
ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА УПРАВЛЕНИЯ И ИНФОРМАТИКИ

УДК 681.54
DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-9-891-897

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА УПРАВЛЯЕМЫЕ БИОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Е. К. ГРУДЯЕВА, С. Е. ДУШИН, О. И. КАПУЛИНА

*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
„ЛЭТИ“ им. В. И. Ульянова (Ленина), 197022, Санкт-Петербург, Россия*

E-mail: kapulinaolga@gmail.com

Предложены нелинейные математические модели биохимической очистки сточных вод активным илом, построенные на основе базовых динамических моделей Моно, Холдейна и Кенейла. В качестве влияющего внешнего фактора рассматривается температура окружающей среды. Развитие биоценоза происходит в ограниченном пространстве реактора при определенных технологических ограничениях и допущениях. Зависимость скорости роста микроорганизмов от температуры внешней среды основывается на эмпирическом уравнении Вант-Гоффа. Представлены результаты исследований для четырех температурных режимов. Изменение температурного режима осуществляется за счет постепенного увеличения и последующего снижения температуры окружающей среды до заданных значений. Приведены семейства графиков переходных процессов концентраций субстрата и активного ила при различных температурах. Определены оптимальные температурные режимы, которые создают наиболее благоприятные условия развития биоценоза активного ила и обеспечивают наиболее эффективную очистку. Результаты моделирования подтверждают чувствительность поведения системы к температурным изменениям. Полученные результаты следует учитывать при рассмотрении моделей нитрификации и денитрификации, характеризующихся более высокими динамическими порядками, и построении системы управления с целью улучшения показателей качества воды и снижения временных затрат на биологическую очистку.

Ключевые слова: *очистка сточных вод, активный ил, базовые модели Моно, Холдейна, Кенейла, температура внешней среды*

Введение. В настоящее время для биологической очистки сточных вод с использованием активного ила используются математические модели различной степени сложности и адекватности реальным процессам [1—6]. Среди них выделяются базовые модели, доступные для аналитических исследований с целью выявления основных свойств и закономерностей, присущих биохимическим процессам очистки [7, 8]. Как правило, это нелинейные модели 2-го и 3-го порядков. Недостаток известных базовых моделей состоит в том, что влияние внешних факторов (например, температуры окружающей среды) в них не учитывается [9, 10].

Влияние температуры окружающей среды на скорость биологических процессов. Скорость роста микроорганизмов описывается уравнением Моно [1]:

$$\mu = \mu_{\max} C_c / (C_c + K_c),$$

где C_c — концентрация субстрата; K_c — константа полунасыщения; μ_{\max} — максимальная удельная скорость роста.

Как показали исследования [2—4], зависимость скорости роста μ_{\max} биологического процесса от температуры θ описывается уравнением Вант-Гоффа:

$$\mu_{\max} = \mu_{\max}^{20^\circ\text{C}} e^{\gamma(\theta-20)},$$

где $\mu_{\max}^{20^\circ\text{C}}$ — максимальная удельная скорость роста биомассы ила при температуре 20°C ; γ — температурный коэффициент.

Модель Моно характеризует рост биомассы активного ила при лимитирующем моно-субстрате. С учетом температурного фактора математическая модель Моно описывается следующей системой дифференциальных уравнений [4]:

$$\frac{dC_{\text{и}}}{dt} = -\frac{C_{\text{и}}}{T} + \frac{\mu_{\max}^{20^\circ\text{C}} e^{\gamma(\theta-20)} C_c C_{\text{и}}}{K_c + C_c},$$

$$\frac{dC_c}{dt} = \frac{C_c^{\text{вх}} - C_c}{T} - \frac{\mu_{\max}^{20^\circ\text{C}} e^{\gamma(\theta-20)} C_c C_{\text{и}}}{Y(K_c + C_c)},$$

