

ГЛУБОКАЯ ОЧИСТКА ХОЗЯЙСТВЕННО-БЫТОВЫХ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ И СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА НА БИОФИЛЬТРАХ

Ольга Викторовна Февральских

Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ–РГГРУ); г. Москва, Российская Федерация

В статье рассматривается возможность использования биофильтров как основных сооружений биологической очистки хозяйственно-бытовых сточных вод с достижением качества очищенной воды, соответствующей нормативам сброса в водные объекты рыбохозяйственного назначения. Существует ряд преимуществ данных сооружений: скоростное изъятие загрязняющих веществ, энергоэффективность в связи с отсутствием необходимости принудительной аэрации и небольшое по сравнению с другими очистными сооружениями количество биомассы. Биофильтры достаточно эффективны в условиях периодического поступления сточной воды. Для проведения исследований отобраны современные загрузки, изготовленные из полимерных материалов. Исследования проводились в лабораторных и полупроизводственных условиях. Эксперимент по разработке технологии глубокой биологической очистки сточных вод от органических загрязнений и соединений азота на биофильтрах был разделен на 3 основных этапа. На 1-м этапе исследовалась лабораторная модель, представляющая собой 2 биофильтрационных реактора: зону денитрификации и нитрификации и вторичный отстойник с поступлением искусственно составленной сточной воды. На 2-м этапе исследовалась модель с 4 зонами с использованием искусственно составленной сточной воды, а на 3-м — с 4 зонами биофильтрации, но на реальной сточной воде. Глубокое удаление соединений азота и органических загрязнений наблюдается как на классической схеме нитрификации–денитрификации, так и на обратной. Отмечается стабильное протекание процессов нитрификации–денитрификации в схемах с рециркуляцией нитратной воды. Предложенный расчет биофильтров состоит из двух частей: отдельно рассчитываются объемы анаэробной и аэробной зон. Расчет аэробной зоны предложен для загрузочного материала цилиндрической формы. Методика математического моделирования аэробных зон нитрификации в биофильтрах основывается на решении уравнения материального баланса массы субстрата для относительно неограниченного участка тонкого активного слоя биопленки для загрузочного материала цилиндрической формы. Для расчета зон денитрификации следует воспользоваться полученными значениями скорости удаления нитратов и временем пребывания воды в зоне денитрификации.

Ключевые слова: биофильтр, азот аммонийный, нитрификация, денитрификация, расчет биофильтров

Для цитирования: Февральских О.В. Глубокая очистка хозяйственно-бытовых сточных вод от органических загрязнений и соединений азота на биофильтрах // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2025. № 1. С. 104–110. DOI: 10.22227/2311-1518.2025.1.104-110

DEEP TREATMENT OF DOMESTIC WASTEWATER FROM ORGANIC CONTAMINANTS AND NITROGEN COMPOUNDS USING BIOFILTERS

Olga V. Fevral'skikh

Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze (MGRI–RGGRU); Moscow, Russian Federation

The article discusses the possibility of using biofilters as the main structures for the biological treatment of household wastewater to achieve the quality of purified water that meets the standards for discharge into fishery water bodies. There are a number of advantages of these facilities — rapid removal of pollutants, energy efficiency due to the absence of the need for forced aeration, and a small amount of biomass compared to other treatment facilities. Biofilters are quite effective in conditions of periodic influx of wastewater. Modern loads made of polymer materials were selected for research. The studies were carried out in laboratory and semi-production conditions. The experiment to develop a technology for deep biological treatment of wastewater from organic pollutants and nitrogen compounds using biofilters was divided into 3 main stages. At the 1st stage, a laboratory model was studied, which represented 2 biofiltration reactors - a denitrification and nitrification zone and a secondary settling tank with the supply of artificially composed wastewater. At stage 2, a model with 4 zones was studied using artificially composed wastewater, and at stage 3, with 4 biofiltration zones, but using real wastewater. Deep removal of nitrogen compounds and organic contaminants is observed both in the classical scheme of nitrification — denitrification and in the reverse. There is a stable occurrence of nitrification-denitrification processes in schemes with recirculation of nitrate water. The proposed calculation of biofilters consists of two parts: the volumes of anoxic and

