

## Биологическая очистка производственных сточных вод с использованием носителей из вторичных ресурсов

© 2026. Е. В. Калинина, к. т. н., доцент,  
Л. В. Рудакова, д. т. н., зав. кафедрой,  
А. А. Трефилова, магистрант,

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29,  
e-mail: Kalininaelena1@rambler.ru

В настоящей работе обоснована целесообразность использования в качестве носителя закреплённой биомассы в процессе биологической очистки сточных вод вторичных материальных ресурсов: мелкой фракции (5–10 мм) хлопьев рециклированного полиэтилентерефталата (ПЭТ), лёгкой фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок (этикетки) и углеродно-синтетического носителя на основе остатков после термодесорбции нефтесодержащих отходов и отходов полиэтилена низкого давления. Наиболее эффективно закрепление биомассы происходит на лёгкой фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок (2,25 г/г носителя) и углеродно-синтетическом носителе на основе остатков после термодесорбции нефтесодержащих отходов и отходов полиэтилена низкого давления (3,5 г/г носителя). Применение данных носителей биомассы позволяет повысить эффективность очистки нефтесодержащих сточных вод по сравнению с технологией со свободноплавающим илом на 7 % по нефтепродуктам и на 17 % по показателю химического потребления кислорода (ХПК). Это соответствует эффективности очистки 97 % по нефтепродуктам и 92 % по ХПК. Применение в процессе биологической очистки нефтесодержащих сточных вод носителей биомассы на основе вторичных материальных ресурсов приводит к повышению видового разнообразия свободноплавающих микроорганизмов активного ила почти в 2 раза, увеличению количества микроорганизмов высших трофических уровней, улучшению седиментационных свойств активного ила и повышению прозрачности очищенных сточных вод.

**Ключевые слова:** очистка сточных вод, активный ил, нефтепродукты, носитель биомассы.

## Biological treatment of industrial wastewater using carriers from secondary resources

© 2026. E. V. Kalinina ORCID: 0000-0001-6965-4895

L. V. Rudakova ORCID: 0000-0003-3292-8359, A. A. Trefilova ORCID: 0009-0001-1588-043X

Perm National Research Polytechnical University,  
29, Komsomolskiy Ave., Perm, Russia, 614990,  
e-mail: Kalininaelena1@rambler.ru

The treatment of industrial wastewater containing toxic impurities is a difficult environmental challenge. It can be solved by using a combination of free-floating and carrier-attached reactive sludge in reactors. Biomass carriers are often made from various synthetic materials (polyamide, polyester, polypropylene, polyurethane, polyethylene), sometimes with the addition of organic and mineral components. In this paper we substantiate the expediency of using secondary resources as a carrier of fixed biomass in the process of biological wastewater treatment. We use fine fraction of recycled PET flakes (5–10 mm), light fraction of PET bottle recycling waste (labels) and carbon-synthetic carrier based on residues after thermodesorption of oil-containing waste and low-pressure polyethylene waste. The most effective biomass fixation occurs on light fraction of PET bottles recycling waste (2.25 g/g of carrier) and carbon-synthetic carrier based on residues after thermodesorption of oil-containing waste and low-pressure polyethylene waste (3.5 g/g of carrier). Application of these biomass carriers allows increasing the efficiency of oily wastewater treatment in comparison with the technology with free-floating sludge by 7 % for oil products and by 17 % for chemical oxygen demand (COD). This corresponds to a treatment efficiency of 97 % for oil products and 92 % for COD. Thus, the species diversity of free-floating microorganisms of activated sludge increases by almost 2 times as well as the number of higher trophic level microorganisms in the sludge, the sedimentation properties of activated sludge improve and transparency of treated wastewater increases as a result of application in the biological treatment of oily wastewater a biomass carriers on secondary resources base.

**Keywords:** wastewater treatment, activated sludge, oil products, biomass carrier.

Предприятия химического и нефтехимического комплекса потребляют большие объёмы воды на производственные нужды и, следовательно, являются источником образования значительных объёмов сточных вод. Для очистки сточных вод предприятий химического и нефтехимического комплекса применяют механические, физико-химические и биологические методы. Стоит отметить, что реализация процессов биологической очистки производственных сточных вод усложняется неравномерностью их поступления на очистные сооружения, наличием сложноокисляемых и токсичных для микроорганизмов активного ила веществ и залповыми сбросами загрязняющих веществ в результате промывки оборудования, внештатных ситуаций на производстве и др. [1]. Указанные особенности негативно влияют на эффективность биологической очистки сточных вод: изменяется структура хлопья активного ила; происходит деструкция, деформация клеток активного ила и нарушение их метаболизма. Это приводит к вспуханию активного ила, его выносу с очистных сооружений, вторичному загрязнению очищенных сточных вод и существенному снижению эффективности процесса биологической очистки сточных вод.

Одним из способов повышения эффективности биологической очистки производственных сточных вод является использование в системе биологической очистки дополнительно к свободноплавающей биомассе активного ила биомассы, иммобилизованной на носителях. Использование в процессе биологической очистки свободноплавающего и иммобилизованного активного ила позволяет поддерживать различный возраст активного ила, в результате чего повышается окислительная активность сообщества микроорганизмов и его устойчивость к трудноокисляемым токсичным веществам, присутствующим в стоках предприятий химического и нефтехимического комплекса. Иммобилизация биомассы позволяет концентрировать её, увеличивать возраст микроорганизмов и время пребывания в биореакторе и предотвращать вынос взвешенных веществ при поступлении большого объёма стоков или при увеличении скорости водного потока [2].

Носители закреплённой биомассы производятся различных форм (нити, листы, гранулы, диски и др.), как правило, из синтетических материалов (полиамид, полиэфир [3], пенополипропилен [4], стекло/керамопластик [5], полиуретан, полиэтилен [6]) иногда с добавлением органических и минеральных

компонентов (крахмал, микроцеллюлоза [7]). Проводятся исследования по применению различных отходов пластика в качестве загрузки для биофильтров [8–11].

