

УДК 628.35:661.5

Расчет сооружений биологической очистки сточных вод с удалением биогенных элементов

В. Н. ШВЕЦОВ¹, К. М. МОРОЗОВА²

¹ Швецов Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, руководитель отдела, ОАО «НИИ ВОДГЕО» 119435, Россия, Москва, Б. Саввинский пер., 9, стр. 1, тел.: (499) 245-96-33, e-mail: vst@aha.ru

² Морозова Ксения Михайловна, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, ОАО «НИИ ВОДГЕО» 119435, Россия, Москва, Б. Саввинский пер., 9, стр. 1, тел.: (499) 272-47-54, e-mail: vodgeo@inbox.ru

Представлена методика расчета сооружений биологической очистки сточных вод с нитри-денитрификацией. Расчет сооружений биологической очистки должен производиться на основе экспериментально полученных кинетических констант, коэффициентов процессов нитрификации и денитрификации и по каждому лимитирующему показателю в зависимости от требований, предъявляемых к качеству очистки. Приведены кинетические константы и коэффициенты, необходимые для расчета очистных сооружений городских сточных вод. Изложен алгоритм расчета, включающий следующие этапы: обоснование исходных данных по расходам и качественному составу сточных вод в соответствии с требуемой степенью надежности (обеспеченностью не менее 85–90%); выбор технологической схемы работы сооружений – количество ступеней и (или) стадий, порядок и схема их работы; определение кинетических констант уравнений ферментативной кинетики трансформации каждого из основных компонентов загрязне-

ний по экспериментальным данным или на основе имеющейся базы данных; предварительный расчет количества избыточного активного ила и уточнение материального баланса по азоту и фосфору; определение лимитирующего компонента загрязнений, на окисление которого потребуется наибольшее время; расчет объема сооружений по лимитирующему компоненту с определением степени очистки по другим компонентам загрязнений. Результаты длительных экспериментальных исследований процессов нитри-денитрификации с различными видами городских и производственных сточных вод позволяют дополнить метод расчета аэротенков, заложенный в СНиП 2.04.03-85, формулами и данными для расчета и оптимизации работы аэротенков с удалением соединений азота и фосфора.

Ключевые слова: сточные воды, биологическая очистка, нитрификация, денитрификация, кинетические константы, активный ил.

В основу расчета аэротенков в СНиП 2.04.03-85 [1] положена многократно проверенная и научно обоснованная методика, базирующаяся на фундаментальных уравнениях ферментативной кинетики и материальном балансе всех трансформируемых компонентов сточных вод.

На момент выхода СНиП отсутствовали формулы и кинетические данные для процессов нитрификации и денитрификации, что затрудняло

расчет сооружений биологической очистки с нитри-денитрификацией. Более поздние обширные исследования НИИ ВОДГЕО, проведенные на лабораторных и пилотных установках на различных городских и производственных сточных водах, имеющих разный состав, а также обследование действующих сооружений с обработкой большого массива данных позволили восполнить этот недостаток и подготовить полноцен-

ную методику расчета аэротенков с удалением биогенных элементов. Разработанная технология очистки сточных вод от органических загрязнений и соединений азота защищена патентами РФ № 2210549 и 2351551 [2; 3].

Удаление соединений азота и фосфора из сточных вод биологическим методом является весьма эффективным, но одним из наиболее сложных технологических процессов. Это связано с тем, что в пределах одного сооружения необходимо сбалансированно осуществить четыре различных, но тесно взаимосвязанных между собой процесса – окисление органических веществ, окисление азота аммонийного до нитритов и нитратов, восстановление нитритов и нитратов до молекулярного азота за счет окисления органического вещества, поглощение ортофосфатов, преобразование последних в полифосфаты и накопление их в клетках активного ила. При этом каждая стадия процесса требует своих условий для реализации и имеет различные кинетические характеристики.

