



DOI: 10.15593/2224-9826/2018.3.10

УДК 628.35

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОБРАБОТКИ СТОЧНЫХ ВОД В АЭРОТЕНКАХ ПО РАЗЛИЧНЫМ МЕТОДИКАМ

Л.В. Бартова, М.А. Авдеева, Я.С. Луферчик

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 22 января 2018

Принята: 25 апреля 2018

Опубликована: 28 сентября 2018

Ключевые слова:

водоотведение, очистные сооружения, сточные воды, биологическая очистка, аэротенк, период аэрации, скорость биохимического окисления, скорость роста микроорганизмов.

АННОТАЦИЯ

В процессе биологической очистки сточных вод извлекаются органические примеси, а также соединения азота и фосфора. Математическая модель биологической очистки связывает между собой исходные и конечные концентрации компонентов, дозу основного реагента – активного ила, продолжительность обработки сточных вод, скорость процесса. При проектировании аэротенков основным определяемым параметром является требуемая продолжительность процесса, так как именно по этому параметру, наряду с расходом обрабатываемых сточных вод, определяется необходимый объем реактора для реализации процесса. На сегодняшний день учеными разработан большой ряд методик расчета сооружений биологической очистки; тем не менее ни одна из них не закреплена в действующих нормативных документах в качестве обязательной. Проектировщики, применяя какую-либо методику, всю ответственность за будущую работу очистной станции берут на себя. Поэтому актуальной задачей является анализ существующих методик расчета основного сооружения биологической очистки – аэротенка, а также определение оптимальных областей их применения.

В данной статье рассмотрены существующие методы расчета аэротенка. Классифицированы существующие методики, отмечены достоинства и недостатки каждой группы методик. Выполнен анализ двух методик: «по скорости биологического окисления органических соединений» и «по скорости роста микроорганизмов – нитрификаторов». Представлены результаты расчета основных параметров работы аэротенка: скорости биохимического процесса и продолжительности обработки сточных вод, полученные по этим методикам. Обе исследованные методики не учитывают влияния исходных концентраций извлекаемых компонентов на скорость биохимического процесса. Начальные концентрации учитываются только при расчете необходимой продолжительности биологической обработки сточных вод. Для сточных вод, близких по своим характеристикам к среднестатистическим городским, подходит более простая, унифицированная методика расчета по скорости биохимического процесса. В других случаях необходимо применение более сложной, но точной методики расчета по скорости роста микроорганизмов. Результаты расчета хорошо согласуются с данными эксплуатации действующих очистных станций.

© ПНИПУ

© Бартова Людмила Васильевна – кандидат технических наук, доцент, e-mail: lbartova@mail.ru.

Авдеева Марина Андреевна – студентка, e-mail: avdeeva.marina.93@gmail.com.

Луферчик Ядвига Сергеевна – студентка, e-mail: Jadviga1994@mail.ru.

Ludmila V. Bartova – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: lbartova@mail.ru.

Marina A. Avdeeva – Student, e-mail: avdeeva.marina.93@gmail.com.

Jadviga S. Lufchik – Student, e-mail: Jadviga1994@mail.ru.

DETERMINATION OF THE DURATION OF WASTEWATER TREATMENT IN AEROTANKS BY DIFFERENT METHODS

L.V. Bartova, M.A. Avdeeva, Ja.S. Luferschik

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 22 January 2018
Accepted: 25 April 2018
Published: 28 September 2018

Keywords:

sewerage, treatment facilities, wastewater, biological treatment, aeration tank, the period of aeration, the rate of biochemical oxidation, the growth rate of microorganisms.

ABSTRACT

Organic impurities as well as nitrogen and phosphorus compounds are extracted during biological wastewater treatment. The mathematical model of biological treatment relates the initial and final concentrations of components, the dose of the main reagent – activated sludge, the duration of wastewater treatment, the speed of the process. In the design of aerotanks, the main determinable parameter is the required duration of the process, because it is for this parameter, along with the flow of treated wastewater, the necessary volume of the reactor for the process is determined. Nowadays scientists have developed a large number of methods for calculating biological treatment facilities; however, none of them is not fixed in the existing regulations as mandatory. Designers, applying any technique, take full responsibility for the future work of the treatment plant. Therefore, an urgent task is the analysis of existing calculation methods of the basic construction of biological treatment – aeration tank, as well as the determination of the optimal fields of their application.