aerobic zones are calculated separately. Calculation of the aerobic zone is proposed for a cylindrical loading material. The method of mathematical modeling of aerobic nitrification zones in biofilters is based on solving the equation of material balance of substrate mass for a relatively unlimited area of a thin active layer of biofilm for a cylindrical loading material. To calculate denitrification zones, you should use the obtained values for the rate of nitrate removal and the residence time of water in the denitrification zone.

Keywords: biofilter, ammonium nitrogen, nitrification, denitrification, calculation of biofilters

For citation: Fevralskikh O.V. Deep treatment of domestic wastewater from organic contaminants and nitrogen compounds using biofilters. *Biosphere Compatibility: Man, Region, Technology*. 2025; 1:104-110. DOI: 10.22227/2311-1518.2025.1.104-110 (rus.).

Введение

Биофильтр — это сооружение, в котором сточная вода проходит сквозь загрузочный материал с иммобилизированной на нем биопленкой. Наибольший рост проектирования и строительства биофильтров приходился на конец прошлого века [1–3]. В настоящее время биофильтры практически не проектируются и не строятся, в лучшем случае речь идет о реконструкции действующих сооружений [4, 5]. Связано это с отсутствием наработанной практики расчетов и опыта эксплуатации сооружений в соответствии с современными требованиями, предъявляемыми к качеству очищенной воды.

Отмечается, что действующие канализационные очистные сооружения, в составе которых присутствуют биофильтры, как правило, обеспечивают проектное качество очистки.

Существует ряд преимуществ данных сооружений — скоростное изъятие загрязняющих веществ, энергоэффективность в связи с отсутствием необходимости принудительной аэрации и небольшое по сравнению с другими очистными сооружениями количество биомассы. Биофильтры достаточно эффективны в условиях периодического поступления сточной воды [6].

Опыт эксплуатации биофильтров и проведенные исследования говорят о достаточно стабильно протекающем процессе нитрификации в биофильтрах [7–9]. Однако возможность проведения процессов денитрификации в биофильтрах еще предстоит изучить. Таким образом, представляется целесообразным разработать технологию глубокой очистки сточных вод на биофильтрах с устройством зон нитрификации и денитрификации, а также разработать методику расчета. Возобновление использования биофильтров для очистки хозяйственно-бытовых сточных вод в качестве основных сооружений биологической очистки представляет большое значение для народного хозяйства; реконструкция действующих сооружений с возможностью достижения современных нормативов, предъявляемых к очищенной воде, позволит существенно экономить ресурсы за счет сокращения затрат на электроэнергию, на строительство новых сооружений, отсутствия необходимости выделения земли под строительство и т.д.

рификации и денитрификации, а также разработать методику расчета. Возобновление использования биофильтров для очистки хозяйственно-бытовых сточных вод в качестве основных сооружений биологической очистки представляет большое значение для народного хозяйства; реконструкция действующих сооружений с возможностью достижения современных нормативов, предъявляемых к очищенной воде, позволит существенно экономить ресурсы за счет сокращения затрат на электроэнергию, на строительство новых сооружений, отсутствия необходимости выделения земли под строительство и т.д.

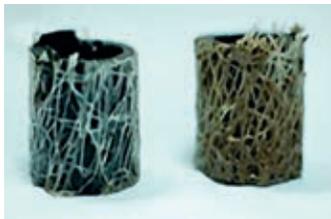
Материалы и методы

Для проведения исследований отобраны современные загрузки, изготовленные из полимерных материалов [10, 11]. Выбранные загрузочные материалы представлены в табл. 1. Пористости и величина удельной поверхности указаны в соответствии с данными, обозначенными производителем.