Эффективность очистки сточных вод повышается с увеличением удельной площади поверхности носителей. При иммобилизации биомассы на пористых материалах, обладающих сорбционными свойствами, одновременно протекают процессы адсорбции на поверхности носителя, окисления загрязняющих веществ свободноплавающими и прикреплёнными микроорганизмами [12, 13].

К современным материалам носителям биомассы предъявляются следующие требования: высокоразвитая поверхность, механическая прочность, высокая иммобилизующая способность, доступность и низкая стоимость. Снижение стоимости носителей биомассы может быть достигнуто при вовлечении в производство вторичных ресурсов, в том числе различных видов пластика. Ориентировочные объёмы образования в России бутылок из полиэтилентерефталата (ПЭТ) более 500 000 тыс./т в год [14]. В настоящее время реализуют технологии рециклинга ПЭТ бутылок, но при этом остаются следующие неперерабатываемые фракции: мелкая фракция (МФ) хлопьев рециклированного ПЭТ (5–10 мм) и лёгкая фракция отходов рециклинга ПЭТ бутылок в виде этикеток.

Целью настоящей работы являлось исследование возможности использования в качестве носителей закреплённой биомассы для биологической очистки трудноокисляемых сточных вод материала, полученного на основе остатков после термодесорбции нефте содержащих отходов и отходов полиэтилена низкого давления, а также отходов рециклинга ПЭТ бутылок.

### **Материалы и методы исследования**

В настоящей работе в качестве носителей биомассы использованы: мелкая фракция хлопьев рециклированного ПЭТ (5–10 мм); лёгкие фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок – этикетки после промывки бутылок и обработки щёлочью (маркировка ПП1) и исходные этикетки (маркировка ПП2).

Также для исследований были синтезированы образцы углеродно-синтетического носителя биомассы (УСНБ) на основе остатков после термодесорбции (ОПТ) нефте содержащих отходов (НСО) и отходов полиэтилена низкого давления (ПНД). Для синтеза УСНБ

использовали следующие отходы нефтеперерабатывающего предприятия: нефтешламы, флотопена и избыточный активный ил [15, 16]. ОПТ НСО были получены термодесорбцией смеси НСО при температуре 450 °С в течение 30 мин. Смесь ОПТ НСО и измельченного ПНД в соотношении 1:1÷3:1 помещали в термоконтролируемый муфельный шкаф на 30 мин при температуре 110–120 °С, после чего перемешивали до получения однородной массы. На выходе получался хлопьевидный продукт с содержанием пироуглерода 12–16 %.

Экспериментальную оценку возможности использования в качестве носителей закрепленной биомассы для биологической очистки трудноокисляемых сточных вод материалов на основе вторичных ресурсов проводили в модельных аэротенках с использованием сточных

вод (СВ) и активного ила (АИ), отобранных на биологических очистных сооружениях нефтеперерабатывающего предприятия. В модельных аэротенках поддерживали следующие технологические параметры: содержание растворенного кислорода 2 мгО<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>, доза АИ 2 г/дм<sup>3</sup>, время контакта СВ с АИ 4–6 ч. Очищенные сточные воды (ОСВ) имели маркировку: ОСВ–1 при очистке свободноплавающими микроорганизмами АИ, ОСВ–2 при сочетании свободноплавающих и закрепленных на носителях микроорганизмов АИ. Всего было проанализировано 4 варианта носителей из вторичных ресурсов: мелкая фракция хлопьев рециклированного ПЭТ (маркированы МФ); лёгкие фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок – этикетки после промывки бутылок и обработки щёлочью (маркировка ПП1), исходные этикетки (маркировка ПП2)

Таблица 1 / Table 1

Программа и методы исследования / Programm and methods of research

Объект / Object	Параметр / Parameters	Методика Measurement system
Влияние носителя биомассы на микроорганизмы активного ила Biomass carrier effect on microorganisms in activated sludge		
Иловая смесь в модельных аэротенках Sludge mixture in model aeration tanks	Видовое разнообразие, функциональное состояние Species diversity, functional status	Визуально, микроскопирование Visually, microscopy
	Органолептические показатели (цвет, запах, структура хлопка) / Organoleptic indicators (color, smell, structure of floc)	Органолептически Organoleptically
	Иловый индекс, см <sup>3</sup> /г / Sludge index, cm <sup>3</sup> /g	ФР 1.31.2008.04397 FR 1.31.2008.04397
Биоплёнка Biofilm	Биомасса, г/г носителя / Biomass, g/g of carrier	Гравиметрический Gravimetric
	Видовое разнообразие, функциональное состояние Species diversity, functional state	Визуально, микроскопирование Visually, microscopy
Влияние носителя биомассы на гидрохимическую характеристику стоков Biomass carrier effect on hydrochemical characteristics of wastewater		
Очищенная вода Treated water	Прозрачность, см / Transparency, cm	ФР 1.31.2008.04397 FR 1.31.2008.04397
Влияние носителя биомассы на эффективность очистки стоков Biomass carrier effect on wastewater treatment efficiency		
Сточная вода, очищенная сточная вода Wastewater, treated wastewater	ХПК, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> / COD, mg O <sub>2</sub> /dm <sup>3</sup>	ПНД Ф 14.1:2:3.100-97 PND F 14.1:2:3.100-97
	Содержание нефтепродуктов, мг/дм <sup>3</sup> Oil content, mg/dm <sup>3</sup>	ПНД Ф 14.1:2:4.5-95 PND F 14.1:2:4.5-95
	Концентрация нитрит-ионов, мг/дм <sup>3</sup> Nitrite ion content, mg/dm <sup>3</sup>	ПНД Ф 14.1:2:4.3-95 PND F 14.1:2:4.3-95
	Концентрация нитрат-ионов, мг/дм <sup>3</sup> Nitrate ion content, mg/dm <sup>3</sup>	ПНД Ф 14.1:2:4.4-95 PND F 14.1:2:4.4-95
	Концентрация ионов аммония, мг/дм <sup>3</sup> Ammonium ion content, mg/dm <sup>3</sup>	ПНД Ф 14.1:2:3.1-95 PND F 14.1:2:3.1-95

Таблица 2 / Table 2

Частота встречаемости видов микроорганизмов / Microorganism frequency of occurrence [17]

Частота встречаемости Frequency of occurrence	Количество экземпляров одного вида Number of specimens per species	Баллы / Points
Единично / Occasional	1–3	1
Редко / Rare	4–10	2
Периодически / Periodically	10–20	3
Часто / Frequent	20–40	4
Массово / En masse	40–100	5

и углеродно-синтетический носитель биомассы (маркирован УСНБ) на основе остатков после термодесорбции (ОПТ) нефтесодержащих отходов (НСО) и отходов полиэтилена низкого давления (ПНД). Экспериментальные исследования проводили в трёх–пяти повторностях, результаты представлены как среднеарифметические значения с уровнем доверительной вероятности 0,95.

