

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 10.23968/1999-5571-2023-20-5-71-78

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

## ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ БИОМАССЫ В БИОФИЛЬТРЕ, РАБОТАЮЩЕМ В ПЕРИОДИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

### DYNAMICS OF BIOMASS DEVELOPMENT IN A BIOFILTER OPERATING IN A PERIODIC MODE

Представлены результаты исследований динамики развития биомассы при работе биофильтра с пластмассовой загрузкой в периодическом режиме подачи сточных вод. Рассмотрены изменения количественных и качественных характеристик биомассы биофильтра в ходе процесса в зависимости от ее возраста и нагрузки по органическим загрязнениям. Отмечено, что вслед за стационарной фазой развития биомассы начинается интенсивный вынос из биофильтра избыточной биопленки, который обусловлен утратой ее прикрепительных функций по мере очистки сточных вод. В ходе периодических опытов активность и скорость роста биопленки снижались в связи с возрастающим дефицитом питания, а зольность биомассы постепенно повышалась из-за ее самоокисления (автолиза). Значения активности и зольности биопленки были связаны с глубиной очистки сточных вод на биофильтре и могут служить показательными параметрами этого процесса.

*Ключевые слова:* биологическая очистка сточных вод, биофильтр, биопленка, периодический режим работы биофильтра, динамика развития биопленки.

The paper presents the results of studies of the biomass development dynamics during the operation of a biofilter with plastic loading in the periodic mode of wastewater supply. Changes in the quantitative and qualitative characteristics of the biofilter biomass during the process depending on its age and load on organic pollution are considered. It is noted that after the stationary phase of biomass development, there starts an intensive removal of excess biofilm from the biofilter, which is due to the loss of its attachment functions as wastewater is treated. During periodic experiments, the activity and growth rate of the biofilm decreased due to increasing nutritional deficiencies, and the biomass ash content gradually increased due to its self-oxidation (autolysis). Biofilm activity and ash content values were related to the depth of wastewater treatment on the biofilter and can serve as indicative parameters of this process.

*Keywords:* biological wastewater treatment, biofilter, biofilm, biofilter periodic mode of operation, dynamics of biofilm development.

#### Введение

Биологические фильтры широко применяются для очистки различных категорий сточных вод. Преимуществами этих сооружений перед аэротенками, благодаря закрепленной на загрузке биомассе являются способность переносить временные пере-

грузки по загрязнениям и перерывы в подаче сточных вод и воздуха. Биофильтры имеют более низкие энергозатраты и высокие скорости массообменных процессов, чем аэротенки, и поэтому применяются на небольших по производительности очистных станциях [1–5]. Специальные сравни-

тельные исследования показали, что активность закрепленной биопленки биофильтра намного выше, чем активность взвешенного ила аэротенка [6].

При эксплуатации биофильтров контроль за ходом протекания процесса биологической очистки ведется только по результатам анализов исходной и очищенной воды. При этом характеристики закрепленной на загрузке биопленки практически никак не учитываются ввиду сложности определения ее состояния, стратификации биоценоза по высоте загрузки, а также из-за отсутствия возможности прямого регулирования концентрации биомассы и ее возраста в реакционной зоне. Как правило, при штатной работе биофильтров фиксируется лишь объем выносимой (избыточной) биомассы и ее влажность<sup>1</sup>, которые не дают достаточной информации о ходе процесса очистки сточных вод.

Для изучения динамики развития биомассы в биофильтре при очистке сточных вод представляется целесообразным провести исследования его работы в периодическом режиме. Такой режим позволяет получить полную картину развития биомассы в биофильтре, изменений ее количественных и качественных характеристик в зависимости от возраста и во взаимосвязи с ходом протекания процесса очистки во времени.

Цель настоящего исследования — изучение динамики развития биомассы, измене-

<sup>1</sup> Правила технической эксплуатации систем и сооружений коммунального водоснабжения и канализации. МДК 3-02.2001. Утверждены приказом Госстроя России от 30.12.99 г. № 168. 124 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200025707>

ний ее количественных и качественных характеристик в зависимости от возраста и нагрузки по органическим загрязнениям при работе биофильтра в периодическом режиме подачи сточных вод.