Схема проведенных экспериментов представлена на рис. 1. Эксперимент по разработке технологии глубокой биологической очистки сточных вод от органических загрязнений и соединений азота на биофильтрах был разделен на 3 основных этапа и один предварительный [12, 13].

Исследования проводились на искусственно составленной сточной жидкости (этап 1, 2) и реальной сточной воде (этап 3). Химический состав искусственной сточной воды был приближен к реальной хозяйственно-бытовой сточной воде, характерной для Московской области и для очист-

Таблица 1. Исследуемые полимерные загрузочные материалы

Загрузка, номер	1	2	3
Внешний вид			
Пористость, %	до 90	до 90	до 93
Удельная поверхность	2500 м ² /м ²	150 м ² /м ³	200 м ² /м ³

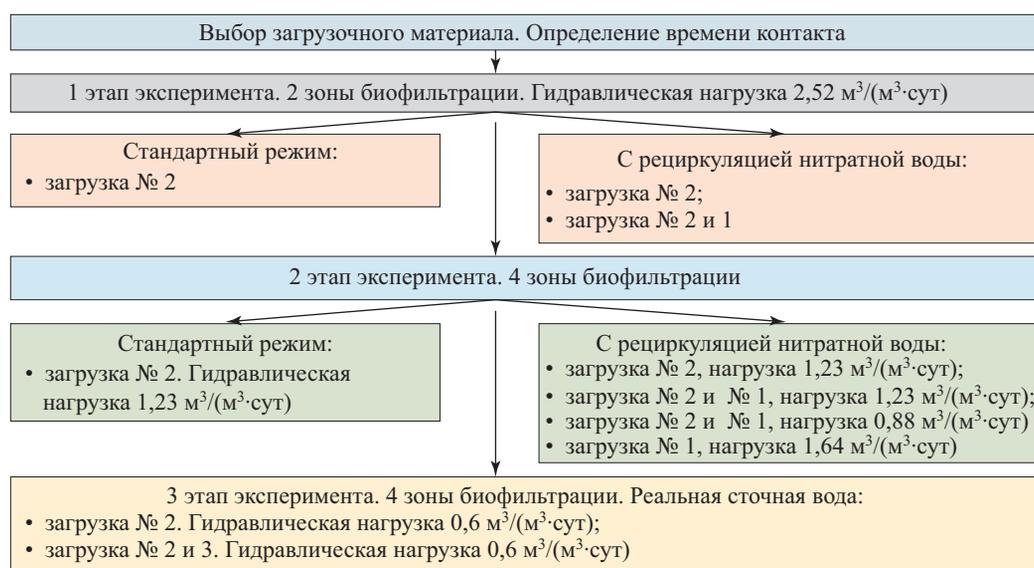


Рис. 1. Схема эксперимента

Таблица 2. Химический состав сточной воды

Концентрация, мг/л	Для искусственной сточной воды		Для реальной сточной воды	
	БПК ₅	N-NH ₄	БПК ₅	N-NH ₄
Максимальная	165,0	77,4	130	41,65
Минимальная	53,2	8,0	39	12,11
Средняя	97,3	24,2	81,3	26,39

ных сооружений средней мощности. Химический состав сточной воды представлен в табл. 2.

Количественные химические анализы проводились по стандартизированным методикам.

Глубокая очистка хозяйственно-бытовых сточных вод от соединений азота на биофильтрах

Для определения возможности проведения глубокой очистки сточных вод на биофильтрах исследования проводились поэтапно согласно схеме (рис. 1).

На первом этапе исследовалась лабораторная модель, работающая с 2 зонами биофильтрации: модельная сточная жидкость подавалась сначала в зону денитрификации, затем в зону нитрификации, после чего поступала во вторичный отстойник, где происходила седиментация биомассы. В режиме работы установки с рециркуляцией в объеме 100 % отмечается достаточно высокая эффективность удаления органических загрязнений — 90,9 %, однако максимальная окислительная мощность по азоту аммонийному при этом составляла 39,03 г/м³·сут, а процессы денитрификации не протекали вовсе.

