

Влияние температуры внешней среды на процессы биологической очистки в модели ASM1

О. И. Брикова¹, Е. К. Грудяева², С. Е. Душин³

СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

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

³ dushins@yandex.ru

И. В. Жуков

ООО «Киниф»

zhukov_i_v@mail.ru

Аннотация. Предложена модификация нелинейной математической модели биологической очистки сточных вод активным илом, построенная на основе модели ASM1, для которой в качестве влияющего внешнего фактора рассматривается температура окружающей среды. Выполнен анализ поведения модели ASM1 в условиях действия внешней среды, получены семейства графиков переходных процессов концентраций загрязнителей и ила при различных температурных режимах. Определены наилучшие температурные режимы. Результаты моделирования подтверждают чувствительность поведения системы к изменению температуры окружающей среды.

Ключевые слова: биологическая очистка; сточные воды; активный ил; модель ASM1; температура

I. ВВЕДЕНИЕ

Метод биологической очистки активным илом (АИ) относится к числу наиболее перспективных и эффективных. В основе данного метода лежит способность микроорганизмов АИ использовать субстрат в качестве источника питания. Одной из самых известных и распространенных моделей биологической очистки является модель, предложенная Могенсом Хенце в 1987 г., названная ASM1 (activated sludge model) [1, 2]. Модель ASM1 описывает процессы нитрификации и денитрификации и их взаимное влияние на процесс очистки в однозонном биореакторе [3]. Данная модель не учитывает влияния температуры внешней среды на процессы биологической очистки. Температура окружающей среды, в свою очередь, является важным технологическим фактором, который может быть использован в качестве управляющего воздействия [4].

II. МОДЕЛЬ ASM1 С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДЫ

Математическая модель (ММ) ASM1 описывается следующей системой нелинейных дифференциальных уравнений (ДУ):

$$\begin{aligned} \frac{dX_{ba}}{dt} &= \frac{X_{ba}^{ex} - X_{ba}}{T} + r_{ba}; \quad \frac{dX_{bh}}{dt} = \frac{X_{bh}^{ex} - X_{bh}}{T} + r_{bh}; \\ \frac{dS_{nh}}{dt} &= \frac{S_{nh}^{ex} - S_{nh}}{T} + r_{nh}; \quad \frac{dS_{no}}{dt} = \frac{S_{no}^{ex} - S_{no}}{T} + r_{no}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dS_s}{dt} &= \frac{S_s^{ex} - S_s}{T} + r_{ss}; \quad \frac{dX_p}{dt} = \frac{X_p^{ex} - X_p}{T} + r_p; \\ \frac{dX_s}{dt} &= \frac{X_s^{ex} - X_s}{T} + r_{xs}; \quad \frac{dS_o}{dt} = \frac{S_o^{ex} - S_o}{T} + r_o; \\ \frac{dS_{nd}}{dt} &= \frac{S_{nd}^{ex} - S_{nd}}{T} + r_{snd}; \quad \frac{dX_{nd}}{dt} = \frac{X_{nd}^{ex} - X_{nd}}{T} + r_{xnd}; \\ \frac{dS_{alk}}{dt} &= \frac{S_{alk}^{ex} - S_{alk}}{T} + r_{alk}. \end{aligned}$$