### Методы и материалы

Исследования проводились на полупроизводственной установке биофильтра с пластмассовой пленочной загрузкой в условиях периодического режима его работы, который создавался путем введения в установку определенного (одинакового во всех опытах) объема сточных вод и последующей циркуляции этой жидкости через биофильтр в течение всего периода проведения опыта.

Конструкция установки предусматривала возможность непрерывного взвешивания загрузки с целью определения количества закрепленной на ней биомассы. Исследования проводились при одинаковой гидравлической нагрузке на биофильтр и постоянной температуре с тем, чтобы избежать влияния этих факторов при анализе и оценке получаемых результатов. В качестве исходной жидкости применялась смесь реальных сточных вод молочного завода с добавлением концентрированного молока. Данные о режимах работы установки биофильтра приведены в таблице.

Контроль за ходом процесса очистки проводился путем измерений ряда параметров на месте (температура, pH, расход воды, вес загрузки с биопленкой), а также с помощью лабораторных анализов проб сточных вод и проб прикрепленной и циркулирующей (смываемой с загрузки) биомассы. В про-

**Данные о режимах работы установки биофильтра**

№ опыта	Продолжительность опыта, сутки	Гидравлическая нагрузка, м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> .сутки	ХПК исходной жидкости, г/л	Начальная нагрузка, кгХПК/м <sup>3</sup>	Начальное количество биопленки по сухому беззольному веществу, кг/м <sup>3</sup>	Температура, °С
1	26	60,0	10,59	11,0	0	17
2	36	60,0	25,3	26,2	0,12	17
3	48	60,0	174,0	181,0	0,74	17

бах биопленки определялось ее количество, влажность и зольность, а также дегидрогеназная активность. Все анализы выполнялись по стандартным методикам [7, 8].

Описание установки и результаты исследований кинетики процесса изъятия загрязнений при очистке сточных вод в условиях периодического режима работы биофильтра приведены в научной статье [9].

### Результаты исследований и обсуждение

Динамика изменения количества биомассы при работе биофильтра в периодическом режиме на примере опыта с начальной нагрузкой  $181 \text{ кг ХПК/м}^3$  иллюстрируется на рис. 1, где показаны изменения количества прикрепленной и смываемой с загрузки (циркулирующей) биопленки, а также концентрации нитритов и нитратов во времени. Динамика развития прикрепленной на загрузке биопленки (рис. 1, кривая 1) имеет много общего с динамикой роста любых периодических культур или сообществ микроорганизмов (например, активного ила). На ней прослеживаются все фазы развития периодических биоценозов: логарифмическая фаза роста, фаза замедленного роста, стационарная фаза и фазы ускоренного и

замедленного отмирания [6, 10, 11]. Начальная фаза (лаг-фаза) проявлялась нечетко, ввиду того что данный опыт начинался после предыдущего при наличии на загрузке биопленки в количестве  $0,74 \text{ кг}$  сухого беззольного вещества на  $1 \text{ м}^3$  загрузки ( $5,55 \text{ г/м}^2$  поверхности загрузки).

Особенностью прикрепленных биоценозов в биофильтрах являлось то, что вслед за стационарной фазой ее развития начинался интенсивный смыв биопленки с загрузки и количество ее на загрузке, таким образом, резко уменьшалось. Вынос избыточной биопленки обусловлен утратой ее прикрепительных функций при снижении концентрации загрязнений во времени по мере очистки сточных вод. Интенсивность выноса биопленки зависела от ее возраста и была связана с максимальной концентрацией биомассы на загрузке, а следовательно, зависела и от нагрузки на биофильтр. Поскольку опыты проводились при одинаковой гидравлической нагрузке ( $60 \text{ м}^3/\text{м}^2$  сутки), то влияние этого фактора на количественные характеристики биомассы здесь не учитывалось, а полученные результаты должны быть соотнесены с условиями эксперимента. При