Математическая модель процессов биологической очистки сточных вод основана на анализе уравнений ферментативной кинетики трансформации загрязнений сточных вод и связывает между собой характеристики исходной и очищенной воды, концентрацию растворенного кислорода, концентрацию активного ила и его прирост [4; 5]. Модель позволяет рассчитывать сложные технологические схемы биологической очистки с учетом концентрации активного ила и растворенного кислорода (формулы 48 и 49, пункт 6.141 СНиП 2.04.03-85). На базе модели разработаны основы проектирования и расчета

сооружений биологической очистки городских и производственных сточных вод, в том числе с использованием процессов нитри-денитрификации и биологической дефосфатации.

Обоснование адекватных исходных данных является одним из ключевых моментов при проектировании и расчете стабильно и надежно работающих сооружений. При обосновании исходных данных для расчета необходимо выполнять статистический анализ параметров сточной воды, поступающей на очистные сооружения за последние 2–3 года. Результаты статистической обработки представляются в виде гистограмм частоты вариаций, которые позволяют установить частоту и диапазон вариации, а также определить расчетные (исходные) концентрации загрязнений при требуемой (85–90%) обеспеченности стабильной работы сооружений биологической очистки.

На рис. 1 приведена обобщенная гистограмма частоты вариаций концентрации органических загрязнений по ХПК в сточной воде на примере очистных сооружений канализации одного из крупных городов. Из графика видно, что концентрации органических веществ по ХПК в исходной сточной воде колеблются в диапазоне от 60 до 375 мг/л. Наибольшая частота вариаций 28,6% находится в диапазоне концентраций 125–200 мг/л, при этом среднестатистическая концентрация составляет 183 мг/л. При 85-процентной обеспеченности расчетная ХПК сточной воды составит 250 мг/л. Это означает, что при выборе в качестве расчетной среднестатистической концентрации (183 мг/л) в 35% случаев будет иметь место превышение расчетной

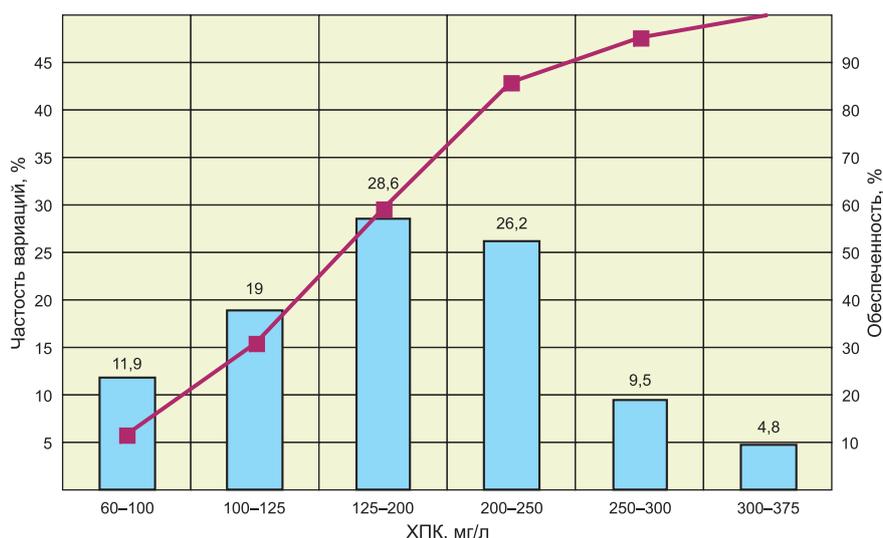


Рис. 1. Обобщенная гистограмма частоты вариаций концентрации органических загрязнений по ХПК

■ частота вариаций; —■ обеспеченность

концентрации, и сооружение будет работать с перегрузкой. При выборе в качестве расчетной концентрации, например, с 85-процентной обеспеченностью (250 мг/л) превышение будет иметь место лишь в 15% случаев, и сооружение будет работать более стабильно.