На первом этапе исследований контролировали скорость закрепления микроорганизмов на носителях биомассы путём взвешивания образцов в одинаковых условиях. Носители биомассы помещали в оболочки из полиамидных волокон и размещали в модельных аэротенках. При стабилизации значений закреплённой биомассы модельные аэротенки переводили в рабочий режим очистки нефтезагрязнённых сточных вод.

Эффективность применения носителей биомассы оценивали по гидрохимическим показателям активного ила и эффективности очистки нефтезагрязнённых сточных вод (табл. 1).

При микроскопировании активного ила на световом микроскопе ZEISS AxioLab 5, (увеличение ×600) определяли функциональное состояние организмов, подсчитывали организмы разных трофических уровней, классифицировали их по индикаторным группам. Частоту встречаемости видов микроорганизмов оценивали по пятибалльной шкале от 1 балла (единично встречается) до 5 баллов (встречаются в массе) (табл. 2).

Для подтверждения факта формирования биоплёнки на носителях использовали флуоресцентный стереомикроскоп с универсальной светодиодной подсветкой, оптической системой Галилея (*Galilean*), а также сканирующий электронный микроскоп Hitachi S-3400N с приставкой для рентгеновского энергодисперсионного микроанализа фирмы «Брукер».

### Результаты и обсуждение

Динамика прироста биомассы в статическом режиме на различных носителях представлена на рисунке 1.

Согласно проведённому анализу, основной прирост биомассы происходит в течение 10–14 сут (рис. 1). Биомасса остаётся стабильной в течение 20–25 сут, после чего происходит её снижение. Минимальное количество микроорганизмов закрепляется на МФ хлопьев рециклированного ПЭТ.

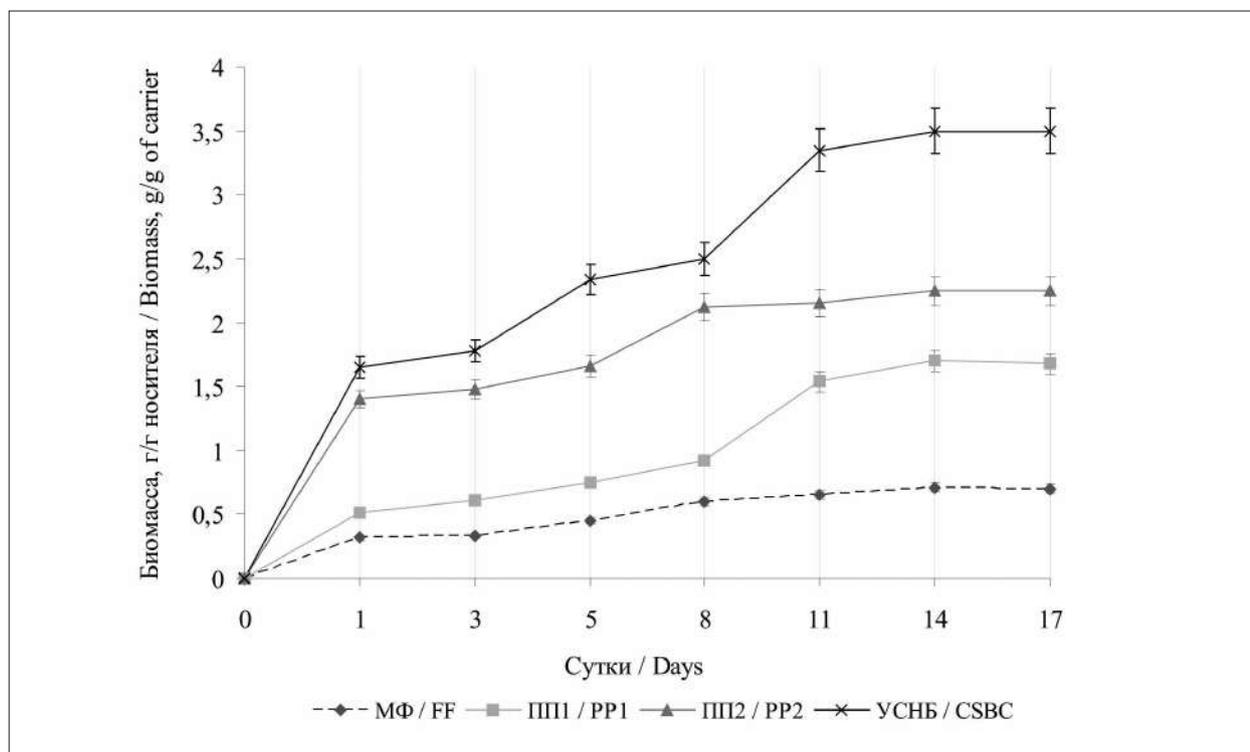
Наиболее эффективно происходит закрепление микроорганизмов на углеродно-синтетическом носителе (рис. 2, см. цв. вкладку I), чему способствуют: пористость за счёт присутствия пиро-углерода (12–16 % по массе сухого вещества); наличие в ОПТ НСО пиролизата избыточного активного ила, включающего азот (0,9–0,12 % по массе сухого вещества) и фосфор (2,5–2,9 % по массе сухого вещества), являющихся источниками питания для микроорганизмов.

Совместное применение в аэротенке свободноплавающих и прикреплённых на носителях микроорганизмов АИ приводит к снижению запаха АИ и повышению прозрачности очищенных СВ (табл. 3). Обработка лёгкой фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок раствором щёлочи снижает эффективность закрепления микроорганизмов на их поверхности, и соответственно, эффективность очистки СВ.