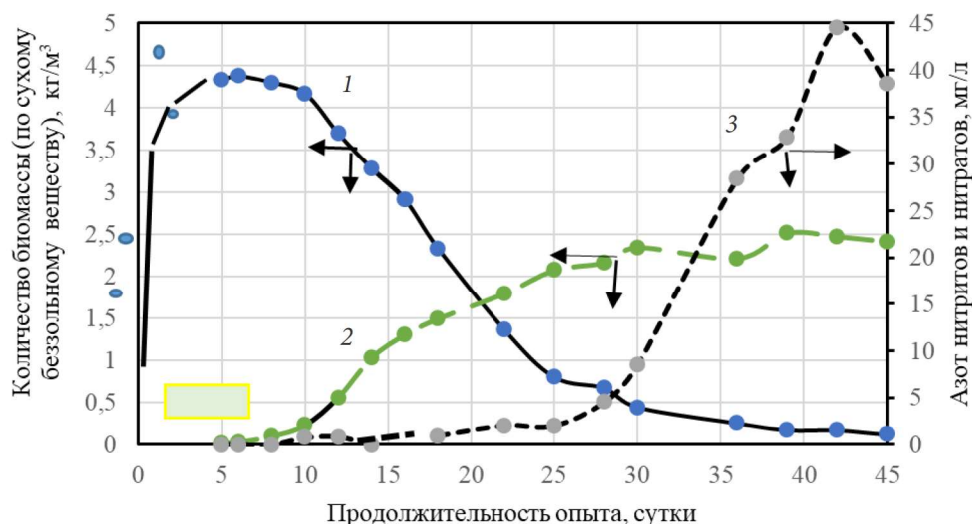


Рис. 1. Изменения в ходе периодического опыта при начальной нагрузке на биофильтр  $181 \text{ кг ХПК/м}^3$ : 1 — количества прикрепленной биопленки; 2 — количества смывтой (циркулирующей) биопленки; 3 — концентрации нитритов и нитратов

других значениях гидравлической нагрузки, очевидно, количество биомассы и скорости ее прироста могут быть иными, однако характер динамики ее изменений сохранится прежним. В частности, совпадение начала процесса отторжения биопленки от загрузки с окончанием стационарной фазы ее развития прослеживается во всех проведенных опытах и является общей закономерностью этого процесса. Следует учесть, что вынос избыточной биомассы из биофильтров служит непременным условием стабильной (без заиливания загрузки) работы этих сооружений<sup>2</sup> [3–5, 12–14].

Отмечено, что вслед за началом выноса из биофильтра избыточной биомассы начинался процесс нитрификации, а максимум скорости нитрификации совпадал во времени с интенсивным распадом биомассы. Очевидно, что к этому периоду в жидкости накапливались продукты расщепления азотосодержащих органических загрязнений, а также вещества, высвобождающиеся при автолизе

биомассы, что и обуславливало ускорение процесса нитрификации.

На рис. 2 показано, как менялись основные характеристики биомассы в ходе периодического опыта при начальной нагрузке на биофильтр 26,2 кг ХПК/м<sup>3</sup>. В частности, кривые 1 и 2 на рис. 2 иллюстрируют изменения зольности, соответственно, прикрепленной и циркулирующей биомассы, а кривая 3 — изменение дегидрогеназной активности прикрепленной биопленки. Результаты исследований показали, что активность закрепленной на загрузке биомассы резко падает в конце стационарной фазы ее развития, а смываемая биопленка имеет значительно меньшую активность, чем закрепленная на загрузке биопленка в тот же момент времени.

Важной характеристикой биомассы является также показатель зольности биомассы, который существенно менялся в ходе периодических опытов. В начале опыта, на первой стадии процесса (режим неполной биологической очистки продолжительностью 6 сут от начала опыта), зольность прикрепленной биопленки составляла 13,0–15,0 % (рис. 2, кривая 1), в конце второй стадии процесса (режим полной биологической очистки) уве-

