

УДК 628.35

© Ю. А. Феофанов, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: ufeofanov@rambler.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2023-20-4-100-107

© Yu. A. Feofanov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: ufeofanov@rambler.ru

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ПРИ РАБОТЕ БИОФИЛЬТРА В ПЕРИОДИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

STUDY OF THE WASTEWATER TREATMENT PROCESS DURING THE OPERATION OF THE BIO-FILTER IN THE PERIODIC MODE

Приведены результаты исследования работы полупроизводственной установки биофильтра с пластмассовой пленочной загрузкой в периодическом режиме подачи сточных вод при высоких начальных нагрузках. Рассмотрена кинетика процесса и изменения эффективности очистки сточных вод во времени. Было выявлено, что повышение нагрузки на биофильтр вызывало соответствующее увеличение скорости удаления загрязнений во всем диапазоне испытанных нагрузок, при этом насыщение биомассы субстратом не наблюдалось. Это характеризует высокую адаптационную способность прикрепленной биомассы к высоким залповым нагрузкам. Показано, что процесс изъятия органических загрязнений на биофильтре в условиях периодических опытов имеет стадийный характер, свидетельствующий о возможности работы биофильтров в режимах неполной и полной биологической очистки сточных вод, а также для проведения процессов нитрификации. Начало процесса нитрификации и его скорость зависели от нагрузки на биофильтр по органическим загрязнениям и степени очистки сточных вод, а изменение скорости нитрификации носило автокаталитический характер. Рассмотрен показатель неокисляемой части органических загрязнений сточных вод, который может использоваться при оценке работы биофильтра.

Ключевые слова: биологическая очистка сточных вод, биофильтр, биопленка, периодический режим работы биофильтра.

The article presents the study results of the performance of the experimental unit with a plastic film load working in a periodic mode of wastewater supply at high initial loads. The kinetics of the process and changes in the efficiency of wastewater treatment over time are considered. As it was revealed, an increase in the load on the bio-filter caused a corresponding increase in the rate of contaminants' removal over the entire range of tested loads, while biomass saturation with the substrate was not observed. This characterizes a high adaptive capacity of the attached biomass to high salvo loads. It is shown that the process of organic contaminants' removal on bio-filter under the conditions of periodic tests has a staged character, indicating the possibility of bio-filter operation in the modes of incomplete and complete biological treatment of wastewater, as well as for nitrification processes. The beginning of the nitrification process and its speed depended on the load on the bio-filter for organic pollution and the degree of wastewater treatment, and the change in the rate of nitrification was autocatalytic. An indicator of the non-oxidizable part of organic pollutants in wastewater is taken into consideration, which can be used in the evaluation of the bio-filter performance.

Keywords: biological wastewater treatment, bio-filter, biofilm, periodic mode of the bio-filter operation.

Введение

Биологическая очистка сточных вод на практике осуществляется как с применением свободно плавающего активного ила (в аэротенках), так и с помощью закрепленной на инертной загрузке биопленки (в биофильтрах и модификациях). Процессы очистки сточных вод в аэротенках и биофильтрах во многом схожи, но вместе с тем имеют и существенные различия, которые вызваны прежде всего условиями формирования и работы биоценозов и их контакта с очищаемой жидкостью. В аэротенках активный ил перемешивается со сточной жидкостью и движется вместе с ней от входа к выходу, а циркулирующий активный ил возвращается из конца в начало сооружения. Это вызывает формирование смешанного биоценоза активного ила, в котором одновременно присутствуют различные виды микроорганизмов, адаптируемые к работе со сточной жидкостью, прошедшей разную степень очистки. В биофильтрах же при протекании сточных вод по поверхности закрепленной на неподвижной загрузке биопленки создаются условия стратификации (по высоте загрузки) видового состава микроорганизмов, который соответствует изменяющемуся качеству сточной жидкости по мере ее очистки.

Процессы очистки сточных вод с помощью активного ила в аэротенках достаточно хорошо изучены [1–5]. При работе аэротенков используется ряд важных технологических параметров, которые характеризуют свойства активного ила, а также служат для контроля хода процесса очистки. К ним относятся: рабочая концентрация активного ила в аэротанке (доза ила), иловый индекс, влажность, зольность, прирост и возраст ила, концентрация кислорода в иловой смеси, расход циркулирующего ила и его концентрация [4–6]. При эксплуатации биофильтров состояние и характеристики закрепленной на загрузке биопленки не опре-

деляются и никак не учитываются для оценки работы сооружений [5–7].