This article considers the existing methods of calculating the aeration tank. Classification of existing methods is carried out, advantages and disadvantages of each group of methods are marked. The analysis of two methods: «on the rate of biological oxidation of organic compounds» and «growth rate of microorganisms – nitrifiers». The results of the calculation of the main parameters of aerotank: the rate of biochemical process and the duration of wastewater treatment, performed by these methods. Both methods do not take into account the influence of initial concentrations of extracted components on the rate of biochemical process. Initial concentrations are taken into account only when calculating the required duration of biological wastewater treatment. A simpler, unified method for calculating the rate of biochemical process is suitable for wastewater close to the «average» urban wastewater characteristics. In other cases, it is necessary to use a more complex but accurate method of calculating the growth rate of microorganisms. The calculation results are in good agreement with the operating data of the operating treatment plants.

© PNRPU

Как и для любого процесса очистки воды или сточных вод, математическая модель биологической очистки связывает между собой исходные и конечные концентрации компонентов, дозы подаваемых реагентов, продолжительность обработки сточных вод, скорость процесса. В большинстве случаев основным определяемым параметром является необходимая продолжительность процесса, так как именно по этому параметру, наряду с расходом обрабатываемых сточных вод, определяется необходимый объем реактора для реализации процесса. При проектировании сооружений биологической очистки сточных вод расчетными параметрами являются концентрации органических соединений, определяемые показателем БПК, а также концентрации биогенных элементов – азота и фосфора. Реагентами процесса служат активный ил (рабочая микрофауна) и воздух. Скорость процесса является величиной, зависимой от многих параметров: состава очищаемых сточных вод, требуемой степени очистки, количества и режима подачи воздуха, количества и состава активного ила.

В настоящее время отсутствует узаконенная и обязательная к применению методика расчета основного сооружения биологической очистки – аэротенка. Методы расчета аэротенков, предлагаемые в нормативных документах (СНиП 2.04.03–85, СП 32.13330.2012) и в научных статьях [1–8], носят только рекомендательный характер. Возможно, это свя-

зано с их несовершенством: в ряде статей отмечается, что сооружения биологической очистки, рассчитанные по существующим методикам, работают недостаточно эффективно [2, 3].

Важным достоинством любой методики является оптимальное соотношение двух факторов – универсальности и достаточной степени точности расчетов. Вероятно, большинство существующих методик этого оптимума не обеспечивает. В сложившихся условиях проектировщики, выбирая методику расчета сооружений биологической очистки, всю ответственность за их будущую работу вынуждены брать на себя. Поэтому интересно и актуально выявить оптимальные области применения существующих методик, ограничения в применении отдельных методик, достоинства и недостатки каждой из них.

Анализ научных работ, посвященных данному вопросу, позволил подразделить все существующие методики на две группы.

К первой группе относятся методики, базирующиеся на рекомендациях СНиП 2.04.03–85, в качестве основных расчетных показателей используются скорость окисления органических соединений ρ (мг/г·ч) и скорость окисления аммонийного азота ρ_{ni} (мг/г·ч).

СНиП 2.04.03–85 в качестве исходной расчетной величины предлагает скорость окисления органических соединений. В статьях [4–6] предлагается вести расчет по скорости окисления лимитирующего соединения, т.е. того, для окисления которого необходима большая продолжительность обработки сточных вод. Для городских сточных вод таким лимитирующим показателем обычно является аммонийный азот. Величины скоростей биохимического окисления, указанные в СНиП 2.04.03–85 и статьях, определены на основе обширных статистических и экспериментальных данных, т.е. для некоего обобщенного, среднестатистического состава сточных вод. Сведения статей [4–6] хорошо согласуются с данными СНиП 2.04.03–85.

