

V. S. Melnik, A. V. Goryachev
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

BUILDING OF A GEOGRAPHICALLY DISTRIBUTED COMPUTER SYSTEM AND ASSESSMENT OF ITS RELIABILITY

This article describes the approach to the design of a geographically distributed system, which allows you to increase the resiliency of each independent network infrastructure, minimizing the probability of data loss in a complete system. The purpose of the research is to develop algorithms and mechanisms that allow replication of each node of the network infrastructure, as well as intelligently determine the situation in which each independent link in the system goes into a critical state. When a critical state occurs, that is, a state in which the system link loses its operation, a backup link is put into operation. In the model used, it is proposed to increase the resiliency of a geographically distributed system whereby each of the links acts as an independent unit of a computer system. As a result of the work, an analysis was made of various options for connecting the system, considering the probability of failure of each of the independent links.

Resiliency, reliability, reservation, encryption, video streaming, video encoding

УДК 681.54

О. И. Брикова, С. Е. Душин
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Исследование влияния температуры среды на биологические процессы в моделях типа ASM1

Существующие модели, описывающие процесс биологической очистки, не учитывают влияние внешних факторов, поэтому представляет интерес исследование влияния температуры среды на процессы нитри- и денитрификации. В статье представлены нелинейные математические модели нитрификации и денитрификации с учетом влияния температуры среды. В основу данных моделей положены широкоизвестные модели типа ASM1. Зависимость скорости роста микроорганизмов от температуры описывается уравнением Вант-Гоффа. На основе разработанных математических моделей были построены компьютерные модели в среде MATLAB/Simulink. Решаемые задачи заключаются в анализе влияния температуры внешней среды на поведение моделей нитрификации и денитрификации. Приведены семейства графиков при различных температурных режимах. В результате исследований найдены наилучшие температурные диапазоны для развития биоценоза активного ила, которые могут быть положены в основу создания математической модели типа ASM с учетом температурного фактора.

Биологическая очистка, активный ил, нитрификация, денитрификация, математическое моделирование, температура внешней среды

Развитие городов, промышленности, сельского хозяйства неизменно приводит к необходимости усовершенствования систем очистных сооружений. Метод биологической очистки микроорганизмами активного ила – это один из распространенных и эффективных методов очистки сточных вод [1], [2]. Биоценоз активного ила потребляет субстрат и преобразует его в безопасное для окружающей среды состояние.

Разработка и исследование адекватных динамических моделей управляемых биохимических

процессов – это один из основных этапов проектирования систем управления технологическими процессами очистки сточных вод. Такая необходимость в математическом моделировании в первую очередь связана с жесткими требованиями к очищенной воде, сложностью при проведении экспериментов на реальном объекте, небольшим набором средств измерения и продолжительными лабораторными исследованиями, а также сложностью качественного анализа биоценоза активного ила [3]. На сегодняшний день ма-

тематическое моделирование не используется в полной мере при разработке систем управления биологическими процессами. В основу многих систем управления технологическими процессами в очистных сооружениях положены модели, в которых не учитываются все особенности взаимодействия микроорганизмов и влияния внешних факторов на их развитие.

Модель ASM1, разработанная группой исследователей во главе с Могенсом Хенце, стала одной из наиболее адекватных технологическому процессу биологической очистки, способствовала развитию математического моделирования в области биоочистки, стала основой для создания разных модификаций дальнейших исследований [4]. Модель построена на базовых процессах роста и распада бактерий-нитрификаторов и денитрификаторов, положенных еще в модели Моно и Герберта. Она также включает в себя математическое описание взаимосвязей различных биологических процессов, таких, как окисление, изменения щелочности, разложения органического вещества в воде с образованием новых соединений и аммонификация.

Авторы полной модели ASM1 разделили ее на процесс нитрификации и денитрификации, что дало возможность использовать только часть модифицированных уравнений. Процесс нитрификации обусловлен бактериями-автотрофами, которые при наличии кислорода обеспечивают процесс окисления аммонийного азота до нитратного. Бактерии-гетеротрофы обеспечивают процесс денитрификации в бескислородных условиях, в результате своего развития бактерии-денитрификаторы удаляют нитратный азот, преобразуя его в газообразный.