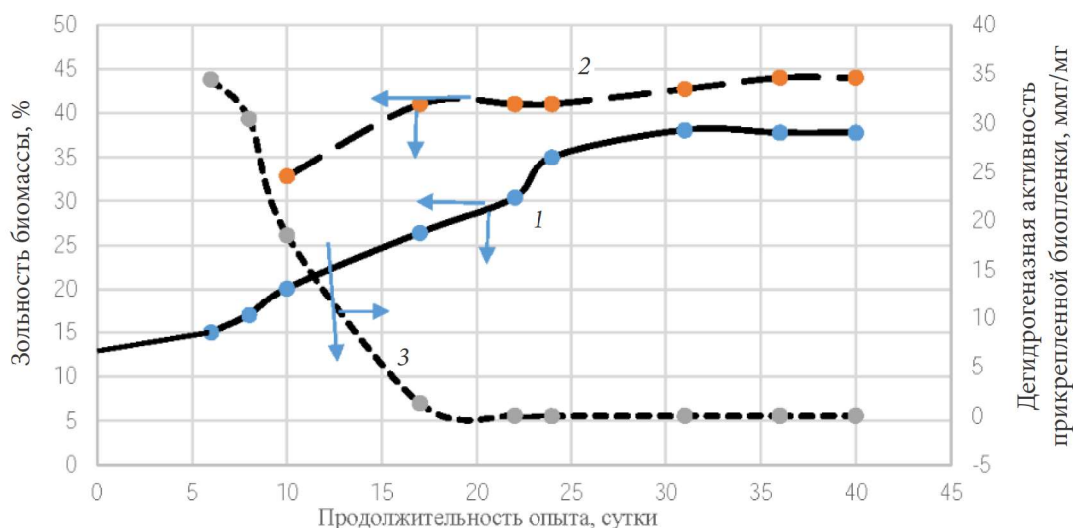


Рис. 2. Изменения в ходе периодического опыта при начальной нагрузке на биофильтр 26,2 кг ХПК/м<sup>3</sup>:  
1 — зольности прикрепленной биомассы; 2 — циркулирующей биомассы;  
3 — дегидрогеназной активности прикрепленной биопленки

личилась до 22–25 %, а в конце опыта возросла до 37–38 %.

Зольность смываемой с загрузки и циркулирующей вместе с жидкостью через биофильтр биомассы составляла в начале опыта — 32,8 %, в конце — 44 % (рис. 2, кривая 2). Анализ данных по изменению зольности прикрепленной и циркулирующей биомассы биофильтра позволяет сделать следующие выводы. В ходе процесса по мере очистки сточных вод зольность биомассы биофильтра постепенно повышается, что говорит о ее самоокислении (автолизе), вызванном увеличивающимся дефицитом питания. Интенсивность повышения зольности прикрепленной биопленки начинает существенно увеличиваться после первой стадии процесса очистки и продолжается вплоть до окончания опыта. По величине зольности биопленки можно судить о стадии и глубине процесса очистки сточных вод на биофильтре.

Зольность избыточной биомассы растет, начиная с момента ее появления в циркулирующей жидкости, вплоть до момента, когда активность биопленки снижается до минимальных значений (рис. 2, кривая 3). Это обстоятельство свидетельствует о возможности минерализации избыточной биомассы при ее циркуляции вместе с жидкостью через биофильтр. Конечная величина зольности циркулирующей биомассы, зарегистрированная в конце периодических опытов, составляла 44–45 %, эту величину можно принять за предел ее распада.

Учитывая достаточно четкую взаимосвязь между возрастом биопленки, ее зольностью и активностью, можно охарактеризовать режим работы и глубину процесса очистки сточных вод на биофильтре, а также состояние биомассы по какому-либо из этих показателей (зольности или активности). Представляется целесообразным включить эти показатели в число контролируемых параметров при работе производственных биофильтров.

Следует обратить внимание также на то, что зольность избыточной биомассы в начале ее появления в циркулирующей жидкости (32,8 %) значительно выше зольности прикрепленной биопленки в тот же момент времени (20,1 %). Это свидетельствует о том, что из биофильтра выносятся малоактивная, минерализованная биомасса с застойных и малопроточных зон загрузки, где существует лимит поступления свежего субстрата, что и приводило к лизису биоценоза. Наличие малопроточных зон в загрузке биофильтра обусловлено неравномерностью ее орошения, неоднородной структурой движения жидкости по ней [5, 12–14].