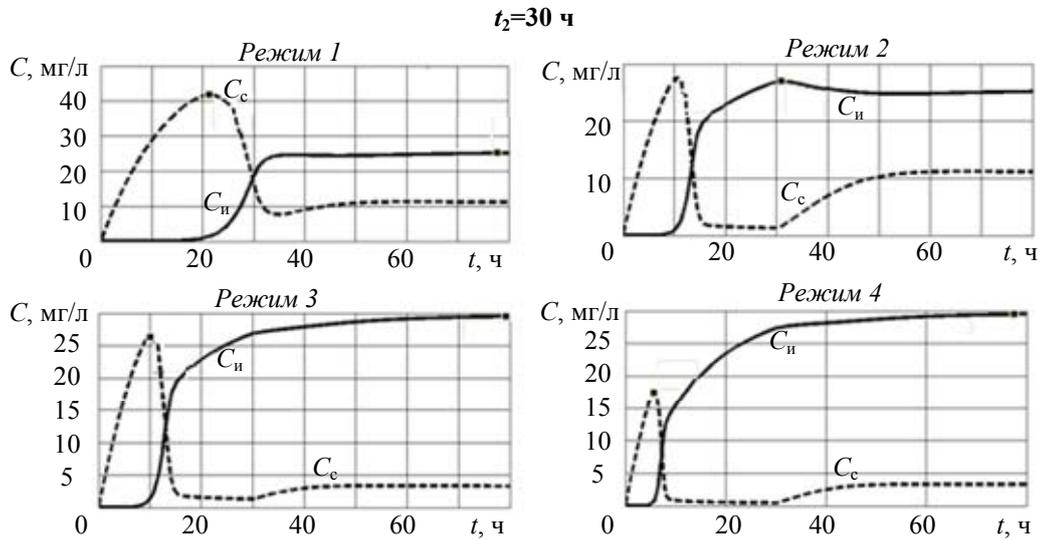
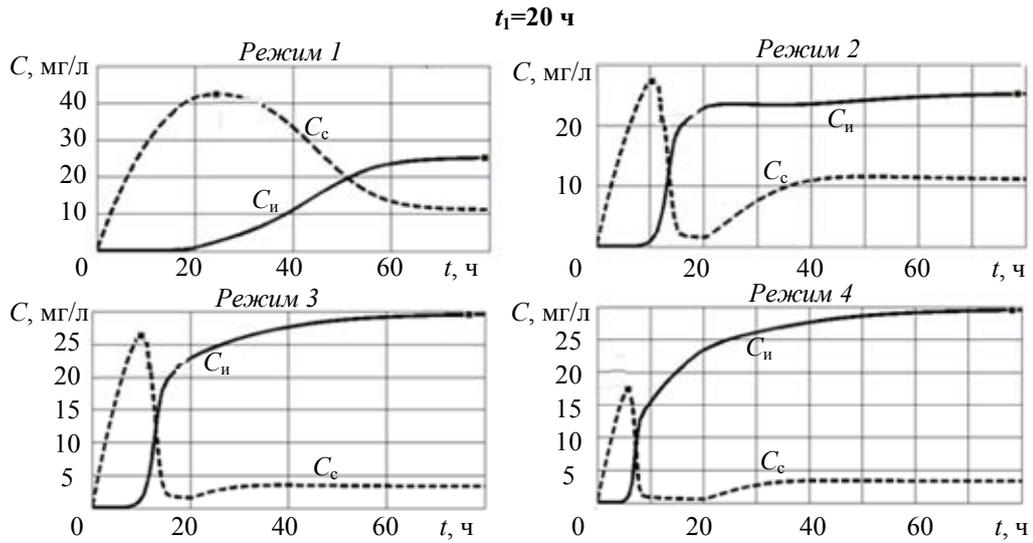
где $C_{\text{и}}$ — концентрация ила; $C_c^{\text{вх}}$ — входная концентрация субстрата; $Y = |C_{\text{и}} / C_c|$ — коэффициент трансформации субстрата в ил; T — период аэрации.

При моделировании предполагается, что константы K_c и Y не зависят от температуры. Температурный режим изменяется путем постепенного увеличения и снижения температуры до заданных значений. Исследование моделей проводилось при четырех температурных режимах, параметры которых приведены в таблице.

Номер температурного режима	Возрастание температуры θ , °C	Убывание температуры θ , °C
1	От 10 до 20	До 10
2	От 10 до 30	До 10
3	От 20 до 30	До 20
4	От 20 до 40	До 20

При моделировании процессов были приняты следующие значения параметров: $Y = 0,55$; $\mu_{\max}^{20^\circ\text{C}} = 0,69 \text{ ч}^{-1}$; $K_c = 29 \text{ ч}^{-1}$; $\gamma = 0,1$; объем субстрата, подаваемого на вход биореактора, $Q^{\text{вх}} = 7 \text{ м}^3 / \text{ч}$; объем реактора $V = 100 \text{ м}^3$.