Использование в качестве носителя закреплённой биомассы необработанной лёгкой фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок и УСНБ позволяет повысить прозрачность очищенной воды, улучшить структуру хлопка и его седиментационные свойства (рис. 3).

Улучшение седиментационных свойств активного ила в модельных аэротенках с использованием носителей биомассы можно объяснить формированием биоценоза ила из представителей высших трофических уровней: раковинных амёб *Centropyxis* sp., брюхожестничных инфузорий *Aspidisca* sp., инфузорий *Litonotus* sp., прикреплённых форм инфузорий *Vorticella* sp., *Opercularia* sp. и *Thuricola* sp., со-сущих инфузорий *Tokophrya* sp. и коловраток *Philodina* sp.

Введение в модельные аэротенки носителей закреплённой биомассы привело к увели-



**Рис. 1.** Динамика прироста биомассы на носителях, г/г носителя: МФ – мелкая фракция хлопьев рециклированного ПЭТ, ПП1 – лёгкие фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок после промывки бутылок и обработки щёлочью, ПП2 – исходные лёгкие фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок, УСНБ – углеродно-синтетический носитель биомассы

**Fig. 1.** Dynamics of biomass growth on carrier, g/g of carrier: FF – fine fraction of recycled PET flakes, PP1 – light fraction of PET bottle recycling waste after bottle washing and alkali treatment, PP2 – original light fraction of PET bottle recycling waste, CSBC – carbon-synthetic biomass carrier

**Таблица 3 / Table 3**

Органолептические свойства активного ила и очищенных сточных вод, баллы  
Organoleptic properties of activated sludge and treated wastewater, points

Показатель Indicator	Вариант эксперимента / An experimental version				
	ОСВ-1 TWW-1	ОСВ-2-МФ TWW-2-FF	ОСВ-2-ПП1 TWW-2-PP1	ОСВ-2-ПП2 TWW-2-PP2	ОСВ-2-УСНБ TWW-2-CSBC
Запах, баллы Odor, points	4	3	3	2	2
Прозрачность воды, см Water transparency, cm	15	18	23	30	30

*Примечание: 1. Баллы: 1 – очень слабый, 2 – слабый, 3 – заметный, 4 – отчётливый, 5 – очень сильный. 2. Здесь и в табл. 3, 5–7, рис. 3: ОСВ – сточные воды, очищенные с помощью: ОСВ-1 – свободноплавающих микроорганизмов активного ила; ОСВ-2-МФ – мелкой фракции хлопьев рециклированного ПЭТ; ОСВ-2-ПП1 – лёгкой фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок в виде этикеток, обработанных раствором щёлочи при промывке; ОСВ-2-ПП2 – исходных этикеток с бутылок; ОСВ-2-УСНБ – углеродно-синтетического носителя биомассы.*

*Note: 1. Points: 1 – very weak, 2 – weak, 3 – noticeable, 4 – distinct, 5 – very strong. 2. Here and in Tables 3, 5–7, Fig. 3: TWW – wastewater treated by: TWW-1 – free-floating activated sludge microorganisms; TWW-2-FF – fine fraction of recycled PET flakes; TWW-2-PP1 – light fraction of PET bottle recycling waste in the form of labels treated with alkali solution during washing; TWW-2-PP2 – original labels from bottles; TWW-2-CSBC – carbon-synthetic biomass carrier.*

чению общего количества видов свободноплавающих микроорганизмов активного ила с 16 до 30, к повышению частоты их встречаемости в свободноплавающем активном иле (табл. 4) и к изменению физиологического состояния ресничных инфузорий и коловраток от неудо-

влетворительного (рис. 4а, см. цв. вкладку I) в свободноплавающем иле до удовлетворительного (рис. 4б, см. цв. вкладку I) на носителях биомассы.

Проведённый рентгеноспектральный анализ элементного состава иммобилизованных



Рис. 2. Внешний вид биоплёнки на углеродно-синтетическом носителе биомассы  
Fig. 2. Biofilm on the carbon-synthetic biomass carrier appearance



Рис. 4. Состояние инфузорий *Opercularia* sp. (увеличение  $\times 600$ ): а) свободно-плавающего ила, б) на носителях биомассы / Fig. 4. *Opercularia* sp.: a) in free-floating sludge, b) on biomass carriers (magnification  $\times 600$ )