Модель нитрификации с учетом температуры внешней среды. Соединения азота, содер-

жащиеся в неочищенной воде, – один из основных загрязнителей. В их состав входят такие соединения, как аммонийный азот, нитриты и нитраты. Процесс нитрификации позволяет удалить из воды аммонийный азот. Нитрификация – это естественный биологический процесс, который часто встречается в естественной среде, где развиваются нитрифицирующие бактерии [5]. Для организации процесса нитрификации создается искусственный биоценоз из группы бактерий-автотрофов, синтезирующих органические вещества из неорганических. На первом этапе аммонийный азот окисляется кислородом до нитрита, после чего нитрит окисляется до нитратного азота. Каждый этап обусловлен действием различных групп бактерий-нитрификаторов [6], [7]. В рамках данного исследования сделаны следующие допущения: отсутствует промежуточное состояние – нитрита; отсутствует процесс денитрификации; во входном потоке присутствуют только аммонийный и нитратный растворимый азот [8].

Основные процессы нитрификации описаны концептуальной моделью (рис. 1).

В прямоугольниках указаны протекающие процессы. Концентрации реагентов указаны внутри круга. Процессы связаны между собой через концентрации реагентов. Стрелка, направленная от процесса к концентрации реагента, 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 [8].

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

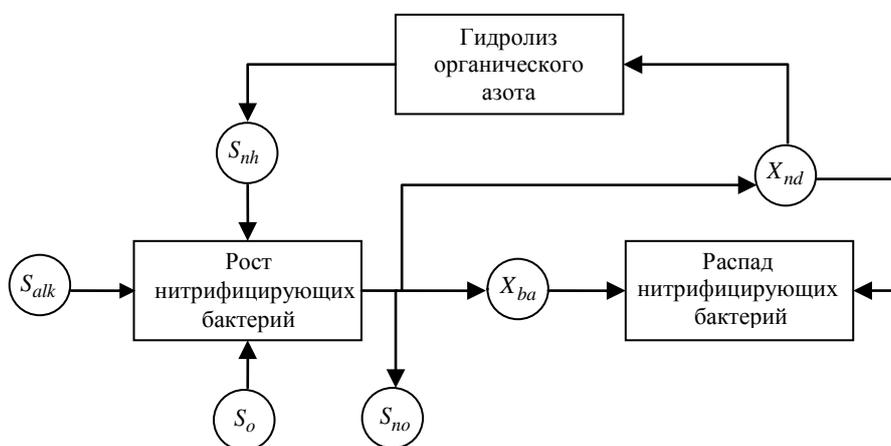


Рис. 1

Таблица 1

Величина (параметр)	Обозначение	Единица измерения
Концентрация бактерий-нитрификаторов	X_{ba}	г ХПК/м ³
Концентрация взвешенного органического медленноразлагаемого азота	X_{nd}	г N/м ³
Концентрация аммонийного азота	S_{nh}	г NH ₄ ⁺ /м ³
Концентрация аммонийного азота входная	S_{nh}^{BX}	г NH ₄ ⁺ /м ³
Концентрация нитратного азота	S_{no}	г NO ₃ ⁻ /м ³
Концентрация нитратного азота входная	S_{no}^{BX}	г NO ₃ ⁻ /м ³
Концентрация растворенного кислорода	S_o	г NO ₂ /м ³
Концентрация растворенного кислорода входная	S_o^{BX}	г NO ₂ /м ³
Щелочность	S_{alk}	экв/м ³
Щелочность входная	S_{alk}^{BX}	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 Nobш/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

$$\begin{aligned} \frac{dX_{ba}}{dt} &= -\frac{X_{ba}}{T} + \\ &+ \left[\mu_{ma}^{20^\circ C} \exp^{\gamma(\theta-20)} \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} - b_a \right] X_{ba}; \\ \frac{dS_{nh}}{dt} &= \frac{S_{nh}^{BX} - S_{nh}}{T} - \left(\frac{1}{Y_a} + i_{xb} \right) \mu_{ma}^{20^\circ C} \times \\ &\times \exp^{\gamma(\theta-20)} \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} X_{ba} + k_h X_{nd}; \\ \frac{dS_{no}}{dt} &= \frac{S_{no}^{BX} - S_{no}}{T} + \frac{1}{Y_a} \mu_{ma}^{20^\circ C} \times \\ &\times \exp^{\gamma(\theta-20)} \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} X_{ba}; \\ \frac{dS_o}{dt} &= \frac{S_o^{BX} - S_o}{T} - \left(\frac{4.57 - Y_a}{Y_a} \right) \mu_{ma}^{20^\circ C} \times \\ &\times \exp^{\gamma(\theta-20)} \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} X_{ba}; \\ \frac{dX_{nd}}{dt} &= -\frac{X_{nd}}{T} + i_{xb} \left[\mu_{ma}^{20^\circ C} \exp^{\gamma(\theta-20)} \times \right. \\ &\times \left. \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} - b_a \right] - k_h X_{nd}; \\ \frac{dS_{alk}}{dt} &= \frac{S_{alk}^{BX} - S_{alk}}{T} - \left(\frac{1}{7Y_a} + \frac{i_{xb}}{14} \right) \mu_{ma}^{20^\circ C} \times \end{aligned}$$