Аналогичные гистограммы следует строить для всех основных расчетных показателей качественного состава сточной воды, в том числе и соединений азота и фосфора.

Расчет объема зон нитрификации и денитрификации в аэротенке обязательно должен производиться с учетом органического азота, который в процессе аммонификации переходит в аммонийный азот.

Одним из основных условий при формировании технологической схемы биологической очистки сточных вод с нитри-денитрификацией является значение соотношения БПК_{полн} к общему азоту (по N) не менее 4:1. Расчет сооружений биологической очистки производится по показателю БПК_{полн}, а не БПК₅. Показатель БПК₅ не является мерой содержания в сточной воде биологически окисляемых органических загрязнений, а соответствует только некоторой доле органических веществ, которая может быть окислена при определенных условиях и зависит от многих факторов (температуры, степени адаптации, разбавления, концентрации микроорганизмов и т. д.). Только для очищенной воды показатель БПК₅ может быть близок к БПК_{полн}.

Технологический расчет процессов нитри-денитрификации требует определения объема зон нитрификации и денитрификации при поддержании баланса между трансформируемыми формами соединений азота и окислением органического вещества на каждой стадии обработки. При этом обеспечивается заданная степень очистки сточной воды по всем диктующим компонентам (БПК, азот аммонийный, азот нитратный). В связи с этим время пребывания в зоне дефосфатации должно составлять (при обработке слабokonцентрированных сточных вод) 20–30 мин, при большем времени пребывания увеличивается глубина распада органических загрязнений и нарушается баланс БПК/N_{общ}, необходимый для стадии денитрификации.

Время пребывания сточной воды в аэробной зоне (зоне нитрификации) аэротенка рассчитывается как на удаление БПК, так и на нитрификацию. Объем аэробной зоны выбирается по большему значению, а затем уточняется степень очистки по второму компоненту.

Расчет времени пребывания (час) в зоне нитрификации (и зоне денитрификации) произво-

дится с учетом органического азота и убыли азота с избыточным активным илом и взвешенными веществами.

$$T_{\text{нитр(денитр)}} = \frac{N_{\text{общ.вх}} - N_{\text{амм(нитрат+нитрит)вых}} - N_{\text{изб.ил}} - N_{\text{в.в}}}{\rho_{\text{нитр(денитр)}} C_{\text{ил}} (1-s)}, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{нитр(денитр)}}$ – удельная скорость нитрификации (или денитрификации), мг/(г·ч); $N_{\text{общ.вх}}$ – концентрация азота общего в исходной сточной воде, мг/л, равная суммарной концентрации азота аммонийного, органического азота, азота нитратов и нитритов ($N_{\text{амм.вх}} + N_{\text{орг.вх}} + N_{\text{нитрат.вх}} + N_{\text{нитрит.вх}}$); $N_{\text{амм.вых}}$ – концентрация азота аммонийного в очищенной воде, мг/л; $N_{\text{(нитрат+нитрит)вых}}$ – концентрация азота нитратного и нитритного (при денитрификации) в очищенной воде, мг/л; $N_{\text{изб.ил}}$ – концентрация азота, удаляемого с избыточным активным илом, мг/л; $N_{\text{в.в}}$ – концентрация азота, удаляемого со взвешенными веществами, мг/л; $C_{\text{ил}}$ – концентрация ила, г/л; s – зольность ила, доли единицы.

При составлении материального баланса следует учитывать, что содержание азота в активном иле варьирует в диапазоне 6–12%. Анализ активного ила аэротенков очистных сооружений городских сточных вод ряда городов РФ показал, что в нем содержится в среднем до 8% белкового азота (по N), поэтому с избыточным илом на городских очистных сооружениях может удаляться не менее 5 мг/л азота в зависимости от прироста активного ила. При этом с избыточным активным илом будет также удаляться от 1,5 до 2,5 мг/л фосфора в зависимости от эффективности процессов дефосфатации и денитрификации.