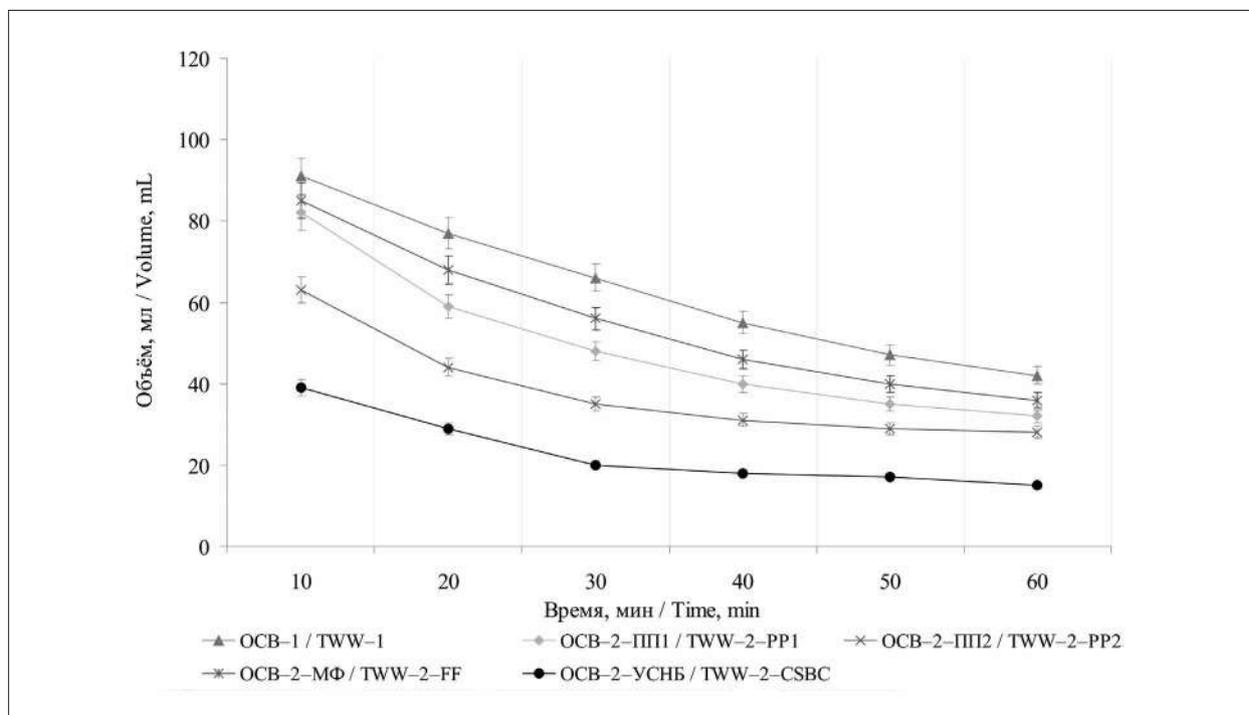


Рис. 3. Динамика оседания активного ила / Fig. 3. Activated sludge settling dynamics

Таблица 4 / Table 4

Частота встречаемости различных видов микроорганизмов в активном иле, баллы  
Frequency of occurrence of various types of microorganisms in activated sludge, points

Микроорганизмы Microorganisms	Время использования носителя 24 / 96 ч / Media usage time 24 / 96 hours				
	Вариант эксперимента / An experimental version				
	OCB-1 TWW-1	OCB-2-МФ TWW-2-FF	OCB-2-ПП1 TWW-2-PP1	OCB-2-ПП2 TWW-2-PP2	OCB-2-УСНБ TWW-2-CSBC
Первый трофический уровень / The first trophic level					
<i>Beggiatoa alba</i>	1 / 1	1 / 3	2 / 2	3 / 3	1 / 2
<i>Zoogloea ramigera</i>	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1
<i>Actinomycetales</i> sp.	2 / 1	2 / 2	2 / 2	2 / 1	2 / 2
Второй трофический уровень / The second trophic level					
Жгутиковые <i>Flagellates Bodo</i> sp.	1 / 1	1 / 2	2 / 2	2 / 1	2 / 2
<i>Euglypha</i> sp.	1 / 1	1 / 1	1 / 2	1 / 2	1 / 2
<i>Arcella</i> sp.	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 2
<i>Centropyxis</i> sp.	2 / 1	2 / 1	2 / 2	2 / 2	1 / 2
Третий трофический уровень / The third trophic level					
<i>Litonotus</i> sp.	1 / 1	1 / 2	2 / 1	2 / 2	2 / 2
<i>Aspidisca</i> sp.	2 / 2	2 / 3	2 / 4	2 / 4	2 / 4
<i>Opercularia</i> sp.	1 / 1	1 / 1	2 / 1	2 / 2	2 / 2
<i>Vaginicola</i> sp.	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1	2 / 2
<i>Philodina</i> sp.	1 / 1	1 / 1	2 / 1	2 / 2	3 / 3

Примечание: оценку частоты встречаемости в баллах см. в таблице 2.  
Note: for the frequency of occurrence in points, see Table 2.

на УСНБ микроорганизмов показал соответствие составу бактериальных клеток (табл. 5).

Применение для очистки нефтезагрязнённых СВ кроме свободноплавающих микроорганизмов активного ила закреплённых на носителях микроорганизмов привело к снижению и стабилизации значений илового индекса, а также, повышению эффективности очистки СВ от органических соединений, в том числе нефтепродуктов (табл. 6).

Присутствие в составе ОПТ НСО пироглерода позволяет полагать, что в процессе очистки с использованием УСНБ протекают процессы биосорбции [6, 18].

Эффективность иммобилизации микроорганизмов активного ила на УСНБ была подтверждена методом сканирующей электронной микроскопии (рис. 5).

Использование УСНБ повышает эффективность процесса биологической очистки СВ, содержащих трудноокисляемые органические компоненты, по показателю химическое потребление кислорода (ХПК) на 17 % и содержание нефтепродуктов на 7 % относительно эффективности процесса биологической очистки сточных вод свободноплавающим активным илом. Полученные результаты со-

поставимы с результатами при реализации процесса биосорбции [8, 12].

Применение в качестве носителя биомассы лёгкой фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок позволяет достичь эффективности удаления органических веществ по ХПК до 90 % за 4–6 ч при температуре 20÷22 °С. При использовании других видов пластика и более высокой температуры указанная эффективность достигается за 19 ч [8].

Наиболее эффективна очистка нефтезагрязнённых сточных вод при использовании в качестве носителя закреплённой биомассы необработанной лёгкой фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок и УСНБ. Применение носителей биомассы на основе рассматриваемых вторичных ресурсов позволяет повысить эффективность очистки трудноокисляемых СВ от органических веществ, в том числе нефтепродуктов, в 2,5–3,0 раза.

Использование в качестве носителя закреплённой биомассы УСНБ позволяет сформировать нитрифицирующий биоценоз активного ила, что подтверждается снижением содержания в очищенной СВ соединений азота: ионов аммония, нитрит-ионов и нитрат-ионов (табл. 7).

