

Моделирование процессов биологической очистки в трехзонном биореакторе

О. И. Брикова¹, С. Е. Душин²

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет

«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

¹olgabrikova26@gmail.com, ²dushins@yandex.ru

Аннотация. В статье приведены результаты моделирования трехзонного биореактора типа денитрификация-нитрификация-денитрификация с мембранным блоком и рециклом с учетом температурного фактора. Представлены результаты компьютерного моделирования выходных концентраций при различных температурных режимах. Выполнен качественный и количественный анализ процессов при различных температурных воздействиях. Сделаны выводы о влиянии температуры на процессы биологической очистки в биореакторе. Результаты моделирования подтверждают чувствительность поведения системы к изменению температуры внешней среды.

Ключевые слова: активный ил; биореактор; трехзонный биореактор; биореактор с рециклом; температура внешней среды

I. ВВЕДЕНИЕ

Метод биологической очистки активным илом относится к числу наиболее перспективных и эффективных. В основе данного метода лежит способность микроорганизмов активного 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. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХЗОННОГО БИОРЕАКТОРА С МЕМБРАННЫМ БЛОКОМ

В качестве основной математической модели, описывающей биохимические процессы, протекающие в биореакторе, была выбрана модифицированная модель ASM1, описанная в [5].

Для исследования выбрана система очистки типа ДНД (денитрификация-нитрификация-денитрификация) с мембранным блоком, рециклом и возвратным потоком.

Математическая модель трехзонного реактора с мембранным блоком, рециклом и возвратным потоком

представлена следующей системой дифференциальных уравнений [4]:

$$dX_1 / dt = ((X^{\text{ax}} Q^{\text{ax}} + X_3 Q^p + X_4 Q^{\text{ex}}) - (Q^{\text{ax}} + Q^p + Q^{\text{ex}}) X_1) / V_1 + r_x;$$

$$dS_1 / dt = ((S^{\text{ax}} Q^{\text{ax}} + S_3 Q^p + S_4 Q^{\text{ex}}) - (Q^{\text{ax}} + Q^p + Q^{\text{ex}}) X_1) / V_1 + r_s;$$

$$dX_2 / dt = ((Q^{\text{ax}} + Q^p + Q^{\text{ex}})(X_1 - X_2) / V_2 + r_x;$$

$$dS_2 / dt = ((Q^{\text{ax}} + Q^p + Q^{\text{ex}})(S_1 - S_2) / V_2 + r_s;$$

$$dX_3 / dt = ((Q^{\text{ax}} + Q^p + Q^{\text{ex}})(X_2 - X_3) / V_3 + r_x;$$

$$dS_3 / dt = ((Q^{\text{ax}} + Q^p + Q^{\text{ex}})(S_2 - S_3) / V_3 + r_s;$$

$$X_4 = 0,99 X_3 Q^{\text{ex}} / Q^{\text{ex}} = 0,99 X_3 (1 - k_{\text{ex}}) / k_{\text{ex}};$$

$$S_4 = S_3; X_5 = 0; S_5 = S_3; C_{\text{ХПК}} = S_i + S_{s3},$$

где X – концентрации взвешенных веществ; S – концентрации растворенных веществ, r_x, r_s – скорости изменения соответствующих концентрации в результате химических реакций, индексы 1, 2, 3 соответствуют зонам биореактора, индекс 4 – возвратному потоку, индекс 5 – потоку фильтрата.

III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

В соответствии с приведенной выше математической моделью была построена компьютерная модель в среде MATLAB/Simulink.

В табл. 1 указаны параметры модели их значения, при которых выполнялось компьютерное моделирование.