где скорости изменения принятых концентраций записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} r_{snd} &= (k_h \frac{X_s / X_{bh}}{K_x + X_s / X_{bh}} (\frac{S_o}{S_o + K_{oa}} + \eta_g \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}}) - \\ &\quad - k_a S_{nd}) X_{bh}; \\ r_{nh} &= -i_{xb} ((\mu_{bh}(20^\circ C) \exp^{\gamma(Temp-20)}) \frac{S_s}{S_s + K_s}) (\frac{S_o}{S_o + K_{oh}} + \\ &\quad + \eta_g \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}}) X_{bh} - (\frac{1}{Y_a} + i_{xb})) ((\mu_{ma}(20^\circ C) \times \\ &\quad \times \exp^{\gamma(Temp-20)}) \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} X_{ba}) + k_a S_{nd} X_{bh}; \\ r_{xnd} &= (i_{xb} - f_p i_{xb}) (b_h X_{bh} + b_a X_{ba}) - k_h \frac{X_s / X_{bh}}{K_x + X_s / X_{bh}} \times \\ &\quad \times (\frac{S_o}{S_o + K_{oa}} + \eta_g \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}}) X_{bh}; \\ r_{bh} &= (((\mu_{bh}(20^\circ C) \exp^{\gamma(Temp-20)}) \frac{S_s}{S_s + K_s}) (\frac{S_o}{S_o + K_{oh}} + \\ &\quad + \eta_g \frac{K_{oh}}{S_o + K_{oh}} \frac{S_{no}}{S_{no} + K_{no}}) - b_a) X_{bh}; \\ r_{ba} &= (((\mu_{ma}(20^\circ C) \exp^{\gamma(Temp-20)}) \frac{S_{nh}}{S_{nh} + K_{nh}} \frac{S_o}{S_o + K_{oa}} - \\ &\quad - b_a) X_{ba}; \quad r_p = f_p (b_h X_{bh} - b_a X_{ba}); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
r_{ss} = & -\frac{1}{Y_a}((\mu_{bh}(20^\circ\text{C})\exp^{\gamma(\text{Temp}-20)})\frac{S_s}{S_s+K_s})(\frac{S_o}{S_o+K_{oh}} + \\
& +\eta_g\frac{K_{oh}}{S_o+K_{oh}}\frac{S_{no}}{S_{no}+K_{no}})X_{bh}+k_h\frac{X_s/X_{bh}}{K_x+X_s/X_{bh}}(\frac{S_o}{S_o+K_{oa}} + \\
& +\eta_g\frac{K_{oh}}{S_o+K_{oh}}\frac{S_{no}}{S_{no}+K_{no}})X_{bh}; \\
r_{no} = & -\frac{1-Y_h}{2,86Y_h}((\mu_{bh}(20^\circ\text{C})\exp^{\gamma(\text{Temp}-20)})\frac{S_s}{S_s+K_s}\eta_g\frac{K_{oh}}{S_o+K_{oh}} \times \\
& \times\frac{K_{oh}}{S_o+K_{oh}}\frac{S_{no}}{S_{no}+K_{no}})X_{bh}+\frac{1}{Y_a}(\mu_{ma}(20^\circ\text{C})\exp^{\gamma(\text{Temp}-20)}) \times \\
& \times\frac{S_{nh}}{S_{nh}+K_{nh}}\frac{S_o}{S_o+K_{oa}}X_{ba}; \\
r_o = & \frac{1-Y_h}{Y_h}(\mu_{bh}(20^\circ\text{C})\exp^{\gamma(\text{Temp}-20)})\frac{S_s}{S_s+K_s}\frac{S_o}{S_o+K_{oh}}X_{bh}- \\
& -\frac{4,57-Y_a}{Y_a}(\mu_{ma}(20^\circ\text{C})\exp^{\gamma(\text{Temp}-20)})\frac{S_{nh}}{S_{nh}+K_{nh}}\frac{S_o}{S_o+K_{oa}}X_{ba}; \\
r_{alk} = & (\frac{1-Y_h}{40,04Y_h}-\frac{i_{xb}}{14})(\mu_{bh}(20^\circ\text{C})\exp^{\gamma(\text{Temp}-20)})\eta_g \times \\
& \times\frac{K_{oh}}{S_o+K_{oh}}\frac{S_{no}}{S_{no}+K_{no}}X_{bh}-\frac{i_{xb}}{14}(\mu_{bh}(20^\circ\text{C})\exp^{\gamma(\text{Temp}-20)}) \times \\
& \times\frac{S_s}{S_s+K_s}\frac{S_o}{S_o+K_{oh}}X_{bh}+\frac{1}{14}k_aS_{nd}X_{bh}-\frac{i_{xb}}{14}+\frac{1}{7Y_a}) \times \\
& \times(\mu_{ma}(20^\circ\text{C})\exp^{\gamma(\text{Temp}-20)})\frac{S_{nh}}{S_{nh}+K_{nh}}\frac{S_o}{S_o+K_{oa}}X_{ba}; \\
r_{xs} = & (1-f_p)(b_hX_{bh}+b_aX_{ba})-k_h\frac{X_s/X_{bh}}{K_x+X_s/X_{bh}} \times \\
& \times(\frac{S_o}{S_o+K_{oh}}+\eta_g\frac{K_{oh}}{S_o+K_{oh}}\frac{S_{no}}{S_{no}+K_{no}})X_{bh}.
\end{aligned}$$

В табл. 1 указаны все основные наименования параметров, их обозначения и единицы измерения. Моделирование выполняется в среде MATLAB/Simulink при различных температурных режимах, указанных в табл. 2, и Q^{ex} , где Q^{ex} – исходный расход сточных вод, м³/сут.