Таблица 5 / Table 5

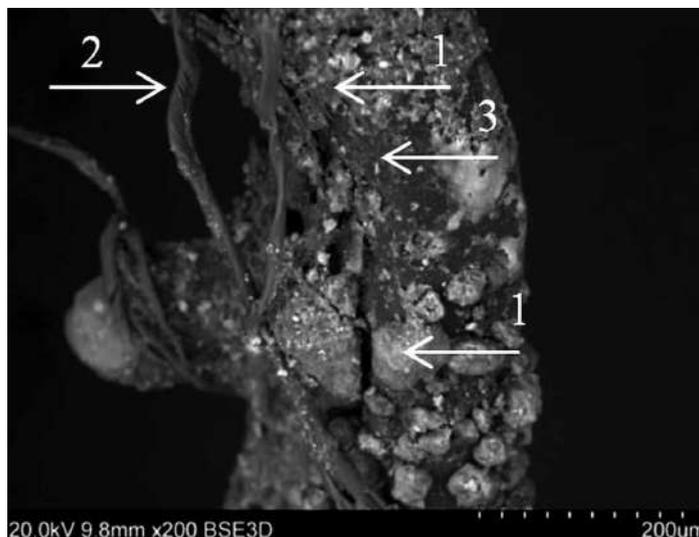
Элементный состав иммобилизованных микроорганизмов  
Elemental composition of immobilised microorganisms

Элемент / Element	Содержание, мас. сух. в-ва, % / Content, wt. dry wt. %
Углерод / Carbon	17,3 ± 0,9
Кислород / Oxygen	41,7 ± 2,1
Алюминий / Aluminum	0,390 ± 0,020
Фосфор / Phosphorus	0,640 ± 0,032
Кальций / Calcium	40,1 ± 2,0

Таблица 6 / Table 6

Эффективность очистки сточных вод от органических соединений  
Efficiency of wastewater treatment from organic compounds

Показатель Indicator	Вариант эксперимента / An experimental version				
	ОСВ-1 TWW-1	ОСВ-2-МФ TWW-2-FF	ОСВ-2-ПП1 TWW-2-PP1	ОСВ-2-ПП2 TWW-2-PP2	ОСВ-2-УСНБ TWW-2-CSBC
Иловый индекс Sludge index	156 ± 8	133 ± 7	127 ± 6	98 ± 5	90 ± 5
Эффективность очистки по содержанию нефтепродуктов, % Treatment efficiency for oil content, %	90 ± 5	91 ± 5	94 ± 5	96 ± 5	97 ± 5
Эффективность очистки по величине химического потребления кислорода, % Treatment efficiency for chemical oxygen demand, %	75,0 ± 3,8	88 ± 4	89 ± 5	90 ± 5	92 ± 5



**Рис. 5.** Внешний вид биомассы микроорганизмов, иммобилизованных на углеродно-синтетическом носителе (увеличение  $\times 200$ ):  
 1) биомасса микроорганизмов активного ила; 2) термообработанный полиэтилен низкого давления;  
 3) остатки после термодесорбции нефтесодержащих отходов  
**Fig. 5.** Appearance of microorganism biomass immobilized on a carbon-synthetic carrier (magnification  $\times 200$ ): 1) microorganism biomass from activated sludge;  
 2) heat-treated low-pressure polyethylene;  
 3) residues after thermal desorption of oil-containing waste

**Таблица 7 / Table 7**

Содержание в очищенной сточной воде соединений азота  
 Content of nitrogen compounds in treated wastewater

Показатель / Indicator	Концентрация, мг/дм <sup>3</sup> / Concentration, mg/dm <sup>3</sup>		
	Вариант эксперимента / An experimental version		
	СВ / WW	ОСВ-1 / TWW-1	ОСВ-2-УСНБ / TWW-2-CSBC
Нитрат-ион / Nitrate ion	0,19 ± 0,06	0,27 ± 0,09	6,8 ± 1,5
Нитрит-ион / Nitrite ion	0,140 ± 0,020	0,094 ± 0,018	0,020 ± 0,004
Ионы аммония / Ammonium ions	10,8 ± 2,3	6,7 ± 1,4	0,35 ± 0,12

Примечание: СВ – исходные сточные воды.  
 Note: WW – raw wastewater.

**Таблица 8 / Table 8**

Эффективность использования различных типов носителей закреплённой биомассы  
 Efficiency of using different types of fixed biomass carriers

Эффективность / Efficiency	УСНБ / CSBC	МФ, ПП1, ПП2 FF, PP1, PP2	Синтетический волокнисто-пористый нетканый материал / Synthetic fibre-porous nonwoven material [22]	Пенополипропиленовые ерши / Polypropylene foam ruffs [4]	Гранулы полиэтилена высокого давления / High-pressure polyethylene granules [4]
По ХПК, % / COD removal, %	92	85–90	80	85–90	90–95
По нефтепродуктам, % / Oil product removal, %	96,7	90	75	80–85	90

Применение в составе носителей биомассы пластиков может привести к формированию вторичных загрязнений очищенных СВ микропластиками [19–21]. Оценка потенциальных эмиссий микропластика из мелкой фракции хлопьев рециклированного ПЭТ с использованием светового микроскопа при увеличении  $\times 1000$  показала их отсутствие после 60-кратного применения загрузки.

Углеродно-синтетический носитель биомассы на основе остатков после термодесорбции НСО и отходов ПНД характеризуется эффективностью очистки СВ от органических веществ на уровне известных аналогов (табл. 8), но при этом наиболее эффективно удаляет нефтепродукты. Применение УСНБ на типовом нефтеперерабатывающем заводе позволяет снизить величину экологического ущерба на 1 627 389,82 руб/год.

Использование УСНБ в качестве носителя закреплённой биомассы в системах биологической очистки СВ сложного состава позволяет получать носитель биомассы полностью из отходов и вовлекать в оборот неиспользуемые в настоящее время остатки пиролиза нефтесодержащих отходов.

### Заключение

В результате проведения экспериментальных исследований установлено, что прирост биомассы на носителях из вторичных ресурсов происходит в течение 10–14 сут. и биомасса остаётся стабильной в течение 20–25 сут.

Использование в качестве носителя закреплённой биомассы необработанной лёгкой фракции отходов рециклинга ПЭТ бутылок и УСНБ способствует формированию стабильного биоценоза активного ила, обеспечивающего:

- улучшение органолептических свойств активного ила и очищенных сточных вод,
- стабилизацию значений илового индекса и приближение его к рекомендуемым диапазонам,
- повышение видового разнообразия микроорганизмов свободноплавающего ила и улучшение их физиологического состояния,
- повышение эффективности очистки трудноокисляемых сточных вод и снижение содержания в очищенных сточных водах органических веществ, в том числе нефтепродуктов, в 2,5–3 раза,
- снижение содержания в очищенной сточной воде ионов аммония на 94 %, нитрит-ионов на 79 %.