$$\times \exp^{\gamma(\theta-20)} \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} X_{ba}.$$

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, показанные на рис. 2.

Таблица 2

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

Как видно из графиков на рис. 2, высокотемпературный режим 5 способствует наилучшему росту бактерий-нитрификаторов и соответственно уменьшению концентраций кислорода, нитратного и аммонийного азота и щелочности.

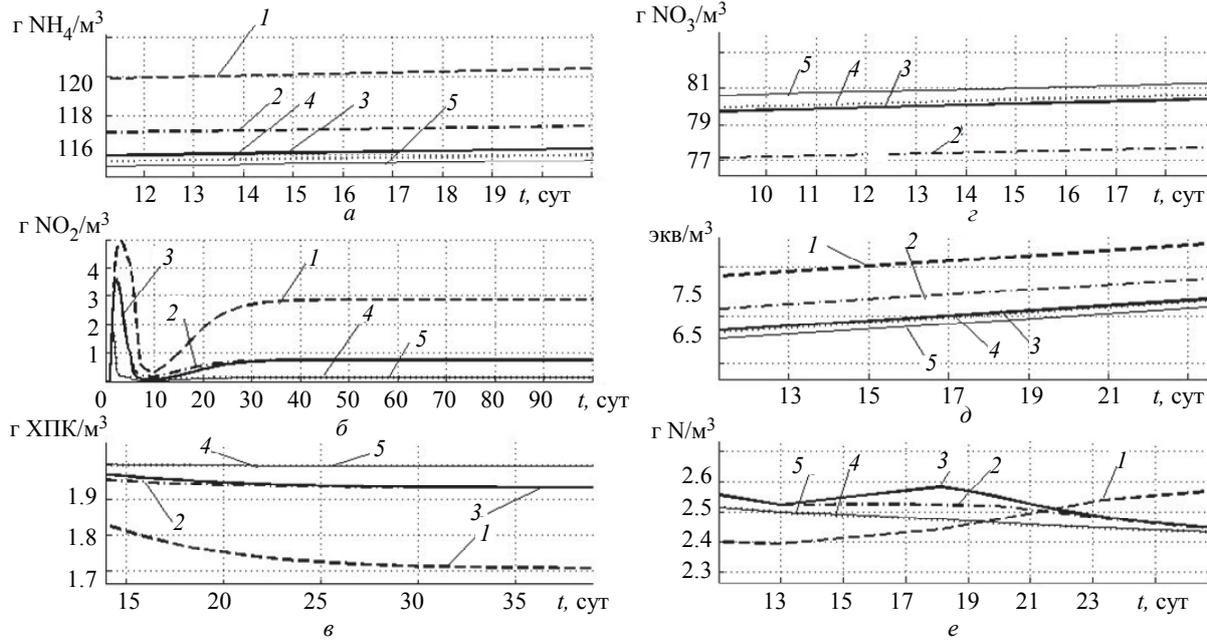


Рис. 2

Взвешенный органический азот растет в результате роста нитрификаторов и снижается при более низких температурных режимах.

На рис. 2, *a* – изменения концентраций аммонийного азота; *б* – изменения концентраций растворенного кислорода; *в* – изменения концентраций бактерий-нитрификаторов; *г* – изменения концентрации нитратного азота; *д* – изменение щелочности; *е* – изменения концентрации взвешенного органического медленного разлагаемого азота. Кривая 1 – процесс при температурном режиме 1; кривая 2 – процесс при температурном режиме 2; кривая 3 – процесс при температурном режиме 3; кривая 4 – процесс при температурном режиме 4; кривая 5 – процесс при температурном режиме 5.