В связи с этим первоначально при расчете вместимости сооружений необходимо определить количество избыточного активного ила ($P_{\text{изб.ил}}$, кг/сут):

$$P_{\text{изб.ил}} = P_i Q, \quad (2)$$

где P_i – прирост активного ила в аэротенках, кг/м³; Q – расход сточных вод, м³/сут.

Прирост активного ила надлежит определять по формуле 60 (пункт 6.148, СНиП 2.04.03-85):

$$P_i = K_{\text{в.в}} C_{\text{в.в}} + K_g L_{\text{en}},$$

где $K_{\text{в.в}}$, K_g – коэффициенты прироста определяются экспериментально для каждого вида сточной воды либо путем обработки данных эксплуатации конкретного объекта, либо по данным аналогичного объекта.

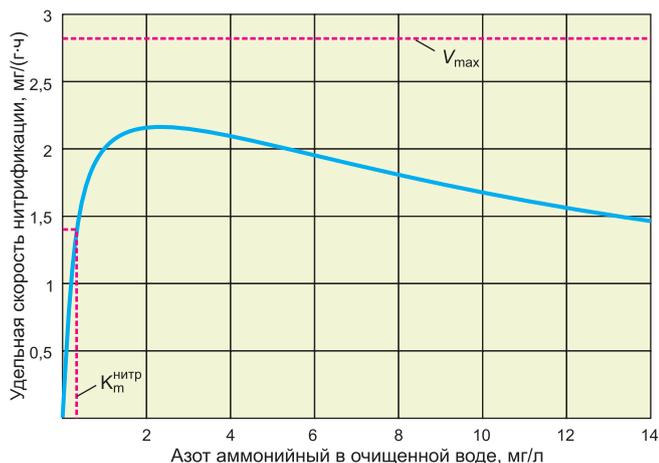


Рис. 2. Кинетика нитрификации

Для определения удельной скорости окисления органического вещества, азота аммонийного или денитрификации используются кинетические константы и коэффициенты уравнений ферментативной кинетики, полученные на основании обработки данных эксплуатации действующих очистных сооружений или экспериментальных исследований на реальной сточной воде. При невозможности получить такие сведения (отсутствие реальных сточных вод) следует использовать данные аналогичных объектов.

Кинетика нитрификации по усредненным показателям ряда очистных сооружений городов РФ представлена на рис. 2. Ход кривой показывает, что при концентрации азота аммонийного в очищенной воде свыше 4 мг/л последний тормозит процесс нитрификации, и зависимость удельной скорости нитрификации от концентрации азота аммонийного описывается уравнением ферментативной кинетики для случая торможения субстратом:

$$\rho_{\text{нитр}} = \frac{V_{\text{max}}^{\text{нитр}} N_{\text{амм.вых}}}{N_{\text{амм.вых}} + K_m^{\text{нитр}} + (N_{\text{амм.вых}}^2 / K_m^{\text{нитр}} \alpha)}, \quad (3)$$

где $\rho_{\text{нитр}}$ – удельная скорость нитрификации, мг/(г·ч); $V_{\text{max}}^{\text{нитр}}$ – максимальная скорость окисления азота аммонийного, мг/(г·ч); $N_{\text{амм.вых}}$ – концентрация азота аммонийного в очищенной воде, мг/л; $K_m^{\text{нитр}}$ – константа Михаэлиса, концентрация субстрата, при которой $\rho_{\text{нитр}} = 1/2 V_{\text{max}}^{\text{нитр}}$, мг/л; α – константа торможения, с увеличением α степень торможения снижается.

Усредненные кинетические константы процесса нитрификации (рис. 2): максимальная удельная скорость нитрификации $V_{\text{max}}^{\text{нитр}}$ (по азоту) 2,8 мг/(г·ч), $K_m^{\text{нитр}} = 0,35$ мг/л, $\alpha = 45$ (для дозы активного ила 2,5–3,5 г/л).