На втором этапе исследовалась работа лабораторной модели с 4 зонами биофильтрации. Лабо-

раторная модель устраивалась путем добавления к имеющемуся лабораторному стенду второго модуля. То есть появляются две аналогичные ступени очистки, работающие по схеме первого этапа с предвключенной денитрификацией. В табл. 3 представлены результаты работы лабораторных установок на втором этапе.

Таким образом, наличие рециркуляции нитратной воды положительно сказывается на эффективности удаления загрязнений.

Отмечается, что на второй ступени проходила денитрификация. Следует отметить, что условия для прохождения реакции нитрификации–денитрификации на 2-й ступени сточная вода характеризуется низким содержанием БПК₅.

Для анализа процессов денитрификации используются показатели скорости удаления нитрата, на рис. 2 представлено изменение концентрации нитрата в пилотной установке по времени.

Скорость удаления нитрата для описанного случая составит 114 г/(м³·ч).

На третьем этапе проводились исследования, выполненные в полупроизводственных условиях на действующих очистных сооружениях Московской области. Третий этап также был разбит на два подэтапа. Этап 3.1 проводился по технологической схеме, описанной ранее с предвключенной денитрификацией и промежуточным отстаиванием на

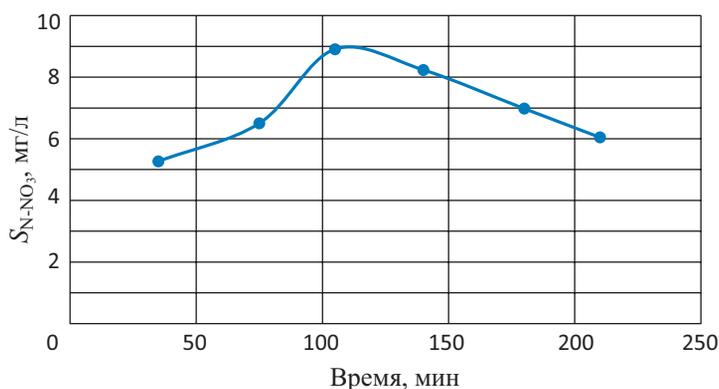


Рис. 2. Изменение концентрации N-NO₃ в пилотной установке с рециркуляцией нитратной воды и гидравлической нагрузкой 1,23 м³/м³·сут с загрузочным материалом № 1 и 2 в зависимости от времени пребывания

Таблица 3. Технологические показатели и результаты работы пилотных установок

Номер	Режим	Загрузка	Гидравлическая нагрузка, м ³ /м ³ ·сут	Эффективность удаления БПК ₅ , %	Эффективность удаления N-NH ₄ , %
2.1	Стандартный	№ 2	1,23	79,76	45,85
2.2	Рециркуляция 100 %	№ 2	1,23	96,84	97,27
2.3	Рециркуляция 100 %	№ 2 и 1	1,23	96,64	98,77
2.4	Рециркуляция 100 %	№ 2 и 1	0,88	97,59	99,45
2.5	Рециркуляция 100 %	№ 1	1,64	82,44	77,01

4 зонах биофильтрации, но уже на реальной сточной воде. Этап 3.2 проводился без промежуточного отстаивания на 4 зонах биофильтрации с предвключенной нитрификацией. Технологические показатели и результаты работы пилотных установок представлены в табл. 4.

Глубокое удаление соединений азота и органических загрязнений наблюдается как на схеме с постденитрификацией, так и на схеме с предвключенной денитрификацией. Отмечается стабильное протекание процессов нитрификации–денитрификации в схемах с рециркуляцией нитратной воды.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности проведения процессов денитрификации–нитрификации на биологических фильтрах и как следствие их широкого применения.