Важными показателями процесса развития биопленки в биофильтре являются также скорость ее прироста и величина экономического коэффициента, характеризующего соотношение между энергетическим и конструктивным обменом в клетках [4, 10, 11]. Значения этих показателей рассчитывались следующим образом. Скорость прироста биопленки определялась как  $V_{6n} = \Delta D / \Delta t$ , а экономический коэффициент —  $Y = V_{6n} / V_{ХПК}$ , где  $\Delta D$  — прирост биопленки, кг (по беззольному веществу) за время  $\Delta t = 1$  сут.,  $V_{6n}$  — скорость прироста биопленки,  $V_{ХПК}$  — скорость изъятия загрязнений, кг ХПК/сут.

Изменение скорости прироста закрепленной на загрузке биопленки и величины экономического коэффициента биопленки в ходе 1-й стадии периодических опытов при разных значениях начальной нагрузки на биофильтр показаны соответственно на рис. 3 и 4. На рис. 3 видно, что скорость прироста биопленки напрямую связана с нагрузкой по органическим загрязнениям на биофильтр и постепенно снижалась во времени по мере очистки сточной жидкости в ходе периодических опытов.

Изменение скорости прироста биопленки и ее активности вызывалось качествен-

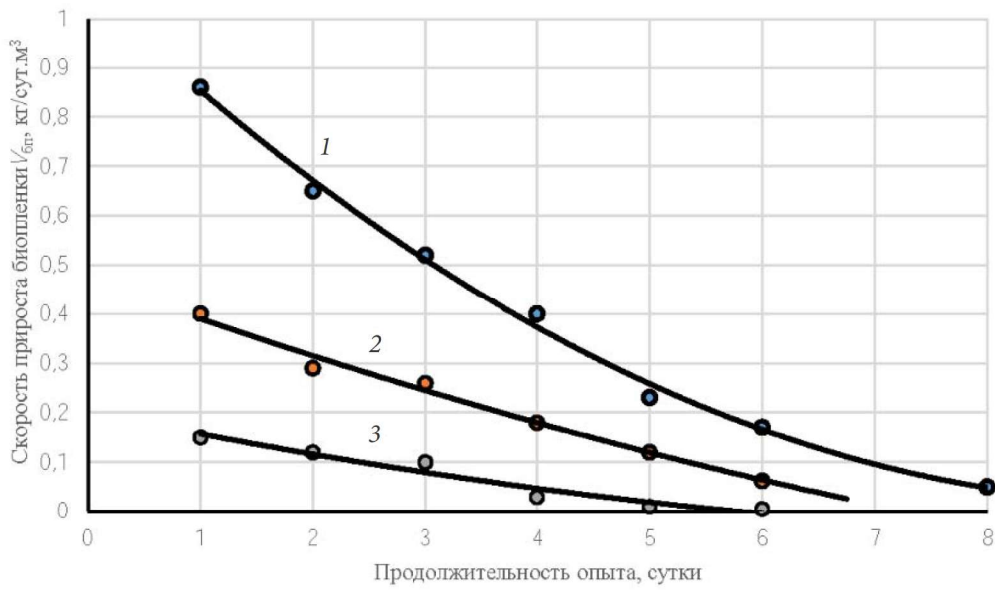


Рис. 3. Изменение скорости прироста закрепленной биопленки в ходе 1-й стадии периодических опытов при начальной нагрузке на биофильтр: 1 — 181 кг ХПК/м³; 2 — 26,2 кг ХПК/м³; 3 — 11 кг ХПК/м³