Для изучения процессов развития бактерий, сообществ микроорганизмов, в частности, активных илов, используют метод «острых» опытов, проводимых на контакте с питательной средой в периодическом режиме. Такой режим позволяет получить полную картину протекания процесса и изменения эффективности очистки сточных вод во времени [8–10]. В этой связи для более глубокого изучения процесса очистки сточных вод с прикрепленной биопленкой представляется целесообразным провести исследования работы биофильтров в периодическом режиме.

Целью исследования являлось изучение кинетики протекания процесса очистки сточных вод на биофильтре в условиях периодического режима, определение последовательности различных стадий процесса во времени, влияние некоторых факторов на скорость окисления загрязнений и эффективность очистки.

Методы и материалы

Исследование проводилось на полупроизводственной установке биофильтра с пластмассовой пленочной загрузкой со следующими конструктивными параметрами: рабочий объем биофильтра 0,75 м³; высота загрузки 3,0 м; удельная поверхность загрузки 100 м²/м³, пористость загрузки 98,7 %. Периодический режим работы биофильтров создавался путем введения в установку определенного (одинакового во всех опытах) объема сточных вод и последующей циркуляции жидкости через биофильтр в течение всего периода проведения опыта.

В качестве исходной жидкости применялась смесь сточных вод молочного завода с добавлением концентрированного молока. Использование такой жидкости позволяло создать высокую концентрацию органических загрязнений, которая необходима в периодических опытах для получения четкой и полной картины протекания процесса

биологической очистки во времени. Это также давало возможность получать воспроизводимые результаты, сравнимые с данными о работе производственных биофильтров на реальных сточных водах молокозаводов [2, 11].

Было проведено три опыта, которые отличались начальной нагрузкой: в первом опыте нагрузка на биофильтр составляла 11,0 кг ХПК/м³, во втором — 26,2 и в третьем — 181 кг ХПК/м³. Начальная концентрация загрязнений по ХПК в исходной жидкости в опытах соответственно составляла 10,6; 25,3 и 174,5 г/л.

Гидравлическая нагрузка на биофильтр во всех опытах поддерживалась постоянной (60 м³/м² сут.) с тем, чтобы исключить влияние гидродинамических факторов на скорость процесса при оценке результатов. Принятая величина гидравлической нагрузки характерна для работы биофильтров с пластмассовой загрузкой [5–7]. Температура жидкости практически была постоянной (+17 °С) во всех опытах, вентиляция биофильтра — естественная.

Ход процесса очистки контролировался путем измерений ряда параметров на месте

(температура, pH, расход воды), а также лабораторными анализами проб сточных вод. В пробах определялись ХПК, азот аммонийный, нитриты, нитраты. Все анализы выполнялись по стандартным методикам [12].

Результаты исследований и обсуждение

Ход процесса изъятия загрязнений из сточной жидкости на биофильтре на примере двух характерных опытов (при начальной нагрузке 181 и 11,0 кг ХПК/м³) иллюстрируется на рис. 1 и 2. На рис. 1 показано изменение концентрации загрязнений в очищаемой жидкости в опыте при начальной нагрузке 181 кг ХПК/м³. Как видно на рис. 1, процесс изъятия загрязнений по ХПК имеет стадийный характер, который отчетливо проявляется при высокой нагрузке на биофильтр. В начале процесса происходит изъятие из сточных вод легкодоступных и легкоокисляемых компонентов субстрата, затем идет перестройка биоценоза к новым условиям питания, далее изымаются трудноокисляемые вещества и промежуточные продукты, полученные на предыдущей фазе протекания процесса.

На кинетической кривой (рис. 1, кривая 1) можно выделить разные стадии (фазы) про-