### Литература

1. Шлёкова И.Ю., Кыш А.И. Повышение эффективности аэробной биологической очистки нефтесодержащих сточных вод // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 1. С. 203–209. doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-203-209
2. Ильина Т.С., Романова Ю.М., Гинцбург А.Л. Биоплёнки как способ существования бактерий в окружающей среде и организме хозяина: феномен, генетический контроль и системы регуляции их развития // Генетика. 2004. Т. 40. № 11. С. 1445–1456.
3. Куликов М.И., Зубов, Г.М., Зубов М.Г., Попов Д.В. Биореактор доочистки биологически очищенных сточных вод // Патент RU 95331 U1. Заявление: 2010107913/22, 03.03.2010. Дата публикации: 27.06.2010. Бюлл. 18.
4. Анфимова Ю.В. Снижение негативного воздействия станций биологической очистки нефтезагрязнённых сточных вод на объекты окружающей среды // Экология и промышленность России. 2008. № 6. С. 34–37.
5. Колесников В.П., Колесников Д.В. Установка для биохимической очистки сточных вод // Патент RU 2422379 C1. Заявление: 2009143268/05, 23.11.2009. Дата публикации: 27.06.2011. Бюлл. 18.
6. Muliyadi M., Purwanto P., Sumiyati S., Retnaningsih Soeprbowati T. Removal of pollutants in wastewater using plastic-based media biofiltration: a meta-analysis // Pollution. 2023. V. 9. No. 1. P. 421–432. doi: 10.22059/POLL.2022.349305.1642
7. Шелкунова М.В. Разработка материала-носителя биомассы из высоконаполненного микроцеллюлозой ПВД // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 3. С. 192–194. doi: 10.20914/2310-1202-2019-3-192-194
8. Güneş Y. Inhibition of boric acid and sodium borate on the biological activity of microorganisms in an aerobic biofilter // Environ. Technol. 2013. V. 34. No. 9–12. P. 1117–1121. doi: 10.1080/09593330.2012.736540
9. Dorji U., Dorji P., Shon H., Badeti U., Dorji C., Wangmo C., Tijing L., Kandasamy J., Vigneswaran S., Chanan A., Phuntsho S. On-site domestic wastewater treatment system using shredded waste plastic bottles as biofilter media: pilot-scale study on effluent standards in Bhutan // Chemosphere. 2022. No. 286. Pt. 2. Article No. 131729. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131729
10. Juniarta P.S., Budiarsa Suyasa I.W., Sila Dharma IGB. Effectiveness of biofilter made from plastic waste to decrease BOD, COD and ammonia of hospital wastewater // ECOTROPIC: Jurnal Ilmu Lingkungan (Journal of Environmental Science). 2018. V. 12. No. 1. P. 1–8. doi: 10.24843/EJES.2018.v12.i01.p01
11. Zeng M., Soric A., Ferrasse J.H., Roche N. Interpreting hydrodynamic behaviour by the model of stirred tanks in series with exchanged zones: preliminary study in lab-scale trickling filters // Environ. Technol. 2013. V. 34. No. 18. P. 2571–2578. doi: 10.1080/09593330.2013.781199

12. Шлёкова И.Ю., Кныш А.И. Интенсификация биологической очистки производственных сточных вод в аэротенках с помощью адсорбентов // *Экология и промышленность России*. 2018. Т. 22. № 6. С. 20–25. doi: 10.18412/1816-0395-2018-6-20-25

13. Самков А.А., Волченко Н.Н., Худокормов А.А., Самкова С.М., Карасева Э.В. Оптимизация условий иммобилизации микробных клеток при создании био-препаратов для биодegradации углеводов // *Теоретическая и прикладная экология*. 2021. № 1. С. 194–202. doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-194-202

14. Полыгалов С.В., Ильиных Г.В., Коротаев В.Н., Станиславлевич Н. Оценка эффективности раздельного сбора ПЭТ-бутылок с использованием уличных контейнеро-сеток // *Экология и промышленность России*. 2019. Т. 23. № 11. С. 55–59. doi: 10.18412/1816-0395-2019-11-55-59

15. Калинина Е.В. Использование материального ресурса твёрдых остатков пиролиза нефтесодержащих отходов // *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2022. № 5. С. 40–46. doi: 10.33285/2411-7013-2022-5(308)-40-46

16. Калинина Е.В., Рудакова Л.В. Оценка жиз-ненного цикла методов обезвреживания и утилизации нефтесодержащих отходов нефтеперерабатывающих предприятий // *Экология и промышленность России*. 2021. Т. 25. № 12. С. 38–43. doi: 10.18412/1816-0395-2021-12-38-43

17. Рекомендации по проведению гидробиологиче-ского контроля на сооружениях биологической очистки с аэротенками. Пермь: Изд-во ПГТУ, 2004. 52 с.

18. Nurullina E.N., Sirotkin A.S., Ponkratova S.V., Shaginurova G.I., Emelyanov V.M. Intensification of biological oxidation of contaminants in the biosorption systems for wastewater purification // *Biotechnology in Russia*. 2002. No. 1. P. 45–51.

19. Carr S.A., Liu J., Tesoro A.G. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants // *Water Res.* 2016. V. 91. P. 174–182. doi: 10.1016/j.watres.2016.01.002

20. Gatidou G., Arvaniti O.S., Stasinakis A.S. Review on the occurrence and fate of microplastics in Sewage Treat-ment Plants // *J. Hazard. Mater.* 2019. V. 367. P. 504–512. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.12.081

21. Sun J., Dai X., Wang Q., van Loosdrecht M.C.M., Ni B.J. Microplastics in wastewater treatment plants: detec-tion, occurrence and removal // *Water Res.* 2019. V. 152. P. 21–37. doi: 10.1016/j.watres.2018.12.050

22. Савицкий Н.Е., Лисицын В.Л., Кравцов А.Г. Носитель биомассы фильтров для биологической очистки сточных вод // Патент ЕА 007088 В1. Заявление: ЕА 200500433 А, 30.03.05. Дата публикации: 30.06.06.

