \exp^{\gamma(\theta-20)} \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} X_{ba} + k_h X_{nd};$$

$$\frac{dS_{no}}{dt} = \frac{S_{no}^{bx} - S_{no}}{T} + \frac{1}{Y_a} \mu_{ma}^{20^{\circ}\text{C}} \exp^{\gamma(\theta-20)} \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} X_{ba};$$

$$\frac{dS_o}{dt} = \frac{S_o^{bx} - S_o}{T} - \left(\frac{4,57 - Y_a}{Y_a} \right) \mu_{ma}^{20^\circ C} \exp^{\gamma(\theta-20)} \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} X_{ba};$$

$$\frac{dX_{nd}}{dt} = -\frac{X_{nd}}{T} + i_{xb} (\mu_{ma}^{20^\circ C} \exp^{\gamma(\theta-20)} \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} - b_a) - k_h X_{nd};$$

$$\frac{dS_{alk}}{dt} = \frac{S_{alk}^{bx} - S_{alk}}{T} - \left(\frac{1}{7Y_a} + \frac{i_{xb}}{14} \right) \mu_{ma}^{20^\circ C} \exp^{\gamma(\theta-20)} \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} X_{ba};$$

В табл. 1 приведены наименование, обозначения и единицы измерения веществ и параметров участвующих в процессе нитрификации для принятой модели.

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

В результате компьютерного моделирования были получены графики в соответствии с рис. 2.

Таблица 1

Наименование, обозначение и единицы измерения параметров для модели процесса 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 Nобщ/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
Максимальная удельная скорость роста автотрофов при 20°C	$\mu_{ma}^{20^\circ C}$	сут ⁻¹
Температурный коэффициент	γ	-
Температура среды	θ	°C

Таблица 2

Температурные режимы

№ 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

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.

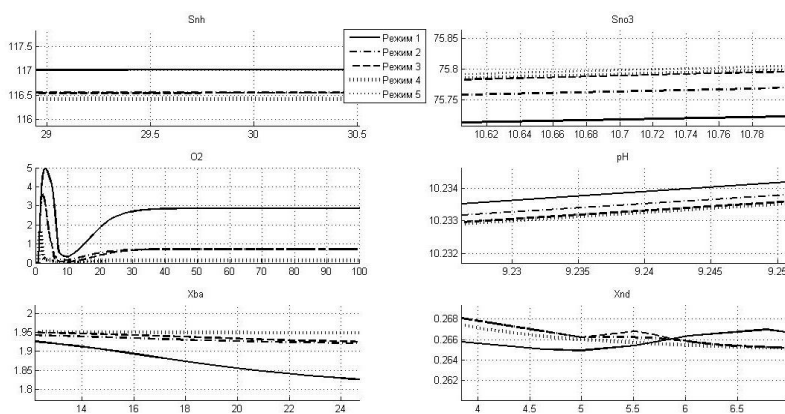


Рис. 2. Графики результатов моделирования влияния температурного фактора на процесс нитрификации

Таким образом температура внешней среды оказывает влияние на концентрацию кислорода в очищаемой воде, за счет которого осуществляется управление процессом нитрификации. Кроме того, изменение температуры также повлияло и на развитие бактерий-нитрификаторов. Тогда можно выдвинуть предположение о возможности управлением процессом нитрификации не только концентрацией кислорода, но температурой среды. Однако для определения наилучших условий необходимо более подробно рассмотреть взаимное влияние этих параметров.

3. 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 анаэробными. 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 [7, 8]. В результате детального изучения процесса денитрификации получена концептуальная модель в виде схемы (рис. 3).