Расчет размеров биофильтров, работающих в режиме денитрификации и нитрификации

Существует несколько методик расчета биофильтров, наиболее популярный расчет по критери-

альному комплексу [1, 4, 15], но есть также и другие [14, 16]. Однако существующие методики расчета не предполагают использование биофильтров в качестве реакторов с проведением денитрификации–нитрификации. Поэтому предложен расчет, состоящий из двух частей: отдельно рассчитываются объемы аноксидной и аэробной зон. Расчет аэробной зоны предложен для загрузочного материала цилиндрической формы.

Методика математического моделирования аэробных зон нитрификации в биофильтрах основывается на решении уравнения материального баланса массы субстрата для относительно неограниченного участка тонкого активного слоя биопленки для загрузочного материала цилиндрической формы.

Для расчета скорости реакции при полном отсутствии ингибирующего процесса биоокисления используется уравнение Моно (принимается, что имеет место реакция первого порядка). В результате решения уравнений получена формула для расчета высоты биофильтра, которая предлагается для использования в процессе проектирования:

Таблица 4. Технологические показатели и результаты работы пилотных установок

Номер	Режим	Загрузка	Гидравлическая нагрузка, м ³ /м ³ ·сут	Эффективность удаления БПК ₅ , %	Эффективность удаления N-NH ₄ , %
3.1	Рециркуляция 100 %	№ 1 и 2	0,7	96,92	99,00
3.2	Рециркуляция 100 %	№ 2 и 3	0,6	96,41	99,47

$$H = \sqrt{\frac{v}{F_{\delta} \cdot K_L (1 - A)} \ln \frac{L_0}{L_H}}, \quad (1)$$

где v — скорость фильтрации, м/час; F_{δ} — эффективная площадь контакта очищаемой воды с биопленкой, м²; K_L — значение коэффициента массопереноса субстрата в жидкой пленке, м/час; A — параметр, зависящий от величины отношения скорости окисления к константе полунасыщения, коэффициента молекулярной диффузии субстрата в биопленке, толщины биопленки и радиуса загрузки; L_0 — концентрация загрязнения на входе, мг/л; L_H — концентрация загрязнения на выходе, мг/л.

Скорость фильтрации рекомендуется определять в ходе аппроксимации результатов экспериментов с загрузочным материалом степенной функцией.

Для этого предварительно производилось определение времени контакта воды с поверхностью загрузочного материала в биофильтре. Были определены зависимости времени пребывания воды в реакторе от гидравлической нагрузки.

В пилотную установку залповым сбросом поступал раствор концентрированного красителя, для определения изменения концентрации трассера в выходящей воде использовался фотоэлектродиметр.

По результатам были построены графики зависимости концентрации красителя от времени отбора пробы. Для определения времени контакта вычислялась площадь криволинейной трапеции, ее статический момент, а также центр тяжести.

Для расчета зон денитрификации следует воспользоваться полученными значениями скорости удаления нитратов и временем пребывания воды в зоне денитрификации (рис. 2).

Время пребывания, как правило, характеризуется высотой сооружения, а площадь поверхности следует

вычислить, используя гидравлическую нагрузку, применяемую в эксперименте, путем увеличения площади поверхности до необходимой гидравлической нагрузки.

Выводы

1. Биологические фильтры возможно использовать как основные сооружения глубокой биологической очистки сточных вод.
2. Применение технологии глубокой очистки сточных вод на биофильтрах с чередующимися аноксидными и аэробными зонами с рециркуляцией нитратной воды позволяет достичь высокой степени эффективности очистки и качества очищенной воды до современных нормативов по азоту аммонийному, нитритам, нитратам, БПК.
3. Экспериментально доказана возможность проведения денитрификации на биофильтрах, определены скорости процессов.
4. Предложен расчет зон нитрификации и денитрификации для биофильтров.