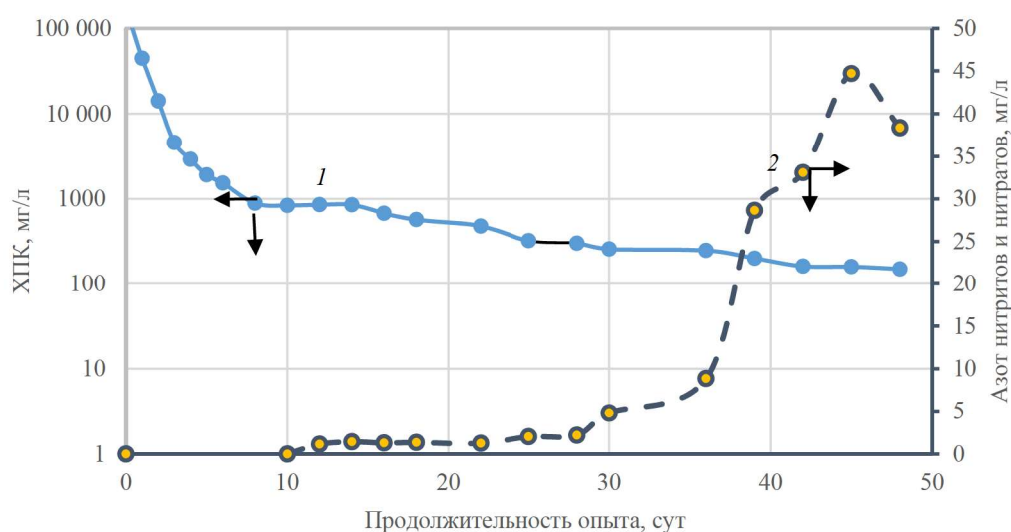


Рис. 1. Изменение концентрации ХПК (кривая 1) азота нитритов и нитратов (кривая 2) в ходе периодического опыта при начальной нагрузке на биофильтр 181 кг ХПК/м³

цесса, которые отделены друг от друга участками, где скорость процесса близка к нулю (плато). Первая стадия процесса завершилась в этом опыте на восьмые сутки работы установки, при этом ХПК сточных вод снизилась с 174,5 г/л (исходная величина) до 0,85 г/л, эффект очистки при этом составил 99,5 %. Далее следовало плато протяженностью семь сут., когда значение ХПК практически не менялось. Одновременно в этот период времени начинались процессы нитрификации (рис. 1, кривая 2), что говорит о перестройке биоценоза.

Вторая стадия процесса снижения ХПК (рис. 1, кривая 1) продолжалась с 14 по 30 сут опыта и характеризовалась значительно меньшей скоростью снижения органических загрязнений, чем на первой стадии, при этом ХПК снизилась с 850 мг/л до 250 мг/л, а эффект очистки составил 47 %. Следующее за этим участком плато (30–36 сут процесса) сопровождалось повышением концентрации нитритов и нитратов. Третья стадия процесса (36–45 сут) — стадия нитрификации, характеризовалась повышением скорости нитрификации (рис. 1, кривая 2) и снижением ХПК до величины 130 мг/л. На этом участке концентрация азота нитритов и нитратов увеличилась с 8,84 мг/л до 44,7 мг/л, эффективность процесса нитрификации составила 80,2 %.

Ход процесса очистки сточных вод на биофильтре в периодическом режиме при начальной нагрузке 11 кг ХПК/м³ (рис. 2) также имеет стадийный характер, хотя он выражен менее четко, чем в первом опыте, с учетом значительно меньшей величины начальной нагрузки.

На кинетических кривых 1 и 2 (см. рис. 2) можно также выделить следующие стадии процесса:

- 1-я стадия (1–3 сутки процесса) — снижение ХПК с 10,6 г/л до 0,18 г/л без нитрификации при эффекте очистки 98,3 %;

- 2-я стадия (3–7 сутки) — снижение скорости изъятия загрязнений по ХПК и начало процесса нитрификации;

- 3-я стадия (7–13 сутки) — интенсивный процесс нитрификации с небольшим снижением ХПК.

При переходе с одной стадии процесса на другую плато не имеет ярко выраженного характера ввиду невысокой нагрузки по загрязнению.

Методику периодического режима работы биофильтров, заключающуюся в повышенной начальной нагрузке по органическим загрязнениям и циркуляции жидкости вместе со смываемой биомассой через его загрузку, можно применить на практике для ускорения процесса наращивания биопленки при запуске биофильтра или восстановлении его работы после перерыва. При этом процесс очистки быстро может быть доведен до нужной его стадии, при которой планируется дальнейшая эксплуатация этого сооружения.

На рис. 3 показаны изменения скорости снижения концентрации загрязнений по ХПК в ходе первой стадии периодических опытов при разных величинах начальной нагрузки на биофильтр.