На рис. 1 представлены результаты моделирования при воздействии краткосрочных режимов 1, 2, 3 и $Q^{ex}=5$. Изменение температуры с низкого ($\theta_{low}=5^\circ\text{C}$) и нормального ($\theta_{norm}=20^\circ\text{C}$) значений до высокого ($\theta_{high}=35^\circ\text{C}$), что соответствует режимам 2 и 3 позволяет концентрации бактерий нитри- и денитрификаторов вырасти и снизить концентрации аммония и нитратного азота в отличие от режима 1, в котором температура повышается от низкого ($\theta_{low}=5^\circ\text{C}$) до нормального ($\theta_{norm}=20^\circ\text{C}$). Также увеличение температуры позволяет снизить время установления для бактерий гетеротрофов и растворенного биологически разлагаемого органического вещества на 3 суток.

ТАБЛИЦА 1 ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ОБОЗНАЧЕНИЯ И ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

Наименование величин и параметров	Обоз.	Ед. измерения
Фракция биомассы, приводящая к дисперсным продуктам	f_p	-
Корректирующий фактор для гидролиза при анаэробных условиях	η_h	-
Константа полунасыщения для гидролиза разлагаемого субстрата	K_x	-
Концентрация твердых продуктов распада биомассы	X_p	гХПКм ⁻³
Концентрация биомассы гетеротрофов (автотрофов)	X_{bh} (X_{ba})	
Константа полунасыщения по органическому субстрату при денитрификации	K_s	
Концентрация взвешенного органического разлагаемого вещества	X_s	
Концентрация растворенного биологически разлагаемого органического вещества	S_s	
Концентрация взвешенного инертного органического вещества	X_i	
Константа насыщения по кислороду для гетеротрофов	K_{oh}	гО ₂ м ⁻³
Константа полунасыщения по нитрату при денитрификации	K_{no}	гNO ₃ м ⁻³
Концентрация нитратного азота	S_{no}	
Фракция азота в биомассе АИ	i_{xb}	гN _{общ} / (гХПК)
Фракция азота в биомассе активного ила	i_{xb}	
Фракция азота в массе продуктов распада	i_{xi}	
Корректирующий фактор скорости роста гетеротрофов в анаэробных условиях	η_g	-
Максимальный коэффициент прироста биомассы для гетеротрофных бактерий	Y_h	гХПК/гN
Максимальный коэффициент прироста биомассы нитрификаторов	Y_a	
Скорость аммонификации	k_a	НН ₄ / /Nсут ⁻¹
Температурный коэффициент	γ	-
Температура среды	θ	°C
Концентрация взвешенного органического разлагаемого азота	X_{nd}	гNм ⁻³
Концентрация растворенного органического азота	S_{nd}	
Концентрация аммонийного азота	S_{nh}	гNH ₄ ⁺ м ⁻³
Константа насыщения по аммонии	K_{nh}	
Концентрация растворенного кислорода	S_o	гNO ₂ м ⁻³
Щелочность	S_{alk}	эквм ⁻³
Константа насыщения по кислороду для автотрофов	K_{oa}	гО ₂ м ⁻³
Максимальная удельная скорость роста гетеротрофов (автотрофов) при 20°C	$\mu_{bh}^{20^\circ\text{C}}$ ($\mu_{ma}^{20^\circ\text{C}}$)	сут ⁻¹
Константа распада денитрификаторов	b_h	
Константа распада нитрификаторов	b_a	
Константа гидролиза	k_h	

ТАБЛИЦА II ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ

Температурный режим	Температурный диапазон	Описание температурного режима
Режим 1	от 5°C до 20°C	Повышение температуры от низкого значения до нормального
Режим 2	от 5°C до 35°C	Повышение температуры от низкого значения до высокого
Режим 3	от 20°C до 35°C	Повышение температуры от нормального значения до высокого
Режим 4	от 20°C до 5°C	Снижение температуры с нормального значения до низкого
Режим 5	от 35°C до 5°C	Снижение температуры с высокого значения до низкого
Режим 6	от 35°C до 20°C	Снижение температуры с высокого значения до нормального
Примечание – изменение происходит в момент времени 10 сут.		

На рис. 2 приведены графики изменений концентраций при воздействии краткосрочных режимов 4, 5, 6 и $Q^{ex} = 5$.

Наилучший уровень очистки наблюдается при снижении температуры от высокого значения ($\theta_{high} = 35^\circ C$) до нормального ($\theta_{norm} = 20^\circ C$), что соответствует режиму 6. Важно отметить резкий температурный перепад при снижении температуры от высокого значения ($\theta_{high} = 35^\circ C$) до низкого значения ($\theta_{low} = 5^\circ C$) не приводит к полному вымыванию культур, но значительно ухудшает качество биопроцессов. Данный результат объясняется высокой первоначально температурой, которая обеспечивает быстрый рост микроорганизмов и их хорошую способность к адаптации в изменившихся условиях среды.