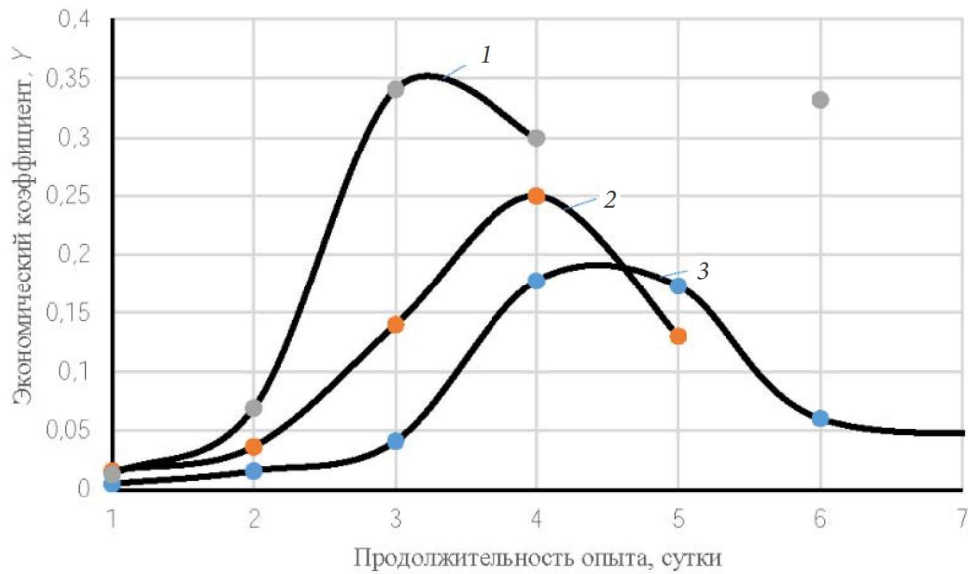


Рис. 4. Изменение экономического коэффициента  $Y$  закрепленной биопленки в ходе 1-й стадии периодических опытов при начальной нагрузке на биофильтр: 1 — 11 кг ХПК/м³; 2 — 26,2 кг ХПК/м³; 3 — 181 кг ХПК/м³

ным изменением биомассы, разной степенью окисления органических веществ и сопровождалось изменением значений коэффициента прироста (экономического коэффициента  $Y$ ), характеризующего затраты субстрата на синтез биомассы (см. рис. 4).

В частности, величина экономического коэффициента в начале первой стадии процесса повышалась, а затем снижалась (см. рис. 4) по мере окисления сначала легкодоступных углеводов, а затем сложных белковых соединений сточных вод.

## Выводы

1. Динамика развития закрепленной на загрузке биофильтра биопленки похожа на динамику роста любых периодических культур и имеет те же фазы развития. Особенностью прикрепленной биопленки в биофильтрах является то, что вслед за стационарной фазой ее развития начинается интенсивный смыв биопленки с загрузки, обусловленный утратой ее прикрепительных функций при снижении концентрации загрязнений во времени по мере очистки сточных вод. Интенсивность выноса биопленки зависела от ее возраста и была связана с нагрузкой по органическим загрязнениям на биофильтр.

2. Вслед за началом выноса из биофильтра избыточной биомассы начинался процесс нитрификации, а максимальная его скорость совпадала во времени с интенсивным распадом биомассы, вызванным автолизом клеток микроорганизмов и расщеплением азотосодержащих органических загрязнений сточных вод.

3. Показатели активности и зольности биопленки существенно меняются в ходе периодических опытов по мере очистки сточных вод, в частности, активность биопленки биофильтра снижалась, а зольность постепенно повышалась (как результат ее самоокисления). Значения активности и зольности биопленки связаны с ее возрастом и глубиной очистки сточных вод на биофильтре и могут служить показательными параметрами этого процесса.

4. Зольность избыточной биопленки, смываемой с загрузки биофильтра и циркулирующей вместе с жидкостью, возрастала (за счет ее самоокисления) и в конце периодических опытов составляла 44–45 %, что можно принять за предел ее распада.

5. Изменения активности и скорости прироста биопленки связаны с качественными изменениями биоценоза, сопровождаемыми изменением соотношения между энерги-

ческим и конструктивным обменом в клетках, а также разной степенью окисления органических веществ.