Вид кривых графика (см. рис. 3) свидетельствует о том, что по мере очистки сточной жидкости в ходе опыта происходило соответствующее снижение скорости процесса. Это вызвано лимитацией его недостатком субстрата по мере очистки сточных вод, а также возможным торможением процесса продуктами распада изъятых загрязнений (аутоингибированием), что характерно для периодических культур и сообществ микроорганизмов и, в частности, активного ила [8–11, 13–16]. Вместе с тем, следует отметить, что с повышением начальной концентрации загрязнений скорость процесса возрастала при всех испытанных нагрузках на биофильтр. Насыщение биомассы субстратом (что свойственно, например, моно-

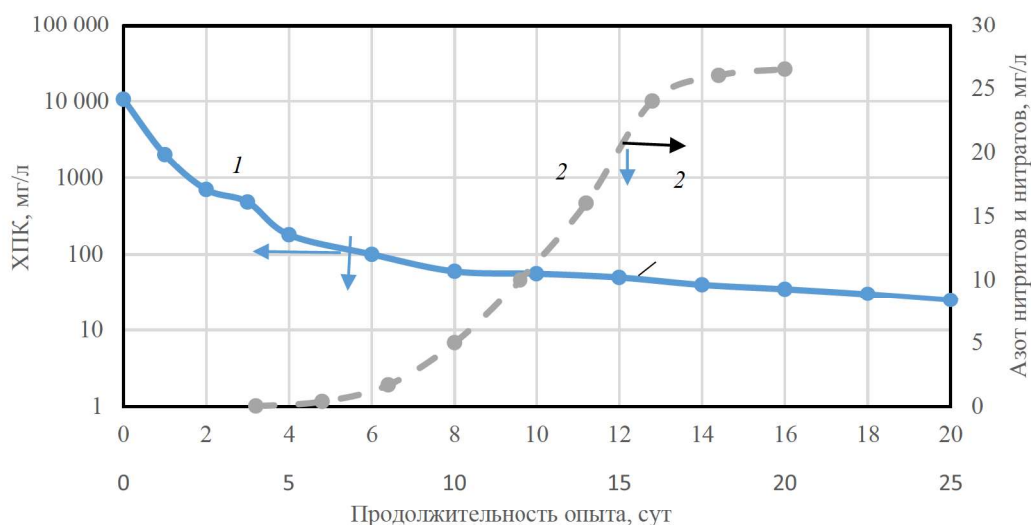


Рис. 2. Изменение концентрации ХПК (кривая 1) азота нитритов и нитратов (кривая 2) в ходе периодического опыта при начальной нагрузке на биофильтр 11 кг ХПК/м³

культурам при их работе на высоких нагрузках) в данном случае не наблюдалось. Это свидетельствует о высокой адаптационной способности прикрепленных биоценозов к высоким нагрузкам, в том числе к нагрузкам, имеющим залповый характер.

Из данных рис. 1 и 2 следует, что начало процесса нитрификации и скорость его протекания зависели от концентрации загрязнений в поступающей жидкости, от нагрузки на биофильтр по органическим загрязнениям и степени очистки сточных вод. В опыте с начальной нагрузкой по ХПК 181 кг/м³

процесс нитрификации начинался сразу за завершением первой фазы изъятия органических загрязнений при эффекте очистки 99,5 %. В опыте с нагрузкой 11,0 кг/м³ начало нитрификации зафиксировано при снижении ХПК до 200 мг/л и эффекте очистки 98,1 %. В условиях периодического режима работы биофильтра изменение скорости нитрификации носило автокаталитический характер. С увеличением нагрузки по органическим загрязнениям скорость нитрификации сначала повышалась (за счет процесса окислительного дезаминирования органиче-