Результаты компьютерного моделирования при воздействии температурных режимов 1, 2, 3 и $Q^{ex} = 435$ представлены на рис. 3.

Наилучший уровень очистки достигается при увеличении температуры от нормального ($\theta_{norm} = 20^\circ C$) до высокого ($\theta_{high} = 35^\circ C$) значения, что соответствует режиму 3. При данном воздействии наблюдается уменьшение времени установления переходных процессов на 5 суток, по сравнению с режимом 2, который характеризуется высоким температурным перепадом.

Результаты компьютерного моделирования при воздействии температурных режимов 4, 5, 6 и $Q^{ex} = 435$ представлены на рис. 4.

Снижение температуры до $\theta_{low} = 5^\circ C$ ухудшает качество очистки и уменьшает концентрацию микроорганизмов гетеротрофов. Наилучший уровень очистки наблюдается при снижении температуры с

высокого значения ($\theta_{high} = 35^\circ C$) до низкого ($\theta_{low} = 5^\circ C$). Данный результат связан с высоким первоначальным значением, которое позволяет микроорганизмам вырасти и обеспечить необходимый уровень очистки до момента снижения температуры.

На рис. 5 представлены графики изменения концентраций при воздействии краткосрочных режимов 1, 2, 3 и $Q^{ex} = 20$.

Увеличение температурного режима до высокого ($\theta_{high} = 35^\circ C$) и нормального ($\theta_{norm} = 20^\circ C$) значений, несмотря на низкую начальную температуру ($\theta_{low} = 5^\circ C$), позволяет создать благоприятные условия для развития микроорганизмов и снизить концентрации аммонийного и нитратного азотов. Важно отметить, что применение режимов 2 и 3 приводят к схожим результатам. Наихудший уровень очистки наблюдается при увеличении температуры от низкого ($\theta_{low} = 5^\circ C$) до нормального ($\theta_{norm} = 20^\circ C$).

На рис. 6 представлены графики изменений концентраций при воздействии краткосрочных режимов 4, 5, 6 и $Q^{ex} = 20$.

При снижении температурного режимов наблюдается вымывание бактерий автотрофов. Снижение температуры от высокого ($\theta_{high} = 35^\circ C$) значения до низкого ($\theta_{low} = 5^\circ C$), что соответствует режиму 2, который характеризуется наибольшим температурным перепадом. Применение данного режима снижает максимальную концентрацию денитрификаторов, но обеспечивает лучше уровень очистки по сравнению с воздействием при котором температура снижается с нормального ($\theta_{norm} = 20^\circ C$) значения до низкого ($\theta_{low} = 5^\circ C$), что соответствует режиму 4. Данный результат объясняется высокой первоначальной температурой. Наихудший уровень очистки наблюдается при использовании режима 4, наилучший – режим 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменение температуры оказывает значительное влияние не только на популяцию микроорганизмов, но и на реакции их взаимодействия. Также важно отметить, что изменением температуры можно добиться более высокого качества очистки. Полученные результаты стоит учитывать при разработке системы управления температурой в биореакторе.

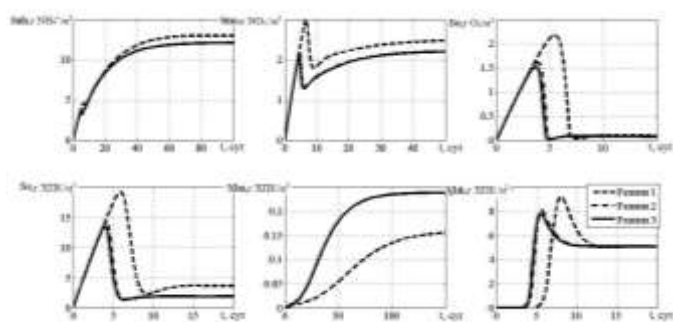


Рис. 1. Графики изменений концентраций при $Q^{\text{ex}} = 5 \text{ м}^3/\text{сут}$ и воздействии режимов 1, 2 и 3

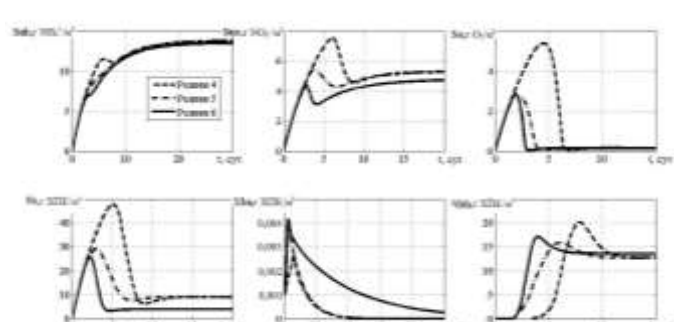


Рис. 4. Графики изменений концентраций при $Q^{\text{ex}} = 20 \text{ м}^3/\text{сут}$ при воздействии режимов 4, 5 и 6