Таким образом, температура внешней среды влияет 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 управлять процессом нитрификации не только концентрацией кислорода, но и температурой среды. Однако для определения наилучших условий необходимо более подробно рассмотреть взаимное влияние этих параметров.

Модель денитрификации с учетом температурного фактора. Денитрификация – это микробиологический процесс превращения нитрата в атмосферный азот в результате действия бактерий [8]. Нитрат является окисляющим элементом в процессе денитрификации. При наличии кислорода денитрифицирующие бактерии преимуще-

ственно используют его как окислитель. При рассмотрении модели денитрификации принимаются следующие допущения: процесс нитрификации отсутствует в рассматриваемом объеме; во входном потоке присутствует только аммонийный и нитратный растворимый азот [7], [9]. Процесс денитрификации и участвующие в нем процессы можно описать концептуальной схемой (рис. 3) [8].

Данная схема, как и схема модели нитрификации, позволяет проследить основные реакции данного процесса и их взаимное влияние. Стрелки на схеме носят тот же смысл, что и для предыдущей концептуальной модели.

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

$$\frac{dX_{ba}}{dt} = -\frac{dX_{ba}}{T} + \left[\mu_{bh}^{20^\circ\text{C}} \exp^{\gamma(\theta-20)} \eta_g \frac{S_s}{S_s + K_s} \times \right. \\ \left. \times \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}} - b_h \right] X_{bh};$$

$$\frac{dS_{nh}}{dt} = \frac{S_{nh}^{\text{BX}} - S_{nh}}{T} + \left[-i_{xi} \mu_{bh}^{20^\circ\text{C}} \exp^{\gamma(\theta-20)} \eta_g \times \right. \\ \left. \times \frac{S_s}{S_s + K_s} \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}} + k_a S_{nd} \right] X_{bh};$$

$$\frac{dS_s}{dt} = \frac{S_s^{\text{BX}} - S_s}{T} - \frac{1}{Y_h} \mu_{bh}^{20^\circ\text{C}} \exp^{\gamma(\theta-20)} \eta_g \frac{S_s}{S_s + K_s} \times$$

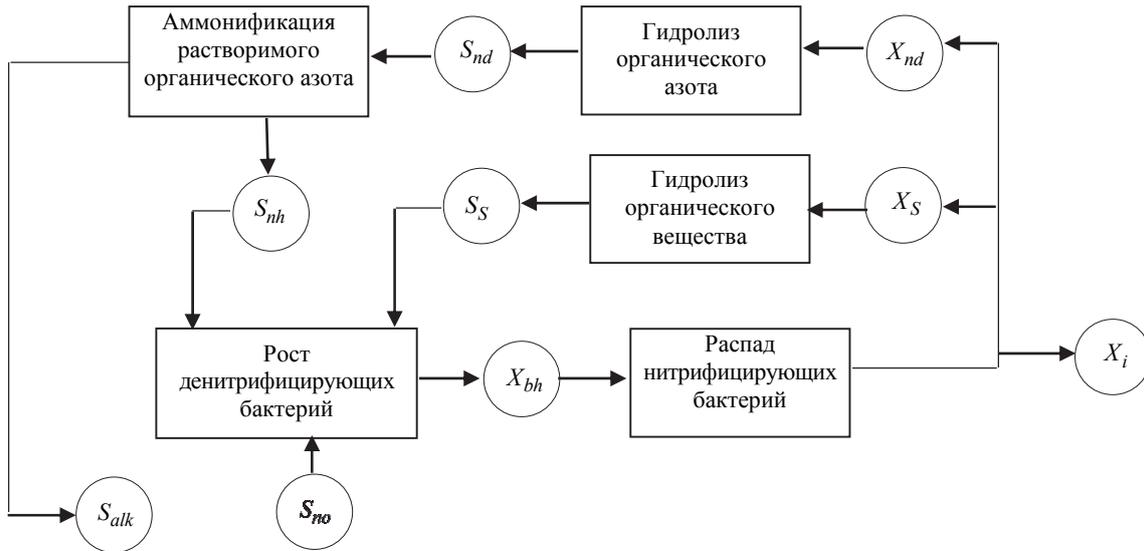


Рис. 3

Таблица 3

Величина (параметр)	Обозначение	Единица измерения
Концентрация биомассы гетеротрофов	X_{bh}	г ХПК/м ³
Концентрация растворенного органического азота	S_{nd}	г N/м ³
Концентрация взвешенного органического медленноразлагаемого вещества	X_s	г ХПК/м ³
Концентрация растворенного биологически разлагаемого органического вещества	S_s	г ХПК/м ³
Концентрация растворенного биологически разлагаемого органического вещества входная	S_s^{BX}	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 аммонии 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 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	Y_h	г ХПК/г N
Скорость аммонификации	k_a	г NH ₄ ⁺ /(г N сут ⁻¹)
Максимальная удельная скорость роста автотрофов при 20 °C	$\mu_{bh}^{20\text{ }^\circ\text{C}}$	сут ⁻¹