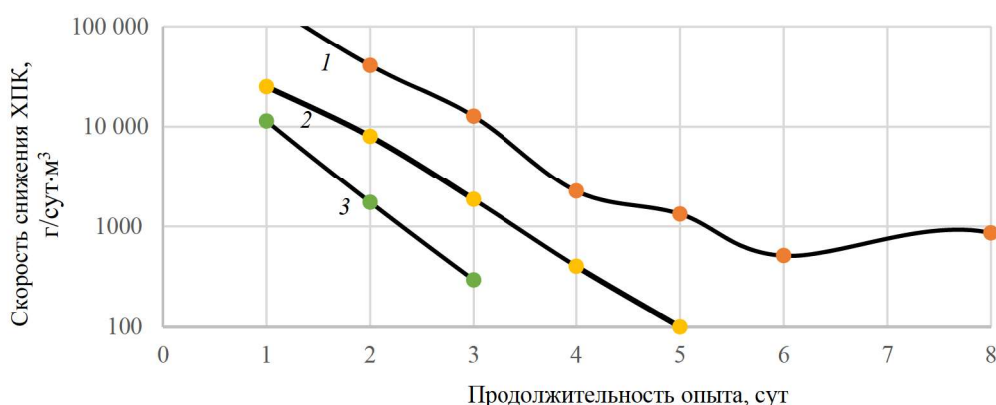


Рис. 3. Изменение скорости снижения концентрации загрязнений по ХПК в ходе 1-й стадии периодических опытов при начальной нагрузке на биофильтр: 1 — 181 кг ХПК/м³; 2 — 26,2 кг ХПК/м³; 3 — 11,0 кг ХПК/м³

ских загрязнений, протекающего в биофилт্রে), а затем постепенно снижалась из-за сокращения зон нитрификации.

Некоторые характеристики процесса очистки сточных вод на биофилт্রে в периодическом режиме при разных нагрузках приведены в таблице.

Разделение процесса очистки сточных вод на биофилт্রে на стадии (см. таблицу) принято, исходя из следующих условий. Первая стадия процесса характеризуется высокой скоростью снижения ХПК и завершается перед началом нитрификации. На второй стадии происходит изъятие трудно окисляемых соединений, сопровождаемое перестройкой биоценоза, и начинается процесс нитрификации. На третьей стадии интенсивно протекает процесс нитрификации. Эти данные подтверждают возможность работы биофилтров в режимах неполной и полной биологической очистки сточных вод, а также в качестве сооружений для проведения нитрификации. Характер и стадийности протекания процесса изъятия загрязнений были идентичны во всех проведенных опытах. Количество и продолжительность этих стадий характеризуются длительностью этапа перестройки и адаптации биоценоза и определяются условиями проведения опыта.

В частности, при биологической очистке сточных вод молочных заводов в начале происходит диссимилиация углеводной фракции загрязнений, а затем идет разложение белков [11, 14]. По данным о работе производственных биофилтров на сточных водах молочных заводов, режим полной биологической очистки до БПК 15–25 мг/л и ХПК 80–100 мг/л с начальной стадией нитрификации достигался при эффекте очистки 98,8 % по БПК полн. и 94,7 % по ХПК [2, 11], что хорошо коррелируется с данными проведенных опытов.

При анализе результатов периодических опытов можно рассмотреть такой показатель, как неокисляемая часть органических загрязнений сточных вод, который в ряде

случаев используется при оценке эффективности работы сооружений биологической очистки. Как видно из таблицы, остаточная (неокисляемая часть) ХПК не является стабильной величиной, а меняется на каждой стадии процесса очистки. Так, например, при исходной концентрации ХПК 174,5 г/л величина неокисляемой части этих загрязнений в конце первой стадии процесса составляла 850 мг/л, второй — 250 мг/л, третьей — 130 мг/л. В опыте с начальной ХПК 10,6 г/л значения этого показателя составляли: 180 мг/л — в конце первой стадии процесса, 100 мг/л — в конце второй, 30 мг/л — в конце всего опыта. Таким образом, неокисляемая часть загрязнений является величиной, связанной с их начальной концентрацией, нагрузкой на биофилтр и глубиной проведения процесса очистки.

Результаты исследований о росте и развитии биомассы в биофилт্রে представлены в статье «Динамика развития биомассы в биофилт্রে, работающем в периодическом режиме», которая готовится к публикации в следующем номере журнала.

Выводы

Исследования работы биофилтра в условиях периодических опытов показали, что процесс изъятия органических загрязнений имеет стадийный характер. В начале процесса изымаются легкоокисляемые компоненты субстрата, затем, после перестройки биоценоза, начинают извлекаться трудноокисляемые вещества и промежуточные продукты, полученные на предыдущей фазе процесса.