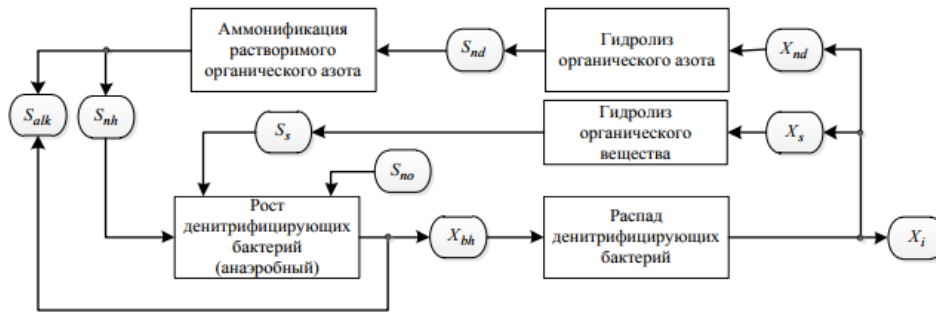


Рис. 3. Концептуальная схема процесса денитрификации

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:

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

Таблица 3

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
Константа насыщения по кислороду для гетеротрофов	K_{oh}	г O ₂ /м ³
Константа полунасыщения по аммоний 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 аноксидных условиях	η_g	-
Константа распада денитрифицирующих бактерий	b_h	сут ⁻¹
Максимальный коэффициент прироста биомассы для гетеротрофных бактерий	Y_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	$\mu_{bh}^{20^\circ\text{C}}$	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. 4.

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

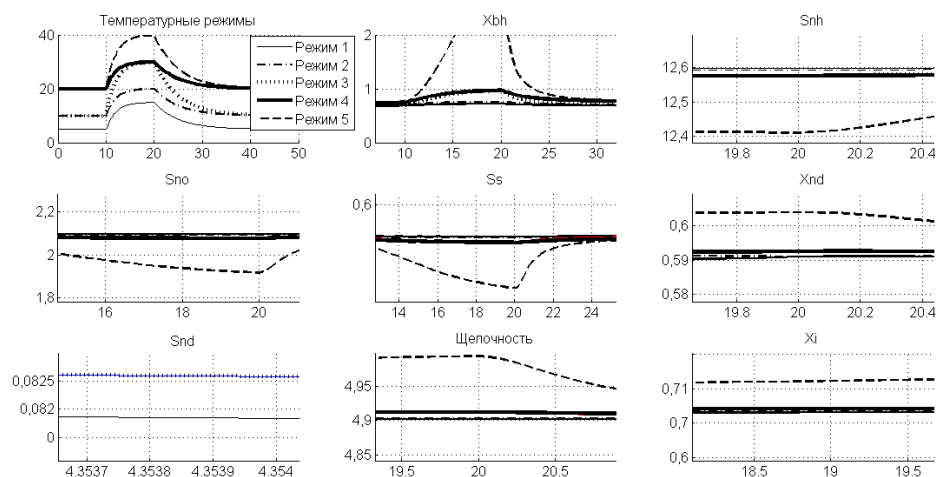


Рис. 4. Результаты компьютерного моделирования процесса денитрификации с учетом параметров внешней среды.

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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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): учеб. пособие. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. университет, 2015. – 110 с.
5. Яковлев С.В., Карюхина Т.А. Биохимические процессы в очистке сточных вод. – М.: Стройиздат, 1980. – 200 с.
6. Henze M., Grady C.P.L., Gujer W., Marais G.v.R., Matsuo T. Activated Sludge Model No. 1. – М.: Henze, – London: IAWPRC, 1987.
7. Henze M., Gujer W., Mino T. Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. – М.: Henze – London, 2000.