$$\times \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}} X_{bh} + k_h X_s;$$

$$\frac{dX_s}{dt} = -\frac{X_s}{T} + (1 - i_{xi}) b_h X_{bh} - k_h X_s;$$

$$\frac{dX_{nd}}{dt} = -\frac{X_{nd}}{T} + i_{xb} b_h X_{bh} - k_h X_{nd};$$

$$\frac{dS_{nd}}{dt} = -\frac{S_{nd}}{T} + k_h X_{nd} - k_a S_{nd} X_{bh};$$

$$\begin{aligned} \frac{dS_{alk}}{dt} = & \frac{S_{alk}^{BX} - S_{alk}}{T} + \left(\frac{1 - Y_h}{14 \cdot 2.86 Y_h} - \frac{i_{xb}}{14} \right) \mu_{bh}^{20\text{ }^\circ\text{C}} \times \\ & \times \exp^{\gamma(\theta - 20)} \eta_g \frac{S_s}{S_s + K_s} \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}} X_{bh} + \\ & + \frac{1}{14} k_a S_{nd} X_{bh}; \\ \frac{dX_i}{dt} = & -\frac{X_i}{T} + i_{xi} b_h X_{bh}. \end{aligned}$$

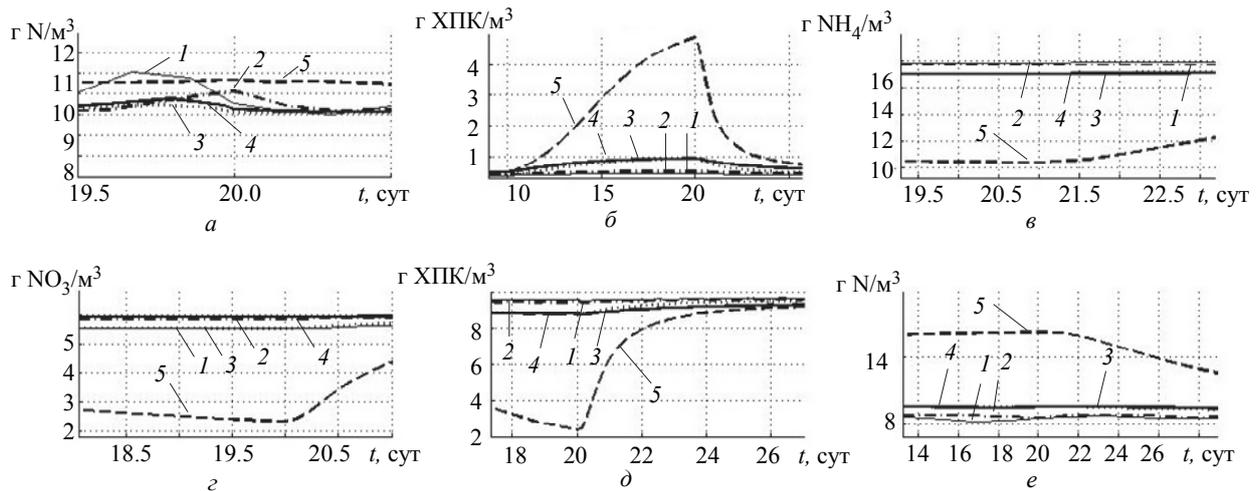


Рис. 4

Результаты компьютерного моделирования модели денитрификации с учетом температурного фактора представлены в виде графиков на 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 °С приводит к приросту численности бактерий-нитрификаторов, а дальнейшее снижение температуры до первоначального значения уменьшает их концентрацию до значения при 20 °С.

Увеличение температуры до 40 °С снижает концентрацию нитратов и аммония, увеличивая щелочность 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.