Вторая группа методик применяет показатель «скорость биохимического окисления» не прямо, а опосредованно, через ряд других параметров биологической очистки. В разных методиках перечень и количество этих параметров различаются. В связи с этим вторую группу методик можно разделить на две подгруппы:

1. Методики, где количество параметров относительно невелико и возможен «ручной» расчет, только с применением компьютерных программ общего назначения. В качестве примеров можно привести методику справочного пособия «Проектирование сооружений для очистки сточных вод», Техническое руководство по расчету аэрационных систем ATV (Германия), Китайский национальный стандарт H576–2010 (Китай)¹. В качестве основных расчетных параметров в кинетические уравнения исследуемых процессов входят удельная скорость роста микроорганизмов μ (сут⁻¹) и связанный с ней возраст ила θ (сут). В расчете учитывается влияние на процесс конкретного состава сточных вод и внешних условий: pH и температуры сточных вод, концентрации растворенного кислорода, содержания токсичных примесей. Качество ила в моделях процесса учитывается физиологическими коэффициентами.

¹ Справочное пособие к СНиП 2.04.03–85. Проектирование сооружений для очистки сточных вод. М.: Стройиздат, 1990.

ATV «Bemessung Von einstufigen Belebungsanlagen ab 5000 Einwohnerwerten». Düsseldorf, 1991.

Technical Specifications for Anaerobic-Anoxic-Oxic Activated Sludge Process HJ576-2010 / Китайские национальные экологические стандарты. 2010.

2. Методики с использованием большого ряда исходных параметров, расчет по которым возможен только с применением специализированных программных продуктов. В качестве примера можно привести пока единственную отечественную программу компьютерного моделирования биологической очистки сточных вод – «ЭкоСим 3Р» [8], разработанную на основе моделей активного ила ASM Международной водной ассоциации [9]. Также в России получили распространение зарубежные программные комплексы BioWin [10, 11] и GPS-X² [12]. Данные продукты позволяют моделировать множество технологических процессов очистки сточных вод на основе моделей активного ила ASM1, ASM2d, ASM3 [9].

Применение специализированных компьютерных программ позволяет учесть влияние на процесс очистки многих параметров. Кроме уже названных величин, в качестве расчетных используются концентрации разных групп микроорганизмов: гетеротрофов, автотрофов, фосфат-аккумулирующих микроорганизмов, концентрации отмершей биомассы (по группам) и взвешенных веществ, а также скорость отмирания микроорганизмов k_d (сут⁻¹). При этом расчетные скорости реакций окисления отдельных примесей определяются в соответствии с фракциями ХПК, формами азота и фосфатов и относятся к концентрациям соответствующих групп микроорганизмов.

Количество учитываемых факторов, влияющих на процесс очистки, – важный показатель методики. Но главным показателем все же является наличие или отсутствие в составе методики математических моделей извлечения всех основных биогенных элементов – углерода, азота и фосфора. Тем не менее методики «ручного» расчета ориентированы на извлечение только органических примесей и соединений азота. Уравнения, отражающие кинетику удаления фосфора и кинетические параметры процесса, в методиках не приводятся. Дело в том, что биологическое извлечение фосфора по своим параметрам: оптимальному возрасту ила, кислородному режиму и др. – значительно отличается от процесса удаления соединений азота. При «ручном» расчете эти параметры сложно согласовать, трудно подобрать оптимальную схему очистки и циркуляции технологических потоков. Поэтому, с учетом уровня экологической опасности элементов, составлены математические модели только процесса удаления азота. СП 32.13330.2012 «Канализация. Наружные сети и сооружения» не требует вести расчет аэротенков по кинетической модели удаления фосфора, а требует только определять предельную эффективность биологического удаления фосфора в принятых условиях процесса. Возможная степень извлечения соединений фосфора определяется проектировщиками обычно по статистическим данным работы аналогичных очистных сооружений. В отличие от «ручных» методик, в большинстве специализированных компьютерных программ представлены и согласованы между собой математические модели извлечения всех основных примесей бытовых сточных вод: органических примесей, соединений азота и фосфора.