ТАБЛИЦА I Принятые параметры модели

Наименование величин и параметров	Обоз.	Значение
Фракция биомассы, приводящая к дисперсным продуктам	f_p	0,1
Корректирующий фактор для гидролиза при аноксидных условиях	η_h	0,4
Константа полунасыщения для гидролиза разлагаемого субстрата	K_x	0,03
Концентрация биомассы автотрофов	X_{ba}	0,001
Константа полунасыщения по органическому субстрату при денитрификации	K_s	15
Концентрация взвешенного органического разлагаемого вещества	X_s	200

Наименование величин и параметров	Обоз.	Значение
Концентрация растворенного биологически разлагаемого органического вещества	S_s	10
Концентрация взвешенного инертного органического вещества	X_i	25
Константа насыщения по кислороду для гетеротрофов	K_{oh}	0,5
Константа полунасыщения по нитрату при денитрификации	K_{no}	0,5
Концентрация нитратного азота	S_{no}	5
Фракция азота в биомассе активного ила	i_{xb}	0,86
Фракция азота в массе продуктов распада	i_{xi}	0,06
Корректирующий фактор скорости роста гетеротрофов в аноксидных условиях	η_g	0,6
Максимальный коэффициент прироста биомассы для гетеротрофных бактерий	Y_h	0,67
Максимальный коэффициент прироста биомассы нитрификаторов	Y_a	0,24
Скорость аммонификации	k_a	0,08
Температурный коэффициент	γ	0,04
Концентрация растворенного органического азота	S_{nd}	0
Концентрация аммонийного азота	S_{nh}	30
Константа насыщения по аммонии	K_{nh}	1
Концентрация растворенного кислорода	S_o	2
Щелочность	S_{alk}	7
Константа насыщения по кислороду для автотрофов	K_{oa}	0,4
Максимальная удельная скорость роста гетеротрофов (автотрофов) при 20°C	$\mu_{bh}^{20^\circ C}$	6
Константа распада денитрификаторов	b_h	0,62
Константа распада нитрификаторов	b_a	0,03
Константа гидролиза	k_h	3
Концентрация биомассы гетеротрофов	X_{bh}	96
Максимальная удельная скорость роста гетеротрофов (автотрофов) при 20°C	$\mu_{ma}^{20^\circ C}$	0,8
Объем реактора		
Расход рециркуляционного потока	Q_p	200
Входной расход	Q_{ex}	100
Коэффициент возвратного потока	$k_{вз}$	0,8863

Исследование выполняется при различных постоянных воздействиях температуры: $\theta_1 = 10^\circ C$; $\theta_2 = 20^\circ C$; $\theta_3 = 30^\circ C$.

Процессы, протекающие при температуры в $20^\circ C$, принимаются нормальными. Анализ влияния повышения и понижения температуры на процессы биологической очистки проводится относительно нормального температурного режима.

Графики процессов при различных температурных воздействиях и приведенных ранее параметров модели представлены на рис. 1.

Для удобства результаты количественного анализа были сведены в табл. 1. и табл. 2. Стрелка вверх – повышение концентрации; стрелка вниз – уменьшение концентрации.

ТАБЛИЦА II РЕЗУЛЬТАТЫ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОЦЕССЫ

Концентрации	Температурный режим $\theta_1 = 10^\circ C$		
	Макс. знач., %	Уст. знач., %	Время уст., %
S_{nh}	↑ на 163	↑ на 318	↑ на 15
S_{no}	↓ на 4,3	↓ на 4,2	↑ на 247
COD	↑ на 0,3	↑ 0,5	-

ТАБЛИЦА III РЕЗУЛЬТАТЫ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАУТРЫ НА ПРОЦЕССЫ

Концентрации	Температурный режим $\theta_3 = 30^\circ C$		
	Макс. знач., %	Уст. знач., %	Время уст., %
S_{nh}	↓ на 68	↓ на 79	↓ на 1
S_{no}	↑ на 1	↑ на 1	↓ на 26
COD	-	↓ на 0,2	-

Как видно из графиков и таблиц, применение более высокой температуры позволяет снизить максимальные и установившиеся концентрации аммонийного азота на 68 % и 79 % соответственно, при этом время установление процесса уменьшается незначительно (не более 1 %).

Максимальное и установившееся значения концентрации нитратного азота при более высокой температуре повышается не более чем на 1 %, однако время установления процессов снижается на 26 %.

Повышение температуры оказывает незначительное влияние на процессы ХПК.

Также можно отметить, что все концентрации превышают предельно-допустимые концентрации. Однако при значении температуры $\theta_3 = 30^\circ C$ установившиеся значения концентрации аммонийного азота меньше ПДК.