На рис. 1 и 2 показаны переходные процессы концентраций субстрата $C_c(t)$ и ила $C_{\text{и}}(t)$ при снижении температуры в моменты времени $t_1 = 20 \text{ ч}$ и $t_2 = 30 \text{ ч}$ соответственно. При использовании низкотемпературного режима 1 биопроцессы наиболее чувствительны к моменту снижения температуры. При снижении температуры в более поздний момент времени t_2 биомасса вырастает, что позволяет обеспечить лучшую очистку. В остальных режимах при снижении температуры в определенные моменты наблюдается схожее воздействие, поскольку при более высоких температурах микроорганизмы растут быстрее. При этом тенденция роста биомассы в случае более длительного поддержания высокой температуры сохраняется (на 6 % больше), время формирования процессов снижается на 16 %. При повышении температуры до 40°C максимальное значение C_c снижается в 1,5 раза. Таким образом, диапазон благоприятных для биологической очистки температур сводится к режиму 4.



Модель Холдейна характеризует кинетику биопроцессов с учетом ингибирующих свойств субстрата и описывается системой дифференциальных уравнений [5]:

$$\frac{dC_{\text{н}}}{dt} = -\frac{C_{\text{н}}}{T} + \frac{\mu_{\text{max}}^{20^{\circ}\text{C}} e^{\gamma(\theta-20)} C_{\text{с}} C_{\text{н}}}{K_{\text{с}} + C_{\text{с}} + C_{\text{с}}^2 / K_i};$$

$$\frac{dC_{\text{с}}}{dt} = \frac{C_{\text{с}}^{\text{вх}} - C_{\text{с}}}{T} - \frac{\mu_{\text{max}}^{20^{\circ}\text{C}} e^{\gamma(\theta-20)} C_{\text{с}} C_{\text{н}}}{Y(K_{\text{с}} + C_{\text{с}} + C_{\text{с}}^2 / K_i)},$$

где K_i — константа ингибирования, равная $10K_{\text{с}}$.

На рис. 3 и 4 показаны процессы $C_{\text{с}}(t)$ и $C_{\text{н}}(t)$ при снижении температуры в моменты времени $t_1 = 20$ ч и $t_2 = 30$ ч соответственно. Примечательно, что максимальные значения $C_{\text{н}}$ на 12 % выше, чем для модели Моно при режимах 3 и 4. Иными словами, благоприятная температурная среда в этом случае в определенной степени нейтрализует ингибирующее воздействие субстрата. При этом на 18 % по сравнению с моделью Моно увеличивается время установления значения $C_{\text{н}}$ при режимах 3, 4 и на 42 % — при режимах 1, 2.