Обработка данных эксплуатации ряда станций аэрации и собственных исследований, про-

веденных на лабораторных и пилотных установках с реальной сточной водой, позволили получить усредненную зависимость удельной скорости окисления от концентрации органических загрязнений по БПК в очищенной воде (рис. 3).

Кинетика окисления органических загрязнений, оцениваемых по БПК, описывается уравнением [4; 5]:

$$\rho = V_{\text{max}} \frac{S}{S + K_m}, \quad (4)$$

где ρ – удельная скорость окисления, мг/(г·ч); V_{max} – максимальная скорость окисления, мг/(г·ч); S – концентрация органических веществ в очищенной воде, мг/л.

Усредненные кинетические константы окисления органических загрязнений (рис. 3): максимальная удельная скорость $V_{\text{max}} = 17$ мг/(г·ч), $K_m = 7$ мг/л для дозы активного ила 2,5–3,5 г/л.

Для определения удельной скорости денитрификации может быть использована усредненная

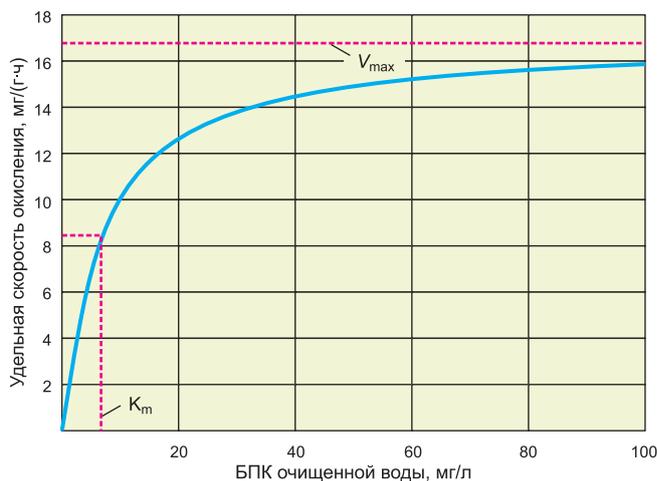


Рис. 3. Кинетика окисления органических загрязнений по БПК

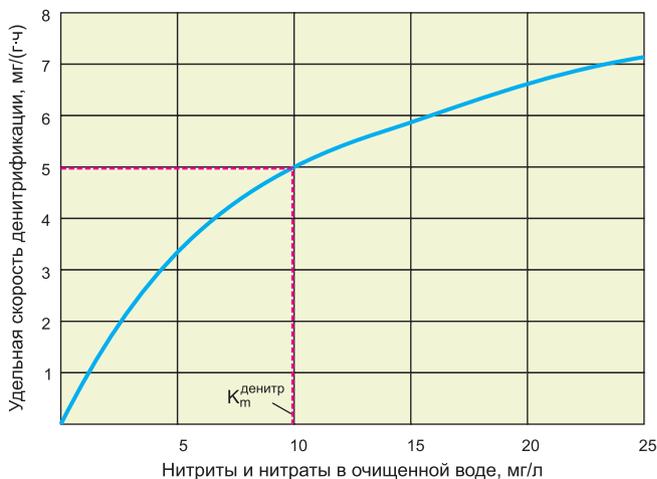


Рис. 4. Кинетика денитрификации $V_{\text{max}}^{\text{денитр}} = 10$ мг/(г·ч), $K_m^{\text{денитр}} = 10$ мг/л

кинетическая зависимость, полученная экспериментально для сточных вод городов Ельца, Астаны и ряда других (рис. 4). Кинетика денитрификации описывается уравнением (4) без торможения субстратом.

Перечисленные кинетические константы и коэффициенты позволяют рассчитать параметры и режим работы аэротенков с реализацией в них технологии нитри-денитрификации до любой заданной степени очистки по органическим загрязнениям и соединениям азота.