8. *Gujer W., Henze M., Mino T. [et. al.]*. Activated sludge model no. 3 // *Water Science and Technology*. – 1999. – Vol. 39, Issue 1. – P. 183-192.
9. *Вавилин В.А., Васильев В.Б.* Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом. – М.: Наука, 1979. – 119 с.
10. *Жмур Н.С.* Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. – М.: АКВАРОС, 2003. – 512 с.
11. *Базыкин А.* Нелинейная динамика взаимодействующих популяций. – М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. – 368 с.
12. *Stricker A., Racault E.Y.* Application of Activated Sludge Model No. 1 to biological treatment of pure winery effluents: case studies // *Water Science and Technology*. IWA Publishing and the authors. – 2005. – Vol. 51, No. 1. – P. 121-127.
13. *Pazl I., Koloimi T.* ASM1 limitations modeling of wastewater treatment process // *Acta Chim. Slov.* – 2001. – No. 48. – P. 625-636.
14. *Petersen B., Gerndy K., Henze M. [et. al.]*. Evaluation of an ASM1 model calibration procedure on a municipal–industrial wastewater treatment plant // *IWA Publishing 2002 Journal of Hydroinformatics*. – 2002. – No. 04. – P. 15-38.
15. *Грудяева Е.К., Душин С.Е.* Анализ динамики процесса нитрификации в модели биологической очистки сточных вод ASM1 // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. – 2015. – № 1. – С. 12-17.
16. *Грудяева Е.К., Душин С.Е., Кузьмин Н.Н.* Динамические модели управляемых биохимических процессов очистки сточных вод // *Известия вузов. Приборостроение*. – 2015. – Т. 58, № 9. – С. 732-737.
17. *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.
18. *Мурачев Е.Г.* Методика построения системы управления технологическим процессом биологической очистки сточных вод на основе гибридных нейронных сетей // *Известия МГТУ «МАМИ»*. – 2009. – № 2 (8). – С. 231-241.
19. *Иванов В.Ф.* Очистка городских сточных вод. – Одесса: ОНТУ ВСНХ УССР, 1929. – 512 с.
20. *Воронов Ю.В., Яковлев С.В.* Водоотведение и чистка сточных вод. – М.: АСВ, 2006. – 704 с.

REFERENCES

1. *Frolov Yu.P., Rozenberg G.S.* Upravlenie biologicheskimi sistemami. Nadorganizmenny uroven' [Management of biological systems. At the level]. Samara: Samarskiy universitet, 2002, 191 p.
2. *Grudyaeva E.K., Dushin S.E., Sholmova N.E.* Analiz tekhnologicheskogo protsessa ochistki stochnykh vod s membrannym bioreaktorom [Analysis of technological process of wastewater treatment with membrane bioreactor], *Izvestiya SPbGETU «LETI»* [Izvestiya SPbGETU «LETI»], 2013, No. 5, pp. 48-56.
3. *Dushin S.E., Krasov A.V., Kuz'min N.N.* Modelirovanie sistem upravleniya: ucheb. posobie dlya vuzov [Modeling of control systems: studies. the allowance for high schools], ed. by S.E. Dushina. Moscow: Student, 2012, 348 p.
4. *Lipunov I.N.* Ochistka stochnykh vod v biologicheskikh reaktorakh s bioplenkoy i aktivnym ilom (raschet biofil'trov i aerotנקov): ucheb. posobie [Wastewater treatment in biological reactors with biofilm and activated sludge (calculation of biofilters and aeration tanks): tutorial]. Ekaterinburg: Ural. gos. lesotekhn. universitet, 2015, 110 p.
5. *Yakovlev S.V., Karyukhina T.A.* Biokhimicheskie protsessy v ochistke stochnykh vod [Biochemical processes in wastewater treatment]. Moscow: Stroyizdat, 1980, 200 p.
6. *Henze M., Grady C.P.L., Gujer W., Marais G.v.R., Matsuo T.* Activated Sludge Model No. 1. Moscow: Henze, London: IAWPRC, 1987.
7. *Henze M., Gujer W., Mino T.* Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. M.: Henze, London, 2000.
8. *Gujer W., Henze M., Mino T. [et. al.]*. Activated sludge model no. 3, *Water Science and Technology*, 1999, Vol. 39, Issue 1, pp. 183-192.