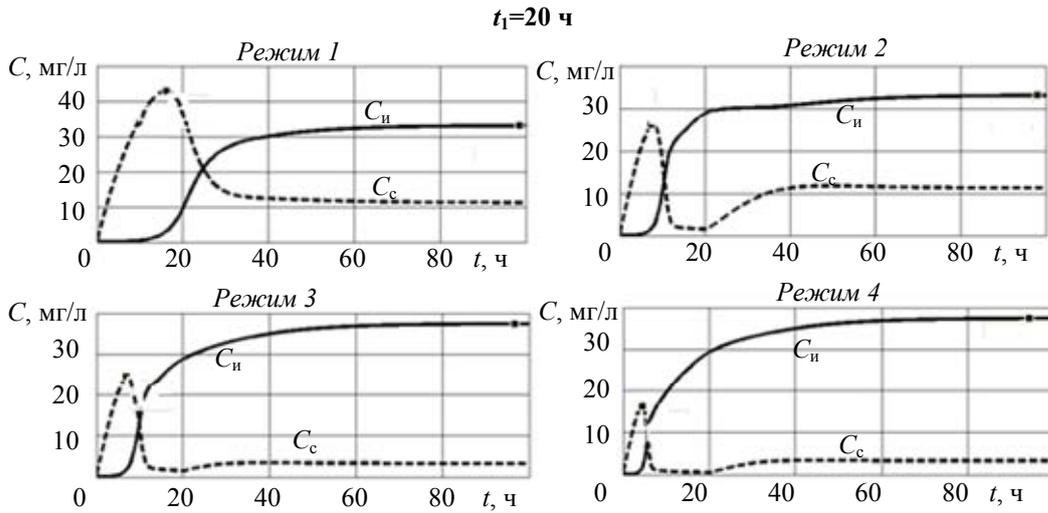


Рис. 3
 $t_2=30$ ч

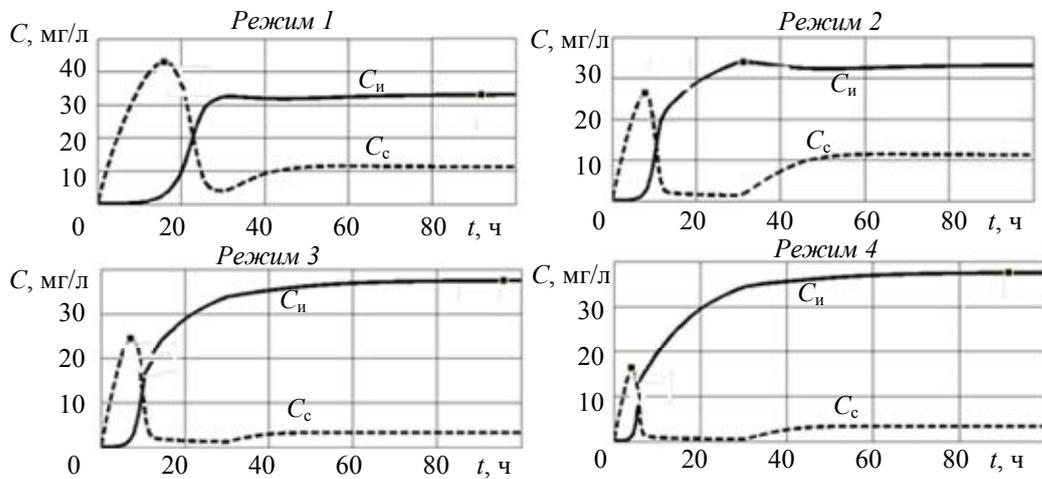


Рис. 4

Модель Кенейла описывает процесс роста активного ила, состоящего из бактерий и простейших, в условиях поглощения субстрата. При моделировании принимались следующие допущения: активный ил — совокупность чистых культур бактерий и простейших; влияние температуры на скорость подачи кислорода и эффект насыщения простейших не учитываются.

Модель Кенейла с учетом температурного фактора представляется как [6]

$$\frac{dC_c}{dt} = \frac{C_c^{BX} - C_c}{T} - \frac{\mu_{\max}^{20^\circ\text{C}} e^{\gamma(\theta-20)} C_c C_b}{Y(K_c + C_c)},$$

$$\frac{dC_b}{dt} = -\frac{C_b}{T} + \frac{\mu_{\max}^{20^\circ\text{C}} e^{\gamma(\theta-20)} C_c C_b}{K_c + C_c} - \frac{f_{\max}^{20^\circ\text{C}} e^{\gamma(\theta-20)} C_n C_b}{g(K_b + C_b)},$$

$$\frac{dC_n}{dt} = -\frac{C_n}{T} + \frac{f_{\max}^{20^\circ\text{C}} e^{\gamma(\theta-20)} C_n C_b}{g(K_b + C_b)},$$

где C_b — концентрация бактерий; C_n — концентрация простейших; K_b — константа полунасыщения бактерий; $f_{\max}^{20^\circ\text{C}}$ — максимальная скорость роста бактерий при 20°C ; g — коэффициент трансформации бактерий в простейшие.

Моделирование проводилось $\mu_{\max}^{20^\circ\text{C}} = 0,49 \text{ ч}^{-1}$, $f_{\max}^{20^\circ\text{C}} = 0,15 \text{ ч}^{-1}$, $Y = 0,55$, $K_c = 29 \text{ ч}^{-1}$, $K_b = 8 \text{ ч}^{-1}$, $T = 15 \text{ ч}$, $g = 0,15$.