Несомненно, перспектива – за компьютерными технологиями расчета. Благодаря большому количеству учитываемых факторов обеспечивается высокая точность расчета, возможность запроектировать сооружения для конкретного расхода и состава сточных вод. Программы дают возможность просчитать эффект очистки при колебаниях исходных показателей сточных вод, при разных вариантах проектных решений, в частности при разных схемах циркуляции водно-иловых потоков. Тем не менее нельзя не учитывать и недостатки методик, основанных на компьютерном расчете. Это сложность и/или технологическая

² GPS-X Technical reference. Hydramantis, Inc. Versions: 5.0, 6.0. 2006, 301 p.; 2011, 350 p.

невозможность получения большого количества исходных параметров для расчета, особенно в лабораториях реальных очистных станций, отсутствие оборудования и реактивов, отсутствие продолжительной многофакторной статистики работы действующих станций – аналогов проектируемых очистных сооружений, высокая (для многих очистных станций – недоступная) стоимость программного продукта.

В связи с этим в ряде случаев является обоснованным, а иногда необходимым, применение методик, основанных на «ручном» расчете. Основным достоинством этих методик является унификация расчета: в качестве исходных величин для проектирования принимаются параметры, полученные обобщением данных работы большого количества очистных станций. Расчет по этим методикам проще, так как допускает значительно меньшее количество исходных расчетных параметров. Тем не менее унификация обычно предполагает определенную неточность расчетов, что ограничивает область применения данных методик.

Целью данного проектного исследования является сравнительный анализ методик расчета сооружений биологической очистки на примере двух очистных станций:

– канализационные очистные сооружения города с удельным водоотведением 250 л/сут·чел. Сточные воды близки по составу к бытовым. Концентрации извлекаемых примесей: БПК₂₀ = 195 мг/л, аммонийный азот – 43 мг/л. Показатели, оказывающие влияние на процесс очистки: реакция среды – слабощелочная, температура – 18 °С, токсичные примеси отсутствуют (расчетный объект № 1);

– канализационные очистные сооружения небольшого поселка с удельным водоотведением 120 л/сут·чел. Показатели бытовых сточных вод: БПК₂₀ = 380 мг/л, концентрация аммонийного азота – 70 мг/л, реакция среды – нейтральная, температура – 14 °С, производственные сточные воды поступают только от предприятий общественного питания, токсичные примеси отсутствуют (расчетный объект № 2).

Сброс сточных вод обоих объектов производится в водоемы рекреационного назначения.

Расчет каждого объекта выполнялся по двум методикам:

– методика, основанная на положениях СНиП 2.04.03–85, с изменениями и дополнениями [4–6] – метод расчета А;

– методика справочного пособия «Проектирование сооружений для очистки сточных вод», адаптированная для расчета схем с циркуляцией водно-иловой смеси [7] – метод расчета Б.

$$t_{at} = \frac{C_{en} - C_{ex}}{a_i \cdot (1 - S) \cdot \rho}, \quad (1)$$

где C_{en} и C_{ex} – соответственно начальная и конечная концентрация компонента до и после биологической очистки, мг/л; a_i – концентрация (доза) ила в сооружении, г/л; S – зольность ила; ρ – удельная скорость биохимического окисления компонента, мг/г·ч.

Скорости окисления органических соединений и аммонийного азота по формулам СНиП 2.04.03–85 и данным [4–6] составляют соответственно 8,2 мг/г·ч и 2,1 мг/г·ч.

По справочному пособию к СНиП 2.04.03–85 «Проектирование сооружений для очистки сточных вод» удельная скорость окисления органических веществ в аэротенке-нитрификаторе определяется по экспериментальной формуле:

$$\rho = 3,7 + 0,0417 \cdot 864 / \theta, \quad (2)$$

где численные составляющие – это физиологические показатели активного ила, характерного для городских сточных вод; θ – возраст активного ила – величина, обратная удельной скорости роста микроорганизмов-нитрификаторов μ_{ni} (сут⁻¹).

При определении этого показателя учитывается конкретный состав сточных вод:

$$\mu_{ni} = K_{pH} \cdot K_T \cdot K_O \cdot K_{токс} \cdot K_N \cdot 1,77. \quad (3)$$

В формуле (3) 1,77 – максимальная скорость роста нитрифицирующих микроорганизмов (сут^{-1}), возможная в оптимальных для ила условиях; понижающие коэффициенты учитывают отличие реальных условий от оптимальных, соответственно: pH и температуру сточных вод, концентрацию растворенного кислорода в аэротенке, наличие токсикантов и требуемую конечную концентрацию аммонийного азота.