9. Vavilin V.A., Vasil'ev V.B. Matematicheskoe modelirovanie protsessov biologicheskoy ochistki stochnykh vod aktivnym ilom [Mathematical modeling of biological wastewater treatment with activated sludge]. Moscow: Nauka, 1979, 119 p.
10. Zhmur N.S. Tekhnologicheskies i biokhimicheskie protsessy ochistki stochnykh vod na sooruzheniyakh s aerotenkami [Technological and biochemical processes of wastewater treatment at facilities with aeration tanks]. Moscow: AKVAROS, 2003, 512 p.
11. Bazynkin A. Nelineynaya dinamika vzaimodeystvuyushchikh populyatsiy [Nonlinear dynamics of interacting populations]. Moscow, Izhevsk: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2003, 368 p.
12. Stricker A., Racault E.Y. Application of Activated Sludge Model No. 1 to biological treatment of pure winery effluents: case studies, *Water Science and Technology. IWA Publishing and the authors*, 2005, Vol. 51, No. 1, pp. 121-127.
13. Pazl I., Koloini T. ASM1 limitations modeling of wastewater treatment process, *Acta Chim. Slov.*, 2001, No. 48, pp. 625-636.
14. Petersen B., Germaey K., Henze M. [et. al.]. Evaluation of an ASM1 model calibration procedure on a municipal-industrial wastewater treatment plant, *IWA Publishing 2002 Journal of Hydroinformatics*, 2002, No. 04, pp. 15-38.
15. Grudyaeva E.K., Dushin S.E. Analiz dinamiki protsessa nitrifikatsii v modeli biologicheskoy ochistki stochnykh vod ASM1 [Analysis of the dynamics of the nitrification process in the model of biological wastewater treatment ASM1], *Izvestiya SPbGETU «LETI»* [Izvestiya SPbGETU «LETI»], 2015, No. 1, pp. 12-17.
16. Grudyaeva E.K., Dushin S.E., Kuz'min N.N. Dinamicheskie modeli upravlyaemykh biokhimicheskikh protsessov ochistki stochnykh vod [Dynamic models of controlled biochemical processes of wastewater treatment], *Izvestiya vuzov. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2015, Vol. 58, No. 9, pp. 732-737.
17. Gordeeva Yu.L., Gordeev L.S. Matematicheskaya model' nepreryvnogo protsessa v bioreaktore s retsiklom substrata i biomassy [A mathematical model for continuous process in bioreactor by recycling a substrate and a biomass], *Vestnik AGTU. Ser.: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Vestnik of ASTU. Series: Management, computer engineering and Informatics], 2013, No. 2, pp. 9-18.
18. Murachev E.G. Metodika postroyeniya sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessom biologicheskoy ochistki stochnykh vod na osnove gibridnykh neyronnykh setey [A method of constructing a system of process control of biological wastewater treatment based on hybrid neural networks], *Izvestiya MGTU «MAMI»* [Izvestiya MGTU "MAMI"], 2009, No. 2 (8), pp. 231-241.
19. Ivanov V.F. Ochistka gorodskikh stochnykh vod [Municipal wastewater treatment]. Odessa: ONTU VSNKH USSR, 1929, 512 p.
20. Voronov Yu.V., Yakovlev S.V. Vodootvedenie i chistka stochnykh vod [Wastewater and wastewater treatment]. Moscow: ASV, 2006, 704 p.

Статью рекомендовал к опубликованию профессор В.В. Цехановский.

Брикova Ольга Игоревна – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина); e-mail: kapulinaolga@gmail.com; 197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5; тел.: +79990263259; кафедра автоматизации и процессов управления; студент.

Душин Сергей Евгеньевич – e-mail: dushins@yandex.ru; тел.: +79219704631; кафедра автоматизации и процессов управления; д.т.н.; профессор.

Brikova Olga Igorevna – St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI"; e-mail: kapulinaolga@gmail.com; 5, Professor Popov street, St. Petersburg, 197376, Russia; phone: +79990263259; the department of automation and control processes; undergraduate.

Dushin Sergei Evgen'evich – e-mail: dushins@yandex.ru; phone: +79219704631; the department of automation and control processes; dr. of eng. sc.; professor.