На рис. 5 и 6 приведены переходные процессы $C_c(t)$, $C_b(t)$ и $C_{II}(t)$ при уменьшении температуры в моменты времени $t_1 = 20$ ч и $t_2 = 30$ ч соответственно.

$t_1=20$ ч

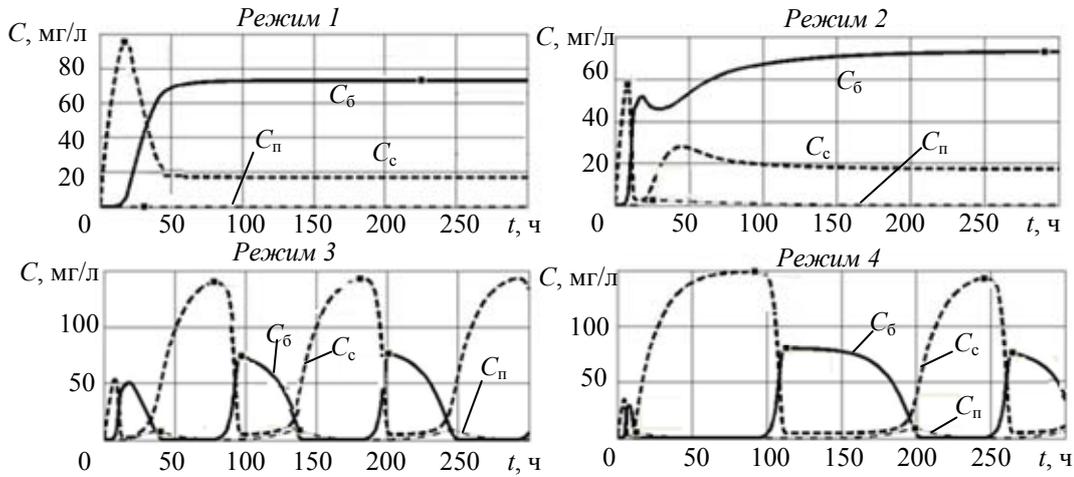


Рис. 5

$t_2=30$ ч

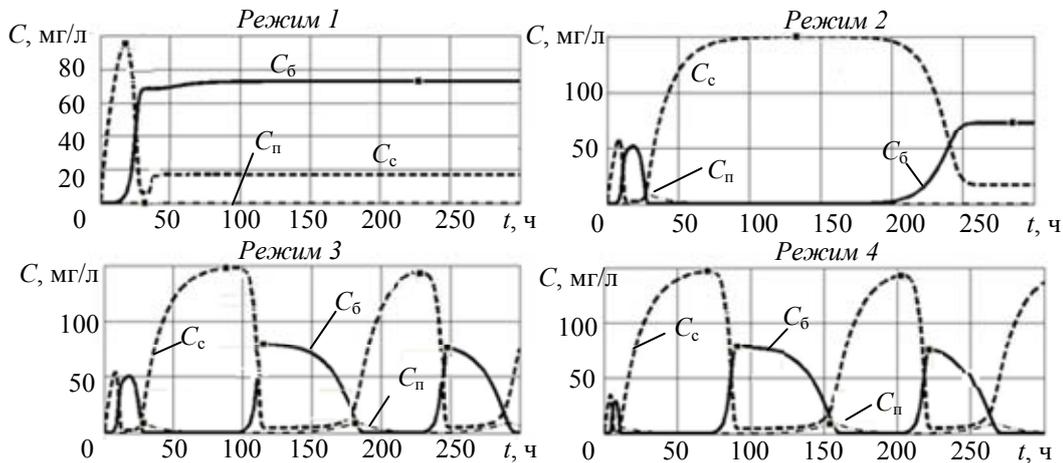


Рис. 6

Анализ графиков показывает, что негативное влияние температуры особенно проявляется при режимах 3 и 4. Напротив, наилучшая очистка обеспечивается при режиме 1. Режим 2 чувствителен к моменту снижения температуры и при $t = 30$ ч процессы носят колебательный характер. Наибольшее значение C_c увеличилось на 62 %, при этом наибольшее значение C_b изменилось незначительно. При режимах 3 и 4 процессы характеризуются колебаниями, что соответствует состоянию модели „хищник — жертва“, причем с повышением температуры период колебаний увеличивается. Таким образом, можно сделать вывод, что при более сложном составе ила влияние температуры проявляется нелинейно. Существует узкий диапазон, в котором обеспечивается оптимальный рост каждой из культур.