## Библиографический список

1. Яковлев С. В., Карелин Я. А., Ласков Ю. М., Калицун В. И. Водотведение и очистка сточных вод. М.: Стройиздат, 1996. 591 с.
2. Лихачев Н. И., Ларин И. И., Хаскин С. А. и др. Канализация населенных мест и промышленных предприятий; под общ. ред. В. Н. Самохина. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1981. 639 с.
3. Яковлев С. В., Воронов Ю. В. Биологические фильтры. 2-е изд. М.: Стройиздат, 1982. 120 с.
4. Технический справочник по обработке воды. 2-е изд. В 2 т. (пер. с фр.). СПб.: Новый журнал, 2007. 1696 с.
5. Феофанов Ю. А. Биореакторы с неподвижной и подвижной загрузкой для очистки воды. СПб., 2012. 203 с.
6. Чухчин Д. Г., Варакин Е. А., Рудакова В. А., Чуркина Ю. В., Новожилов Е. В. Анализ окислительной способности микроорганизмов биопленки путем определения их дегидрогеназной активности // Биотехнология. 2015. № 5. С. 83–89.
7. Лурье Ю. Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод. М.: Химия, 1984. 448 с.
8. Методы индикации биологических пленок микроорганизмов на абиотических объектах. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2020. 20 с.
9. Феофанов Ю. А. Изучение процесса очистки сточных вод при работе биофильтра в периодическом режиме // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 4 (99). С. 100–107.
10. Перт С. Д. Основы культивирования микроорганизмов и клеток / пер. с англ. М.: Мир, 1978. 331 с.
11. Работнова И. Л., Позмогова И. Н. Хемостатное культивирование и ингибирование роста микроорганизмов. М.: Наука, 1979. 207 с.
12. 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.
13. Eckenfelder W. W. Water Quality Engineering for practical Engineers. N.Y., Barnes and N., 1970. 582 с.
14. 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 ochildka stochnykh vod* [Wastewater disposal and wastewater treatment]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1996, 591 p.
2. Likhachev N. I., Larin I. I., Khaskin S. A., et al. *Kanalizatsiya naselennykh mest i promyshlennykh predpriyatiy* [Sewerage of settlements and industrial enterprises]. Ed. by Samokhina V. N. 2-nd ed., revised. Moscow, Stroyizdat Publ., 1981, 639 p.
3. Yakovlev S. V., Voronov Yu. V. *Biologicheskie fil'try* [Biofilters]. 2-nd ed. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982, 120 p.
4. *Tekhnicheskiiy spravochnik po obrabotke vody* [Technical reference book on water treatment]. 2-nd ed. In 2 vols. Vol. 2. (Transl. from French). St. Petersburg, Noviy zhurnal Publ., 2007, 1696 p.
5. Feofanov Yu. A. *Bioreaktory s nepodvizhnoy i podvizhnoy zagruzkoj dlya ochildki vody* [Bioreactors with fixed and mobile loading for water treatment]. St. Petersburg, 2012, 203 p.
6. Chukhchin D. G., Varakin E. A., Rudakova V. A., Churkina Yu. V., Novozhilov E. V. *Analiz okislitel'noy sposobnosti mikroorganizmov bioplenki putem opredeleniya ikh degidrogenaznoy aktivnosti* [Analysis of oxidative capacity of biofilm microorganisms by determining their dehydrogenase activity]. *Biotekhnologiya – Biotechnology*, 2015, no. 5, pp. 83–89.
7. Lur'e Yu. Yu. *Analiticheskaya khimiya promyshlennykh stochnykh vod* [Analytical chemistry of industrial wastewater]. Moscow, Khimiya Publ., 1984, 448 p.
8. *Metody indikatsii biologicheskikh plynok mikroorganizmov na abioticheskikh ob'ektakh* [Methods of indication of biological films of microorganisms on abiotic objects]. Moscow, Federal'naya sluzhba po nadzoru v sfere zashchity prav potrebiteley i blagopoluchiya cheloveka Publ., 2020, 20 p.
9. Feofanov Yu. A. *Izuchenie protsessa ochildki stochnykh vod pri rabote biofil'tra v periodicheskom rezhime* [Study of wastewater treatment process at work of biofilter in periodic mode]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2023, no. 4 (99), pp. 100–107.
10. Pert S. D. *Osnovy kul'tivirovaniya mikroorganizmov i kletok* [Fundamentals of cultivation of microorganisms and cells]. Transl. from English. Moscow, Mir Publ., 1978, 331 p.
11. 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.
12. Shifrin S. M., Ivanov G. V., Mishukov B. G., Feofanov Yu. A. *Ochildka stochnykh vod predpriyatiy myasnoy i molochnoy promyshlennosti* [Wastewater treatment from meat and dairy industry enterprises]. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ., 1981, 272 p.
13. Eckenfelder W. W. *Water quality engineering for practical engineers*. N. Y., Barnes and N. Publ., 1970, 582 p.
14. Wiesmann U., Choi I. S., Dombrowski E.-M. *Fundamentals of biological wastewater treatment*. Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007, 392 p.