Результаты моделирования при температуре на входе равной $\theta_1 = 10^\circ C$ позволяют сделать вывод о негативном влиянии пониженной температуры на выходные концентрации.

Максимальное и установившееся значения концентрации аммонийного азота увеличились на 163 % и 318 % соответственно. Время установления для концентрации аммония увеличилось на 15 %.

Максимальное и установившееся значения концентрации нитратного азота уменьшились не более чем на 4,5 %, однако время установления повысилось на 247 %.

Изменение температурного режима оказало незначительное влияние на концентрации ХПК.

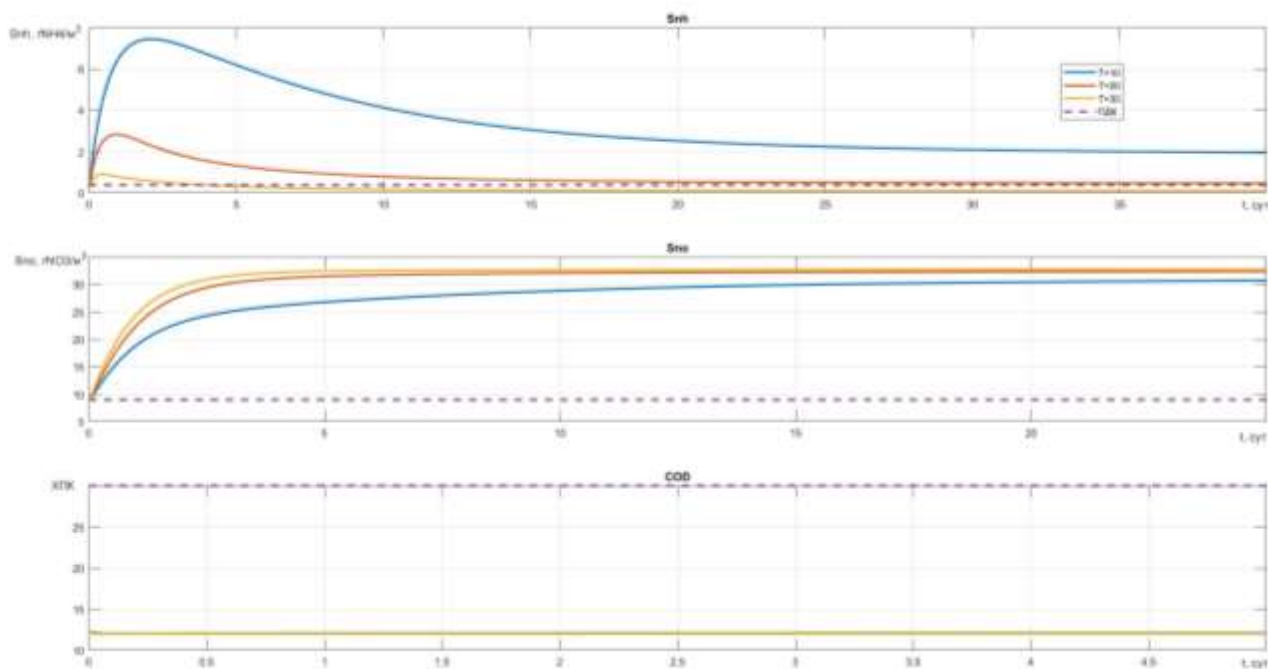


Рис. 1. Результаты моделирования

IV. 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. Наибольшее влияние повышение или понижение температуры оказывает на концентрацию аммонийного азота. Наименьшее влияние температура оказывает на ХПК. В данных экспериментах наилучший уровень очистки был достигнут при $\theta_3 = 30^\circ\text{C}$, что говорит о необходимости дополнительно вводить в систему управляющего воздействия температуру воды. Полученные результаты могут быть использованы при разработке алгоритмов и законов управления температурой в биореакторе.

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.
- [5] Brikova O.I., Grudyaeva E.K., Dushin S.E. and Zhukov I.V., "The Influence of Ambient Temperature on the Process of Biological Treatment in the Model ASM1," // 2019 III International Conference on Control in Technical Systems (CTS), 2019, pp. 136-139, doi: 10.1109/CTS48763.2019.8973313.