Заключение. Анализ показал значительную чувствительность базовых моделей к изменениям температуры внешней среды. Для каждой из моделей были выявлены температурные режимы, на которых достигается наилучший уровень очистки. Полученные результаты могут быть использованы при разработке моделей более высокого порядка, а также положены в основу при управлении температурой с целью повышения эффективности биоочистки. Уточнение границ температурных режимов требует дальнейших исследований для каждой из культур активного ила.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Monod J.* Rechercher sur la croissance des cultures bacteriennes (Thèse Doctorat ès Sciences Naturelles). Paris: Herman et Cie, 1942. 210 p.
2. *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. N 1. 37 p.
3. *Хенце М., Армозс П., Ля-Кур-Янсен Й., Арван Э.* Очистка сточных вод. М.: Мир, 2009. 480 с.
4. *Вавилин В. А., Васильев В. Б.* Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом. М.: Наука, 1979. 118 с.
5. *Haldane J. B. S.* Enzymes. London: Longmans, 1930. 235 p.
6. *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.
7. *Фролов Ю. П., Розенберг Г. С.* Управление биологическими системами. Надорганизменный уровень. Самара: Изд-во Самар. ун-та, 2002. 191 с.
8. *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.
9. *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.
10. *Яковлев С. В., Карюхина Т. А.* Биохимические процессы в очистке сточных вод. М.: Стройиздат, 1980. 200 с.
11. *Canale R. P.* Predator-prey relationships in a model for activated process // Biotech Bioeng. 1969. Vol. 11, N 5. P. 887—907.

Сведения об авторах

- Елизавета Камаловна Грудяева** — канд. техн. наук; 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
- Ольга Игоревна Капулина** — студентка; СПбГЭТУ „ЛЭТИ“; кафедра автоматки и процессов управления; E-mail: kapulinaolga@gmail.com

Рекомендована кафедрой
систем управления и информатики
НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
21.03.17 г.

Ссылка для цитирования: *Грудяева Е. К., Душин С. Е., Капулина О. И.* Влияние внешних факторов на управляемые биохимические процессы очистки сточных вод // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 9. С. 891—897.

**THE INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS
ON CONTROLLED BIOCHEMICAL SEWAGE TREATMENT PROCESSES**

E. K. Grudyaeva, S. E. Dushin, O. I. Kapulina

*St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI", 197022, St. Petersburg, Russia
E-mail: kapulinaolga@gmail.com*

Non-linear mathematical models of biochemical wastewater treatment with activated sludge are developed. The proposed approach is based on the dynamic models by Monod, Haldane, and Canales, with environment temperature considered as the influencing external factor. The development of biocenosis takes place in a confined space of the reactor under certain technological limitations and assumptions. Dependence of the growth rate of microorganisms on the temperature of the environment is based on the empirical Van't Hoff equation. Results of model calculations are presented for four temperature regimes, change of regime is performed by gradual increase and subsequent decrease in temperature to the set values. The families of graphs of transient processes of substrate and active sludge concentrations under various temperature conditions are demonstrated. Optimal temperature conditions corresponding to the most favorable conditions for the development of biocenosis of activated sludge and providing the most effective purification are

determined. The simulation results confirm the sensitivity of the system to temperature changes. The obtained results are recommended to account for in analysis of nitrification and denitrification models, which are characterized by higher dynamic orders, and in design of a control system to improve water quality and reduce the time spent on biological treatment.

Keywords: sewage disposal, activated sludge, models by Monod, Haldane, and Canales, external environment temperature

Data on authors

- Elizaveta K. Grudyaeva** — PhD; St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI"; Department of Automation and Control Processes; E-mail: lizayo@yandex.ru
- Sergey E. Dushin** — Dr. Sci., Professor; St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI"; Department of Automation and Control Processes; E-mail: dushins@yandex.ru
- Olga I. Kapulina** — Student; St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI"; Department of Automation and Control Processes; E-mail: kapulinaolga@gmail.com

For citation: Grudyaeva E. K., Dushin S. E., Kapulina O. I. The influence of external factors on controlled biochemical sewage treatment processes. *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 9. P. 891—897 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-9-891-897