На рис. 4, *a* – изменения концентрации взвешенного органического медленноразлагаемого азота; *б* – изменения концентраций бактерий-нитрификаторов; *в* – изменения концентраций аммонийного азота; *г* – изменения концентрации нитратного азота; *д* – изменения концентраций растворенного биологически разлагаемого органического вещества; *е* – изменения концентраций бактерий-денитрификаторов.

Кривая 1 – процесс при температурном режиме 1; кривая 2 – процесс при температурном режиме 2; кривая 3 – процесс при температурном режиме 3; кривая 4 – процесс при температурном режиме 4; кривая 5 – процесс при температурном режиме 5.

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 / Самарский ун-т. Самара, 2002. 191 с.
2. Грудяева Е. К., Душин С. Е., Шолмова Н. Е. Анализ технологического процесса очистки сточных вод с мембранным биореактором // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 5. С. 48–56.
3. Душин С. Е., Красов А., 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 / Урал. гос. лесотехн. ун-т. Екатеринбург, 2015. 110 с.

5. Яковлев С. В., Карюхина Т. А. Биохимические процессы в очистке сточных вод. М.: Стройиздат, 1980. 200 с.

6. Activated Sludge Model № 1 / M. Henze, C. P. L. Grady, W. Gujer, G. v. R. Marais, T. Matsuo. London: IAWPRC, 1987.

7. Henze M., Gujer W., Mino T. Activated Sludge Models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. London: IWA Publishing, 2000.

8. Грудяева Е. К. Разработка и исследование математических моделей водоочистного комплекса с мембранным биореактором как объекта управления: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 259 с.

9. Gujer W., Henze M., Mino T. et. al. Activated sludge model № 3 // Water Science and Technology. 1999. Vol. 39, № 1. P. 165–182.

О. I. Brikova, S. E. Dushin
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

RESEARCH OF TEMPERATURE EFFECT OF THE ENVIROMENT ON BIOLOGICAL PROCESSES IN ASM1 MODELS

The existing models describing process of biological cleaning do not consider influence of external factors therefore the purpose of work is the research of temperature effect of the environment on biological processes. Non-linear mathematical models of a nitrification and a denitrification taking into account temperature effect of the environment are presented in article. The dependence of growth rate of microorganisms on temperature opisvytsya by the van't Hoff's equation. On the basis of the developed mathematical models computer models in the environment of MATLAB/Simulink were constructed. Solvable tasks consist in the analysis of temperature effect of the external environment on behavior of models of a nitrification and denitrification. As a result, of researches the best temperature ranges for development of a biocenosis of the fissile ooze which can be the basis for creation of mathematical ASM model taking into account a temperature factor are found.

Biological cleaning; the fissile ooze, nitrification, denitrification, mathematical model operations, temperature of the external environment, ASM models

УДК 004.048

Е. Е. Котова, А. С. Писарев
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Автоматизация прогнозирования результатов обучения студентов

Предлагается метод автоматизированного прогнозирования результатов обучения студентов, отличающийся использованием разнородных факторов: результатов сдачи Единого государственного экзамена по русскому языку, математике, физике и информатике, оценок академической успеваемости и индивидуальных параметров когнитивно-познавательной сферы учащихся. Проанализированы случаи прогнозирования средних баллов обучения студентов на интервале первого года и всего периода обучения в вузе. Разработаны сценарии применения гибридных моделей классификации и регрессии для прогнозирования результатов обучения по различным дисциплинам. Процедуры прогнозирования реализованы в сетевом программном комплексе ОнтоМАСТЕР при помощи интеллектуальных агентов. Метод предназначен для повышения точности прогнозирования результатов обучения студентов и обоснованности применения методов интеллектуального анализа данных к образовательным данным (Educational Data Mining, EDM). Демонстрируется, насколько более точным может быть метод прогнозирования успеваемости обучающихся с включением в множество факторов модели индивидуальных параметров когнитивно-стилевого потенциала учащихся.

Прогнозирование успеваемости обучающихся, процесс обучения, множественная регрессия, когнитивный потенциал, интеллектуальные агенты

Технологии поддержки процессов обучения и образования в интеллектуальных системах обучения (Intelligent Tutoring Systems, ITS) значительно продвинулись благодаря методам искус-

ственного интеллекта. Стали широко использоваться интеллектуальные, интерактивные образовательные технологии, научные симуляции и виртуальные лаборатории, образовательные игры,