Результаты расчетов, полученные для сточных вод с разными концентрациями основных примесей и разными внешними условиями процесса, представлены в таблице. Результаты расчета хорошо согласуются со статистическими данными эксплуатации действующих очистных станций.

Анализ методик показывает, что на результаты расчета влияют две группы параметров:

- условия протекания процесса, в основном: активная реакция сточных вод pH, их температура, наличие или отсутствие токсикантов;
- начальные концентрации извлекаемых примесей в сточных водах.

Параметры работы аэротенков
The parameters of the aeration tanks

Параметры процесса	Результаты расчета объектов			
	№ 1		№ 2	
	по методу А	по методу Б	по методу А	по методу Б
Средняя удельная скорость окисления органических примесей	8,2	7,3	8,2	5,1
Необходимая продолжительность обработки сточных вод $t_{об}$, ч	14,2	15,9	28	45
Доза ила в сооружении $a_i = 2,5 \dots 3$ г/л; концентрация растворенного кислорода $C_o = 2$ мг/л				

Анализ влияния на расчет условий протекания процесса. Для объекта № 1 – городских сточных вод – результаты расчета по двум методикам практически совпадают (разница составляет около 10 %). Это значит, что условия протекания процесса очистки близки к среднестатистическим, для которых характерна скорость процесса, заложенная в методике А. Действительно, понижающие коэффициенты, учитывающие влияние реальных условий процесса очистки, включенные в методику Б, для данных показателей сточных вод были близки к 1.

Показатели сточных вод поселка (объект № 2): pH, температура и др. – заметно отличались от среднестатистических городских (объекта № 1); коэффициенты, учитывающие их влияние в формуле для определения скорости биопроцесса, были значительно меньше 1. Это сказалось на результате расчета: скорость биохимического процесса очистки сточных вод № 2, определенная по методике Б, в 1,6 раза меньше данного показателя, вычисленного по методике А. Соответственно, требуемая продолжительность обработки этих вод по методике Б в 1,6 раза больше, чем по методике А.

Анализ влияния на расчет начальных концентраций извлекаемых примесей. По обеим методикам скорости процессов определяются вне зависимости от начальных концентраций извлекаемых примесей. Продолжительность обработки, определяемая по формуле (1),

с учетом низких остаточных концентраций очищенных сточных вод, находится практически в прямо пропорциональной зависимости от начальных концентраций. Тем не менее известно, что график снижения БПК и аммонийного азота в процессе аэрации представляет собой не прямую линию, а гиперболу. В начальный период аэрации скорость окисления весьма велика, особенно если обработке подвергаются сточные воды с высокими начальными концентрациями. Поэтому средние за весь период аэрации скорости окисления, по логике, должны для высококонцентрированных сточных вод быть несколько выше, чем для воды «среднестатистического» состава, за счет начального периода высоких скоростей. В рассматриваемом примере таким является период снижения концентраций объекта № 2: БПК – с 400 до 200 мг/л, аммонийного азота – с 70 до 40 мг/л. За счет начального периода высоких скоростей реально требуемая продолжительность обработки сточных вод несколько ниже расчетной. Точный учет данного фактора позволил бы уменьшить объем аэротенка, но, с другой стороны, некоторый запас объема увеличивает надежность работы системы.

Выводы

1. Перспективными являются компьютерные технологии расчета. Представляется, что путями совершенствования компьютерных методик на сегодняшний день являются:

- оптимизация программ, создание программ, учитывающих реальное состояние лабораторной базы действующих очистных станций;
- адаптация иностранных программ к условиям России;
- унификация программ с выявлением оптимального набора параметров расчета;
- понижение стоимости программного продукта.

2. При невозможности использования специализированных программных продуктов вполне допустимо применение «ручного» расчета, только с применением компьютерных программ общего назначения. Результаты расчета хорошо согласуются со статистическими данными эксплуатации действующих очистных станций.