Заключение

Результаты экспериментальных и теоретических исследований, приведенные в данной работе, используются в основе разрабатываемой технологии глубокой биологической очистки сточных вод. Применение данной технологии позволяет достичь качества очищенной воды ниже нормативов сброса в водные объекты рыбохозяйственного назначения по соединениям азота и органическим загрязнениям. Приведенные расчеты позволят проектировать новые сооружения и производить реконструкцию существующих.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Воронов Ю.В., Залетова Н.А., Чембулатова Г.Ш. Биологические окислители // Вода и экология: проблемы и решения. 2016. № 3. С. 56–66. EDN XEHNED.
2. Поливанова Т.В., Уваркин А.В., Булгакова Е.С. Использование биофильтров для биологической очистки сточных вод // Перспективное развитие науки, техники и технологий. 2014. С. 283–286. EDN SZMISD.
3. Чеснокова М.Г., Комаров В.Ю. Очистка сточных вод с использованием биологических фильтров // Аллея науки. 2018. Т. 3. № 4 (20). С. 428–433. EDN ХОУАЕР.
4. Воронов Ю.В. К вопросу реконструкции биологических окислителей // Вестник МГСУ. 2011. № 8. С. 288–292. EDN PUMQKV.
5. Кулаков А.А. Оценка современного состояния малых коммунальных очистных сооружений канализации // Вода и экология: проблемы и решения. 2015. № 1. С. 26–40.
6. Янцен О.В., Гогина Е.С. Перспективные методы очистки сточных вод в туристических зонах // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2022. № 2 (38). С. 72–80. EDN KVVJJD. DOI: 10.21869/2311-1518-2022-38-2-72-80
7. Вдовина Т.В., Дмитриев А.С., Хасанова А.А., Кириллова Н.И., Кобелева Й.В., Сироткин А.С. Интенсификации процессов нитрификации в биофильтрах с использованием технологии биоаугментации // Актуальная биотехнология. 2019. № 3. С. 550–551. EDN ILMQXU.

8. Саломеев В.П. Глубокая очистка сточных вод в биореакторах с прикрепленной биомассой // Вода Magazine. 2016. № 5 (105). С. 38–43. EDN XHFHIT.
9. Саломеев В.П., Абдуллаев Ф.Ш. Совершенствование процессов глубокой очистки сточных вод на станциях биофильтрации // Естественные и технические науки. 2014. № 7 (75). С. 125–130.
10. Янцен О.В. Исследование гидродинамических характеристик биофильтра для плоскостного загрузочного материала // Вестник МГСУ. 2010. № 2. С. 144–148. EDN MUXQGH.
11. Gogina E.S., Yantsen O.A., Ruzhitskaya O.V. Research of Hydrodynamics of Biofilter with Surface Feed // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 580–583. Pp. 2354–2357. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.580-583.2354. EDN SKIWXD.
12. Янцен О.В., Гогина Е.С. Технология очистки сточных вод от соединений азота на биофильтрах // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 12. С. 60–64. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.12.60-64. EDN BVHEXK.
13. Янцен О.В. Современные решения по реконструкции малых канализационных очистных сооружений: конструкции и расчет // Водоснабжение и санитарная техника. 2019. № 9. С. 57–61. DOI: 10.35776/MNP/2019.09.08. EDN WSAORK.
14. Олейник А.Я., Кравчук А.Н., Колтакова О.А. Теоретическое обоснование очистки сточных вод на капельных биофильтрах // Доповіді Національної академії наук України. 2012. № 3. С. 179–184.
15. Мосин О.В. Расчет и проектирование биологических фильтров // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2013. № 7. С. 39–45.
16. Бобылева Т.Н., Шамаев А.С., Янцен О.В. Математическая модель фильтра для водоочистки с использованием биопленок // Сибирский журнал индустриальной математики. 2023. Т. 26. № 2 (94). С. 25–36. DOI: 10.33048/SIBJIM.2023.26.203. EDN XIGNQJ.

Об авторе: **Ольга Викторовна Февральских** — старший преподаватель кафедры строительства систем и сооружений водоснабжения и водоотведения; **Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе (МГРИ–РГГРУ)**; 117997, г. Москва, ГСП-7, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; e-mail: Yantsenov@bk.ru.