Проведенные технологические расчеты по всем основным загрязняющим ингредиентам показывают, что, как правило, лимитирующим показателем при расчете зоны нитрификации аэротенка в случае обработки городских сточных вод является азот аммонийный.

Одним из основных расчетных параметров циклических схем является степень рециркуляции иловой смеси между зонами нитрификации и денитрификации, влияющая на эффективность удаления соединений азота [5]. Степень рециркуляции $R_{\text{нитр-денитр}}$ рассчитывается по уравнению материального баланса с учетом времени денитрификации, дозы ила, удельной скорости денитрификации и концентраций азота нитратного и нитритного в исходной и очищенной воде по формуле:

$$R_{\text{нитр-денитр}} = \frac{(T_{\text{денитр}} \rho_{\text{денитр}} C_{\text{ил}}) - N_{\text{нитрат.вых}}}{N_{\text{нитрат.вых}}}, \quad (5)$$

где $T_{\text{денитр}}$ – время пребывания в зоне денитрификации, ч; $\rho_{\text{денитр}}$ – удельная скорость денитрификации, мг/(г·ч); $N_{\text{нитрат.вых}}$ – концентрация азота нитратного в исходной сточной воде, мг/л; $N_{\text{нитрат.вых}}$ – концентрация азота нитратного в очищенной воде, мг/л; $C_{\text{ил}}$ – концентрация ила, г/л.

Алгоритм расчета аэротенков включает следующие этапы:

обоснование релевантных (адекватных) исходных данных по расходам и качественному составу сточных вод в соответствии с требуемой степенью надежности (обеспеченностью не менее 85–90%);

выбор технологической схемы работы сооружений – количество ступеней и (или) стадий, порядок и схема их работы;

определение кинетических констант уравнений ферментативной кинетики трансформации каждого из основных компонентов загрязнений (азот аммонийный, азот нитритный и нитратный, органические вещества по БПК_{полн}, нефтепродукты и другие специфические компоненты) по экспериментальным данным или на основе имеющейся базы данных;

предварительный расчет количества избыточного активного ила и уточнение материального баланса по азоту и фосфору;

определение лимитирующего компонента загрязнений, на окисление которого потребуется наибольшее время;

расчет объема всех технологических зон сооружений по лимитирующему компоненту с определением степени очистки по другим компонентам загрязнений.

Выводы

Результаты длительных экспериментальных исследований процессов нитри-денитрификации с различными видами городских и производственных сточных вод позволяют дополнить метод расчета, заложенный в СНиП 2.04.03-85, формулами и данными для расчета и оптимизации работы аэротенков с удалением соединений азота и фосфора. Разработанная программа позволяет на основе кинетических уравнений и уравнений материального баланса произвести технологический расчет всех стадий процесса, оптимизировать схему нитри-денитрификации, рассчитать оптимальные параметры циркуляционных потоков, обеспечить высокую надежность работы сооружений и высокую степень биологической очистки сточных вод от органических загрязнений и соединений азота при соблюдении современных требований на сброс как в канализацию, так и в водоем. Эта модель испытана на большом числе объектов и используется при расчете и проектировании циркуляционных циклических схем удаления соединений азота и фосфора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения.
2. Пат. 2210549, РФ. МПК С 02 F. Способ очистки сточных вод от органических соединений и азота / Швецов В. Н., Морозова К. М., Нечаев И. А., Пушников М. Ю. // Изобретения. Полезные модели. 2003. № 23.
3. Пат. 2351551, РФ. МПК С 02 F. Способ очистки сточных вод от органических соединений, азота и фосфора / Швецов В. Н., Морозова К. М., Киристаев А. В., Смирнова И. И. // Изобретения. Полезные модели. 2009. № 10.
4. Яковлев С. В., Скирдов И. В., Швецов В. Н. и др. Биологическая очистка производственных сточных вод: Процессы, аппараты и сооружения. – М.: Стройиздат, 1985. 208 с.
5. Морозова К. М. Принципы расчета систем биологической очистки сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. 2009. № 1. С. 26–31.