## References

1. Shlekova I.Yu., Knysh A.I. Improving the efficiency of aerobic biological treatment of oily wastewater // *Theo-*

*retical and Applied Ecology*. 2021. No. 1. P. 203–209 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-203-209

2. Ilina T.S., Romanova Yu.M., Gintsburg A.L. Biofilms as a mode of existence of bacteria in external environment and host body: phenomenon, genetic control, and regulation systems of development // *Genetics*. 2004. V. 40. No 11. P. 1445–1456 (in Russian).

3. Kulikov M.I., Zubov G.M., Zubov M.G., Popov D.V. Bioreactor for additional treatment of biologically treated wastewater // Patent RU 95331 U1. Application: 2010107913/22, 03.03.2010. Date of publication: 27.06.2010. Bull. 18 (in Russian).

4. Anfimova Yu.V. Reduction of the negative influ-ence of the biological treatment stations of the oil-polluted wastewater on the environmental objects // *Ecology and Industry of Russia*. 2008. No. 6. P. 34–37 (in Russian).

5. Kolesnikov V.P., Kolesnikov D.V. Effluents bio-chemical treatment plant // Patent RU 2422379 C1. Ap-plication: 2009143268/05, 23.11.2009. Date of publication: 27.06.2011. Bull. 18 (in Russian).

6. Mulyadi M., Purwanto P., Sumiyati S., Retnaning-sih Soeprbowati T. Removal of pollutants in wastewater using plastic-based media biofiltration: a meta-analysis // *Pollution*. 2023. V. 9. No. 1. P. 421–432. doi: 10.22059/POLL.2022.349305.1642

7. Shelkunova M.V. Development of biomass carrier material from high-filled with microcellulose LDPE // *Proceedings of VSUET*. 2019. V. 81. No. 3. P. 192–194 (in Russian). doi: 10.20914/2310-1202-2019-3-192-194

8. Güneş Y. Inhibition of boric acid and sodium borate on the biological activity of microorganisms in an aerobic biofilter // *Environ. Technol.* 2013. V. 34. No. 9–12. P. 1117–1121. doi: 10.1080/09593330.2012.736540

9. Dorji U., Dorji P., Shon H., Badeti U., Dorji C., Wangmo C., Tijing L., Kandasamy J., Vigneswaran S., Chanan A., Phuntsho S. On-site domestic wastewater treatment system using shredded waste plastic bottles as biofilter media: pilot-scale study on effluent standards in Bhutan // *Chemosphere*. 2022. No. 286. Pt. 2. Article No. 131729. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131729

10. Juniarta P.S., Budiarsa Suyasa I.W., Sila Dharma I. Effectiveness of biofilter made from plastic waste to de-crease bod, cod and ammonia of hospital wastewater // *ECOTROPIC: Jurnal Ilmu Lingkungan (Journal of Environmental Science)*. 2018. V. 12. No. 1. P. 1–8 (in Indonesian). doi: 10.24843/EJES.2018.v12.i01.p01

11. Zeng M., Soric A., Ferrasse J.H., Roche N. Inter-preting hydrodynamic behaviour by the model of stirred tanks in series with exchanged zones: preliminary study in lab-scale trickling filters // *Environ. Technol.* 2013. V. 34. No. 18. P. 2571–2578. doi: 10.1080/09593330.2013.781199

12. Shlekova I.Yu., Knysh A.I. Intensification of bio-logical treatment of industrial wastewater in aeration tanks using adsorbents // *Ecology and Industry of Russia*. 2018. V. 22. No. 6. P. 20–25 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2018-6-20-25

13. Samkov A.A., Volchenko N.N., Khudokormov A.A., Samkova S.M., Karaseva E.V. Optimization of the conditions of microbial cells immobilization for the creation of hydrocarbons-degrading biopreparations // *Theoretical and Applied Ecology*. 2021. No. 1. P. 194–202 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-194-202
14. Polygalov S.V., Il'inykh G.V., Korotaev V.N., Stanisavlevich N. Evaluation of the effectiveness of separate collection of PET bottles using street container-baskets // *Ecology and Industry of Russia*. 2019. V. 23. No. 11. P. 55–59 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2019-11-55-59
15. Kalinina E.V. Use of material resource of solid residues of oil-containing waste pyrolysis // *Environmental protection in oil and gas complex*. 2022. No. 5. P. 40–46 (in Russian). doi: 10.33285/2411-7013-2022-5(308)-40-46
16. Kalinina E.V., Rudakova L.V. Life cycle assessment of the management and disposal of oil-containing wastes from refineries // *Ecology and Industry of Russia*. 2021. V. 25. No. 12. P. 38–43 (in Russian). doi: 10.18412/1816-0395-2021-12-38-43
17. Guidelines for hydrobiological control at biological treatment facilities with aeration tanks. Perm: Perm State Technical University Publishing House, 2004. 52 p. (in Russian).
18. Nurullina E.N., Sirotkin A.S., Ponkratova S.V., Shaginurova G.I., Emelyanov V.M. Intensification of biological oxidation of contaminants in the biosorption systems for wastewater purification // *Biotechnology in Russia*. 2002. No. 1. P. 45–51.
19. Carr S.A., Liu J., Tesoro A.G. Transport and fate of microplastic particles in wastewater treatment plants // *Water Res*. 2016. V. 91. P. 174–182. doi: 10.1016/j.watres.2016.01.002
20. Gatidou G., Arvaniti O.S., Stasinakis A.S. Review on the occurrence and fate of microplastics in Sewage Treatment Plants // *J. Hazard. Mater*. 2019. V. 367. P. 504–512. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.12.081
21. Sun J., Dai X., Wang Q., van Loosdrecht M.C.M., Ni B.J. Microplastics in wastewater treatment plants: Detection, occurrence and removal // *Water Res*. 2019. V. 152. P. 21–37. doi: 10.1016/j.watres.2018.12.050
22. Savitskiy N.E., Lisitsyn V.L., Kravtsov A.G. Filter biomass carrier for biological treatment of sewage water // Patent EA 007088 B1. Application: EA 200500433 A, 30.03.05. Date of publication: 30.06.06 (in Russian).