REFERENCES

1. Voronov Yu.V., Zaletova N.A., Chembulatova G.Sh. Biological oxidizers. *Water and ecology: problems and solutions*. 2016; 3:56-66. EDN XEHNED. (rus.).
2. Polivanova T.V., Uvarkin A.V., Bulgakova E.S. Use of biofilters for biological wastewater treatment. *Perspective development of science, technology and technologies*. 2014; 283-286. EDN SZMISD. (rus.).
3. Chesnokova M.G., Komarov V.Yu. Wastewater treatment using biological filters. *Alley of Science*. 2018; 3:4(20):428-433. EDN XOYAEP. (rus.).
4. Voronov Yu.V. On the issue of reconstruction of biological oxidizers. *Bulletin of MGSU*. 2011; 8:288-292. EDN PUMQKV. (rus.).
5. Kulakov A.A. Assessment of the current state of small municipal sewage treatment facilities. *Water and ecology: problems and solutions*. 2015; 1:26-40. (rus.).
6. Yantsen O.V., Gogina E.S. Promising methods of wastewater treatment in tourist areas. *Biospheric compatibility: people, region, technologies*. 2022; 2(38):72-80. EDN KVVJJD. DOI: 10.21869/2311-1518-2022-38-2-72-80 (rus.).
7. Vdovina T.V., Dmitriev A.S., Khasanova A.A., Kirillova N.I., Kobeleva Y.V., Sirotkin A.S. Intensification of nitrification processes in biofilters using bioaugmentation technology. *Current biotechnology*. 2019; 3:550-551. EDN ILMQXU. (rus.).
8. Salomeev V.P. Deep treatment of wastewater in bioreactors with attached biomass. *Water Magazine*. 2016; 5(105):38-43. EDN XHFHIT. (rus.).
9. Salomeev V.P., Abdullaev F.Sh. Improving the processes of deep wastewater treatment at biofiltration stations. *Natural and technical sciences*. 2014; 7(75):125-130. (rus.).
10. Yantsen O.V. Study of the hydrodynamic characteristics of a biofilter for planar loading material. *Vestnik MGSU*. 2010; 2:144-148. EDN MUXQGH. (rus.).
11. Gogina E.S., Yantsen O.A., Ruzhitskaya O.V. Research of Hydrodynamics of Biofilter with Surface Feed Research of Hydrodynamics of Biofilter with Surface Feed. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 580-583:2354-2357. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.580-583.2354. EDN SKIWXD.
12. Yantsen O.V., Gogina E.S. Technology of wastewater treatment from nitrogen compounds in biofilters. *Industrial and civil construction*. 2022; 12:60-64. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.12.60-64. EDN BVHEXK. (rus.).
13. Yantsen O.V. Modern solutions for the reconstruction of small sewerage treatment facilities: designs and calculations. *Water supply and sanitary technology*. 2019; 9:57-61. DOI: 10.35776/MNP/2019.09.08. EDN WSAORK. (rus.).

14. Oleinik A. Ya., Kravchuk A.N., Kolpakova O.A. Theoretical justification for wastewater treatment using drip biofilters. *Adoptions of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2012; 3:179-184.
15. Mosin O.V. Calculation and design of biological filters. *Plumbing, heating, air conditioning*. 2013; 7:39-45. (rus.).
16. Bobyleva T.N., Shamaev A.S., Yantsen O.V. Mathematical model of a filter for water treatment using biofilms. *Siberian Journal of Industrial Mathematics*. 2023; 26:2(94):25-36. DOI: 10.33048/SIBJIM.2023.26.203. EDN XIGNQJ. (rus.).

About the author: **Olga V. Fevralskikh** — Senior Lecturer at the Department of Construction of Water Supply and Sanitation Systems and Facilities; **Russian State Geological Prospecting University named after Sergo Ordzhonikidze (MGRI-RGGRU)**; GSP-7, 23 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117997, Russian Federation; e-mail: Yantsenov@bk.ru.