Повышение начальной концентрации загрязнений и начальной нагрузки на биофилтр вызывает соответствующее увеличение скорости изъятия загрязнений во всем диапазоне испытанных нагрузок (до 18,1 кг ХПК на 1 м² поверхности загрузки). При этом насыщение биомассы субстратом не происходило, что свидетельствовало о высокой адаптационной способности прикрепленной биомассы биофилтров, устойчивости ее

Характеристики процесса очистки сточных вод на биофильтре в периодическом режиме при разных нагрузках

Параметры	Начальная нагрузка на биофильтр по ХПК, кг/м ³								
	11,0			26,2			181		
Стадии процесса очистки	Первая	Вторая	Третья	Первая	Вторая	Третья	Первая	Вторая	Третья
Продолжительность стадии процесса очистки, сут	3 сут от начала процесса	4–7 сут	8–18 сут	5 сут от начала процесса	6–12 сут	13–22 сут	8 сут от начала процесса. Плато 8–14 сут.	14–30 сут Плато 30–36 сут	36–45 сут
ХПК сточных вод, мг/л	10 590 / 180	180 / 100	100 / 30	25300 / 450	450 / 120	120 / 55	174 500 / 850	850 / 250	250 / 130
Азот нитритов и нитратов, г/л	0 / 0	0 / 1,3	1,3 / 24	0 / 0	–	–	0 / 0 (1,43 в конце плато)	1,43 / 4,8 (8,84 плато)	8,84 / 44,7
Скорость снижения ХПК, г/сут. м ³	11 380 / 293	293 / 20	20 / 2	25 000 / 396	396 / 38	38 / 5	172 960 / 861	861 / 53,5	53,5 / 10

Примечание: числитель — в начале, знаменатель — в конце стадии процесса очистки.

к высоким нагрузкам, носящим залповый характер. Результаты проведенных опытов свидетельствуют о возможности осуществлять на биофильтрах частичную и полную биологическую очистку сточных вод, имеющих высокую и сверхвысокую концентрацию органических загрязнений (до 174,5 г/л), а также проводить процессы нитрификации. Начало процессов нитрификации в ходе очистки и скорость ее протекания зависят от нагрузки на биофильтр по органическим загрязнениям и степени очистки сточных вод. В условиях периодического режима работы биофильтра изменение скорости нитрификации носит автокаталитический характер. С увеличением нагрузки по органическим загрязнениям скорость нитрификации сначала повышается, а затем постепенно снижается за счет сокращения зон нитрификации в биофильтре.

Библиографический список

1. Яковлев С. В., Карелин Я. А., Ласков Ю. М., Калицин В. И. Водоотведение и очистка сточных вод. М.: Стройиздат, 1996. 591 с.

2. Канализация населенных мест и промышленных предприятий: справочник проектировщика / под общ. ред. Самохина В. Н. 2-е изд. М.: Стройиздат, 1981. 639 с.

3. Хаммер М. Технология обработки природных и сточных вод / пер. с англ. М.: Стройиздат, 1979. 400 с.

4. Технический справочник по обработке воды / науч. ред. Алексеев М. И. и др. / пер. с фр. 2-е изд. В 2 т. СПб.: Новый журнал, 2007. 1696 с.

5. ИТС 10-2015. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов: Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. М.: Бюро НДТ, 2015. 377 с.

6. МДК 3-02.2001. Правила технической эксплуатации систем и сооружений коммунального водоснабжения и канализации (утв. Приказом Госстроя РФ от 30.12.1999 № 168). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_117791/

7. Яковлев С. В., Воронов Ю. В. Биологические фильтры. 2-е изд. М.: Стройиздат, 1982. 120 с.

8. Перт С. Д. Основы культивирования микроорганизмов и клеток / пер. с англ. М.: Мир, 1978. 331 с.

9. Работнова И. Л., Позмогова И. Н. Хемостатное культивирование и ингибирование роста микроорганизмов. М.: Наука, 1979. 207 с.

10. Яковлев С. В. Карюхина Т. А. Биохимические процессы в очистке сточных вод. М.: Стройиздат, 1980. 200 с.

11. Шифрин С. М., Иванов Г. В., Мишуков Б. Г., Феофанов Ю. А. Очистка сточных вод предприятий мясной и молочной промышленности. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 272 с.

12. Лурье Ю. Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод. М.: Химия, 1984. 448 с.

13. Мишуков Б. Г., Соловьева Е. А., Керов В. А., Зверева Л. Н. Технология удаления азота и фосфора в процессе очистки сточных вод. СПб.: ЗАО «Электростандарт-Принт», 2008. 114 с.

14. Феофанов Ю. А. Биореакторы с неподвижной и подвижной загрузкой для очистки воды. СПб., 2012. 203 с.