WASTEWATER TREATMENT

Procedure of designing wastewater biological treatment facilities with nutrients removal

V. N. SHVETSOV¹, K. M. MOROZOVA²

¹ Shvetsov Valerii Nikolaevich, Doctor of Engineering, Professor, Chief of department, «NII VODGEO» OJSC
Build. 1, 9 B. Savvinskii lane, 119435 Moscow, Russia, tel.: +7 (499) 245-96-33, e-mail: vst@aha.ru

² Morozova Kseniia Mikhailovna, PhD (Engineering), Chief research officer, «NII VODGEO» OJSC
Build. 1, 9 B. Savvinskii lane, 119435 Moscow, Russia, tel.: +7 (499) 272-47-54, e-mail: vodgeo@inbox.ru

The procedure of designing wastewater biological treatment facilities with nitrification-denitrification is presented. Biological treatment facilities shall be designed on the basis of experimentally determined kinetic constants, nitrification and denitrification process factors, and for every limiting value depending on the requirements to the quality of treatment. Kinetic constants and factors required for designing municipal wastewater treatment facilities are given. Design algorithm is set out including the following stages: substantiation of the initial data on flow rates and qualitative wastewater composition according to the required level of reliability (more than 85–90% probability); selection of the process flow scheme – number of steps and(or) stages, operation procedure and lay out; determination of kinetic constants of equations of enzyme kinetics of every basic pollution component transformation from experimental data or from the available data base; preliminary calculation of excess activated sludge volume and adjustment of nitrogen and phosphorus mass balance; determination of limiting pollution component that needs maximum time to be oxidized; calculation of the facility capacity by limiting component with determination of the treatment level for other pollution components. The results of the long-term experimental studies of nitrification-denitrification processes with different types of municipal and industrial wastewater provide for supplementing the method of aeration tank design specified in SNiP 2.04.03-85 with formulae and data for design and optimization of aeration tank operation with nitrogen and phosphorus removal.

Key words: wastewater, biological treatment, nitrification, denitrification, kinetic constants, activated sludge.

REFERENCES

1. SNiP 2.04.03-85. *Kanalizatsiia. Naruzhnye seti i sooruzheniia* [SNiP 2.04.03-85. Sewerage. Public Utilities]. (In Russian).
2. Pat. 2210549, RF. MPK C 02 F. *Sposob ochistki stochnykh vod ot organicheskikh soedinenii i azota* [Patent 2210549, RF. IPC C 02 F. Method of eliminating organic compounds and nitrogen from wastewater] Shvetsov V. N., Morozova K. M., Nechaev I. A., Pushnikov M. Iu. *Izobreteniia. Poleznye Modeli*, 2003, no. 23. (In Russian).
3. Pat. 2351551, RF. MPK C 02 F. *Sposob ochistki stochnykh vod ot organicheskikh soedinenii, azota i fosfora* [Patent 2351551, RF. IPC C 02 F. Method of eliminating organic compounds, nitrogen and phosphorus from wastewater] Shvetsov V. N., Morozova K. M., Kiristaev A. V., Smirnova I. I. *Izobreteniia. Poleznye Modeli*, 2009, no. 10. (In Russian).
4. Iakovlev S. V., Skirdov I. V., Shvetsov V. N., et al. *Biologicheskaiia ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod: Protsessy, apparaty i sooruzheniia* [Biological treatment of industrial wastewater: Processes, equipment and facilities]. Moscow, Stroizdat Publ., 1985, 208 p. (In Russian).
5. Morozova K. M. *Printsipy rascheta sistem biologicheskoi ochistki stochnykh vod* [Principles of calculation of biological treatment systems]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2009, no. 1, pp. 26–31. (In Russian).