Для сточных вод, близких к среднестатистическим бытовым по составу примесей, определяющих внешние условия процесса: рН – слабощелочная (8,2–8,6), температура – 18–20 °С, отсутствие токсикантов, хорошо подходит несложная унифицированная методика расчета по скорости биохимического процесса.

Если эти показатели заметно отличаются от указанных «стандартных», например из-за наличия в стоках специфических производственных примесей, то необходимо применять более точные методики, учитывающие эти отличия. Одной из таких методик является расчет по справочному пособию к СНиП 2.04.03–85, рассмотренный в настоящей статье. Скорость биохимического процесса, вычисленная по «многофакторной» методике, ниже, чем по «универсальной». Значит, требуемая продолжительность очистки и, следовательно, объем аэротенка должны быть больше.

3. Исходные концентрации извлекаемых компонентов на выбор методики расчета не влияют, так как они не входят в формулы определения скоростей биопроцесса ни в одной из рассмотренных методик. Необходимая продолжительность биологической обработки сточных вод находится практически в прямо пропорциональной зависимости от исходных концентраций извлекаемых компонентов.

Библиографический список

1. Эпов А.Н., Канунникова М.А. Разработка типовых решений по автоматизации процессов биологической очистки сточных вод с совместным удалением азота и фосфора // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2014. – № 3. – С. 40–54.
2. Эпов А.Н., Канунникова М.А. Сравнение методик расчета сооружений с биологическим удалением азота и фосфора и применение математического моделирования // Вода и экология: проблемы и решения. – 2016. – № 1 (65). – С. 3–14.
3. Эпов А.Н., Канунникова М.А. Сравнение методик расчета сооружений с биологическим удалением азота и фосфора и применение математического моделирования // Вода и экология: проблемы и решения. – 2016. – № 2 (66). – С. 65–80.
4. Швецов В.Н., Морозова К.М. Расчет сооружений биологической очистки сточных вод с удалением биогенных элементов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2013. – № 11. – С. 42–47.
5. Морозова К.М. Принципы расчета систем биологической очистки сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. – 2009. – № 1. – С. 26–31.
6. Расчет сооружений биологической очистки сточных вод по схеме нитри-денитрификации / В.Н. Швецов, К.М. Морозова, К.В. Домнин, Е.Е. Архипова // Водоснабжение и санитарная техника. – 2012. – № 7. – С. 53–58.
7. Бартова Л.В. Расчет аэротенков с циркуляцией водно-иловой смеси по методике проектирования прямоточных систем аэрации // Естественные и технические науки. – 2015. – № 11. – С. 576–581.
8. Есин М.А. Смирнов А.В. Современные методики расчета сооружений биологической очистки // Водоснабжение и санитарная техника. – 2015. – № 10. – С. 17–26.
9. Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3 / M. Henze, W. Gujer, T. Mino, M. van Loosdrecht. – London: IWA Publishing, 2000. – 128 с.
10. Повышение эффективности биологического удаления соединений азота и фосфора на очистных сооружениях канализации / П.В. Трунов, С.В. Лунин, Е.В. Чуев, В.Ю. Павлова // Водоснабжение и санитарная техника. – 2010. – № 9. – С. 4–7.
11. Лунин С.В., Прохорова И.В., Павлова В.Ю. Модернизация и реконструкция очистных сооружений канализации МУП «Водоканал» города-курорта Анапы // Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. – № 9, ч. 1. – С. 67–71.
12. Баженов В.И., Эпов А.Н., Носкова И.А. Использование комплексов имитационного моделирования для технологий очистки сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. – 2014. – № 2. – С. 62–71.
13. The eawag Bio-P module for activated sludge model no. 3 / L. Rieger, G. Koch, M. Kuhn, W. Gujer, H. Siegrist // Water Research. – 2001. – № 35 (16).
14. Enhanced biological phosphorus removal and its modeling for the activated sludge and membrane bioreactor processes / M.F.R. Zuthi, W.S. Guo, H.H. Ngo, L.D. Nghiem, F.I. Hai // Bioresource Technology. – 2013. – № 139. – С. 363–374.