15. Eckenfelder W. W. Water Quality Engineering for practical Engineers. N.Y., Barnes and N., 1970. 582 p.

16. Wiesmann U., Choi I. S., Dombrowski E.-M. Fundamentals of biological wastewater treatment. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007. 392 p.

References

1. Yakovlev S. V., Karelin Ya. A., Laskov Yu. M., Kalitsun V. I. *Vodootvedenie i ochistka stochnykh vod* [Water drainage and wastewater treatment]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1996, 591 p.

2. *Kanalizatsiya naseleennykh mest i promyshlennykh predpriyatiy: spravochnik proektirovshchika* [Sewerage of settlements and industrial enterprises. Designer's handbook]. Ed. by Samokhin V. N. 2-nd ed. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981, 639 p.

3. Khammer M. *Tekhnologiya obrabotki prirodnykh i stochnykh vod* [Technology of natural and waste water treatment]. Transl. from English. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979, 400 p.

4. *Tekhnicheskii spravochnik po obrabotke vody* [Technical reference book on water treatment]. Ed. by Alekseev M. I., et al. 2-nd ed., in 2 vols. Transl. from French. St. Petersburg, Noviy Zhurnal Publ., 2007, 1696 p.

5. *ITS 10-2015. Ochistka stochnykh vod s ispol'zovaniem tsentralizovannykh sistem vodootvedeniya poseleniy, gorodskikh okrugov: Informatsionno-tekhnicheskii spravochnik po nailuchshim dostupnyim tekhnologiyam* [ITS 10-2015. Wastewater treatment using centralized wastewater disposal systems of settlements, urban districts: Information and technical reference book on the best available technologies]. Moscow, Byuro NDT Publ., 2015, 377 p.

6. MDK 3-02.2001. *Pravila tekhnicheskoy ekspluatatsii sistem i sooruzheniy kommunal'nogo vodosnabzheniya*

i kanalizatsii (utv. Prikazom Gosstroya RF ot 30.12.1999 no. 168) [MDK 3-02.2001. Rules of technical operation of systems and facilities of municipal water supply and sewerage (approved by the Order of Gosstroy of the Russian Federation from 30.12.1999, no. 168)]. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_117791/

7. Yakovlev S. V., Voronov Yu. V. *Biologicheskie fil'try* [Biological filters]. 2-nd ed. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982, 120 p.

8. Pert S. D. *Osnovy kul'tivirovaniya mikroorganizmov i kletok* [Fundamentals of microorganisms and cell cultivation]. Transl. from English. Moscow, Mir Publ., 1978, 331 p.

9. Rabotnova I. L., Pozmogova I. N. *Khemostatnoe kul'tivirovanie i ingibirovanie rosta mikroorganizmov* [Chemostat cultivation and growth inhibition of microorganisms]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 207 p.

10. Yakovlev S. V., Karyukhina T. A. *Biokhicheskie protsessy v ochistke stochnykh vod* [Biochemical processes in wastewater treatment]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980, 200 p.

11. Shifrin S. M., Ivanov G. V., Mishukov B. G., Feofanov Yu. A. *Ochistka stochnykh vod predpriyatiy myasnoy i molochnoy promyshlennosti* [Wastewater treatment of meat and dairy industry enterprises]. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ., 1981, 272 p.

12. Lur'e Yu. Yu. *Analiticheskaya khimiya promyshlennykh stochnykh vod* [Analytical chemistry of industrial wastewater]. Moscow, Khimiya Publ., 1984, 448 p.

13. Mishukov B. G., Solov'eva E. A., Kerov V. A., Zvereva L. N. *Tekhnologiya udaleniya azota i fosfora v protsesse ochistki stochnykh vod* [Technology of nitrogen and phosphorus removal in the process of wastewater treatment]. St. Petersburg, Elektstandart-Print Publ., 2008, 114 p.

14. Feofanov Yu. A. *Bioreaktory s nepodvizhnoy i podvizhnoy zagruzkoy dlya ochistki vody* [Bioreactors with fixed and mobile loading for water treatment]. St. Petersburg, 2012, 203 p.

15. Eckenfelder W. W. Water quality engineering for practical engineers. N. Y., Barnes and N. Publ., 1970, 582 p.

16. Wiesmann U., Choi I. S., Dombrowski E.-M. Fundamentals of biological wastewater treatment. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA Publ., 2007, 392 p.