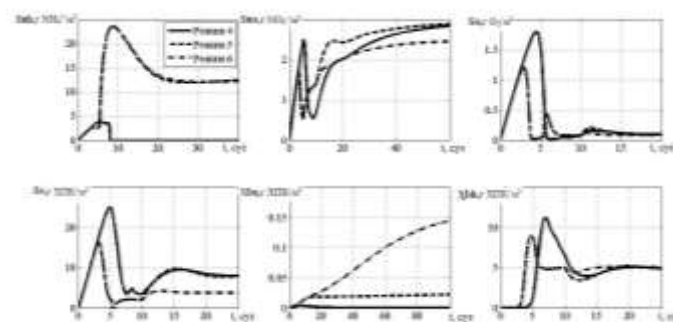


Рис. 2. Графики изменений концентраций при $Q^{\text{ex}} = 5 \text{ м}^3/\text{сут}$ и воздействии режимов 4, 5 и 6

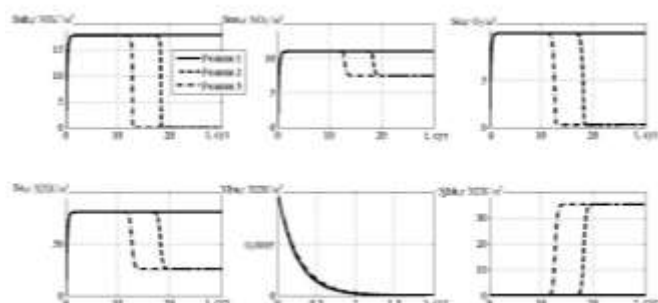


Рис. 5. Графики изменений концентраций при $Q^{\text{ex}} = 435 \text{ м}^3/\text{сут}$ и воздействии режимов 1, 2 и 3

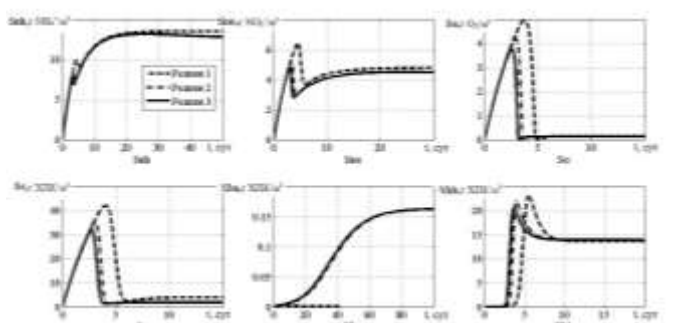


Рис. 3. Графики изменений концентраций при $Q^{\text{ex}} = 20 \text{ м}^3/\text{сут}$ и воздействии режимов 1, 2 и 3

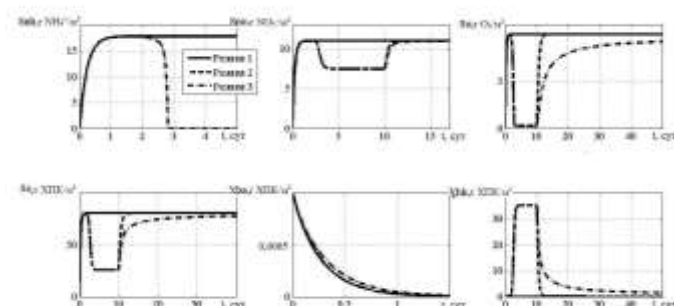


Рис. 6. Графики изменений концентраций при $Q^{\text{ex}} = 435 \text{ м}^3/\text{сут}$ и воздействии режимов 4, 5 и 6

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Хенце М., Армозс П., Ля-Кур-Янсен Й., Арван Э. Очистка сточных вод. М.: Мир, 2009. 480 с.
- [2] Вавилин В.А., Васильев В.Б. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом. М.: Наука, 1979. 121 с.
- [3] Henze M. Activated Sludge Model No. 1 / M. Henze, C. P. L. Grady, W. Gujer, G. v. R. Marais, T. Matsuo. London: IAWPRC, 1987.
- [4] Грудяева Е.К. Моделирование управляемых процессов биологической очистки сточных вод / Е.К. Грудяева, С. Е. Душин, СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 231 с.