References

1. Epov A.N., Kanunnikova M.A. Razrabotka tipovykh reshenii po avtomatizatsii protsessov biologicheskoi ochistki stochnykh vod s sovmestnym udaleniem azota i fosfora [Development of standard solutions for automation of processes of biological wastewater treatment with joint removal of nitrogen and phosphorus.]. *Best available techniques, journ.*, 2014, no. 3, pp. 40-54.

2. Epov A.N., Kanunnikova M.A. Sravnenie metodik rascheta sooruzhenij s biologicheskim udaleniem azota i fosfora i primenenie matematicheskogo modelirovaniya [Comparison of structural analysis methods of nitrogen/phosphorus biological removal plants with mathematical modeling application]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*, 2016, no. 1 (65), pp. 3-27.
3. Epov A.N., Kanunnikova M.A. Sravnenie metodik rascheta sooruzhenij s biologicheskim udaleniem azota i fosfora i primenenie matematicheskogo modelirovaniya [Comparison of structural analysis methods of nitrogen/phosphorus biological removal plants with mathematical modeling application]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya*, 2016, no. 2 (62), pp. 65-78.
4. Shvetsov V.N., Morozova K.M. Raschet sooruzhenij biologicheskoy ochistki stochnyh vod s udaleniem biogennyh elementov [Procedure of designing wastewater biological treatment facilities with nutrients removal]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tehnika*, 2013, no. 11, pp. 42-47.
5. Morozova K.M. Principy rascheta sistem biologicheskoy ochistki stochnyh vod [Principles of Calculation of Biological Wastewater Treatment Systems]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tehnika*, 2009, no. 1, pp. 26-31.
6. Shvetsov V.N., Morozova K.M., Domnin K.V., Arkhipova E.E. Raschet sooruzhenij biologicheskoy ochistki stochnyh vod po sheme nitri-denitrifikacii [Designing nitrification-denitrification retrofit at the biological treatment facilities]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tehnika*, 2012, no. 7, pp. 53-58.
7. Bartova L.V. Raschet ajerotenkov s cirkuljaciej vodno-illovoj smesi po metodike proektirovaniya prjamotochnyh sistem ajeracii [Calculation of aeration tanks with the circulation of water-sludge mixture by the method of designing direct flow aeration systems]. *Estestvennye i tehnicheckie nauki*, 2015, no. 11, pp. 576-581.
8. Esin M.A., Smirnov A.V. Sovremennye metodiki rascheta sooruzhenij biologicheskoy ochistki [Advanced methods of designing biological treatment facilities]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tehnika*, 2015, no. 10, pp. 17-26.
9. Henze M., Gujer W., Mino T., van Loosdrecht M. Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. London, IWA Publishing, 2000, 128 p.
10. Trunov P.V., Lunin S.V., Chuev E.V., Pavlova V.Iu. Povyshenie jeffektivnosti biologicheskogo udaleniya soedinenij azota i fosfora na ochistnyh sooruzheniyah kanalizacii [Enhancement of efficiency of biological removal of nitrogen and phosphorus compounds at wastewater treatment facilities]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2010, no. 9, pp. 4–7.
11. Lunin S.V., Prokhorova I.V., Pavlova V.Iu. Modernizaciya i rekonstrukciya ochistnyh sooruzhenij kanalizacii MUP «Vodokanal» goroda-kurorta Anapy [Modernization and reconstruction of sewage treatment facilities of the Municipal Unitary Enterprise «Vodokanal» of the city-resort of Anapa]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2011, no. 9, p. 1, pp. 67–71.
12. GPS-X Technical reference. Hydramantis, Inc. Versions: 5.0, 6.0. 2006, 301 p.; 2011, 350 p.
13. Rieger L., Koch G., Kuhni M., Gujer W., Siegrist H. The eawag Bio-P module for activated sludge model no. 3. *Water Research*, 2001, no 35 (16).
14. Zuthi M.F.R., Guo W.S., Ngo H.H., Nghiem L.D., Hai F.I. Enhanced biological phosphorus removal and its modeling for the activated sludge and membrane bioreactor processes. *Bio-resource Technology*, 2013, no. 139, pp. 363–374.