

# **ОЧИСТКА ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА**

---

УДК 628.212.2  
DOI 10.35776/VST.2024.01.07

## **Опыт всесезонной эксплуатации фильтра ФОПС® с природным цеолитом при очистке поверхностного стока с техногенно нагруженной территории**

**М. А. Греков<sup>1</sup>, С. В. Елагин<sup>2</sup>, А. И. Клоков<sup>3</sup>, Л. В. Леонов<sup>4</sup>, М. А. Тряскин<sup>5</sup>, А. В. Чечевичкин<sup>6</sup>, Л. А. Якунин<sup>7</sup>**

<sup>1</sup> Греков Михаил Александрович, кандидат технических наук, главный инженер,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, тел.: +7 (812) 552-75-57, e-mail: vicerector.fm@spbstu.ru

<sup>2</sup> Елагин Сергей Вениаминович, директор Департамента инженерных служб,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, тел.: +7 (812) 297-20-45, e-mail: dgigpu@spbstu.ru

<sup>3</sup> Клоков Александр Иванович, начальник Службы главного технолога филиала «Водоотведение Санкт-Петербурга»,  
ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»

198184, Россия, Санкт-Петербург, остров Белый, 1, тел.: +7 (812) 438-44-47, e-mail: Klokov\_AI@vodokanal.spb.ru

<sup>4</sup> Леонов Леонид Владимирович, главный специалист по технологическому развитию, Департамент анализа  
и технологического развития систем водоснабжения и водоотведения, ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»  
191015, Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская ул., 42, тел.: +7 (812) 326-52-42, e-mail: Leonov\_LV@vodokanal.spb.ru

<sup>5</sup> Тряскин Михаил Александрович, инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории «Технологии очистки  
промышленных и поверхностных сточных вод», Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства  
Инженерно-строительного института, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

195251, Россия, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, тел.: +7 (964) 391-07-09, e-mail: tryaskin\_ma@spbstu.ru

<sup>6</sup> Чечевичкин Алексей Викторович, генеральный директор, ООО «Аква-Венчур®»  
195220, Россия, Санкт-Петербург, Гражданский проспект, 22, тел.: +7 (812) 640-08-40, e-mail: 01@6400840.ru

<sup>7</sup> Якунин Леонид Александрович, начальник конструкторского отдела, ООО «Аква-Венчур®»  
195220, Россия, Санкт-Петербург, Гражданский проспект, 22, тел.: +7 (812) 640-08-40, e-mail: 77@6400840.ru

**Для цитирования:** Греков М. А., Елагин С. В., Клоков А. И., Леонов Л. В., Тряскин М. А., Чечевичкин А. В., Якунин Л. А. Опыт всесезонной эксплуатации фильтра ФОПС® с природным цеолитом при очистке поверхностного стока с техногенно загруженной территорией // Водоснабжение и санитарная техника. 2024. № 1. С. 44–51. DOI: 10.35776/VST.2024.01.07.

Рассмотрена проблема загрязнения поверхностных сточных вод с селитебных территорий тяжелыми металлами, описаны основные источники их поступления. Представлены результаты натурных испытаний фильтра ФОПС®-Ц (с загрузкой из природного цеолита). Произведена оценка эффективности и качества очистки поверхностных сточных вод от тяжелых металлов с использованием фильтра ФОПС®-Ц. Испытания проводились на реальной селитебной территории в Санкт-Петербурге на протяжении семи сезонов (2021–2022 годы). Приведены результаты

применения фильтра-корзины ФОПС®-К (был установлен перед фильтром ФОПС®-Ц) на первой ступени очистки поверхностных сточных вод, формирующихся на селитебной территории, а также результаты исследования фракционного состава мусора, накопившегося в корзине фильтра ФОПС®-К за весь период проводившихся испытаний.

**Ключевые слова:** фильтр ФОПС®, фильтрующий патрон, очистка, поверхностные сточные воды, тяжелые металлы, коэффициент вариации.

### **SURFACE RUNOFF TREATMENT**

---

## **Experience of all-season use of FOPS® filter with natural zeolite for the treatment of surface runoff from technologically disturbed territories**

**М. А. Греков<sup>1</sup>, С. В. Елагин<sup>2</sup>, А. И. Клоков<sup>3</sup>, Л. В. Леонов<sup>4</sup>, М. А. Тряскин<sup>5</sup>, А. В. Чечевичкин<sup>6</sup>, Л. А. Якунин<sup>7</sup>**

<sup>1</sup> Grekov Mikhail, Ph. D. (Engineering), Chief Engineer, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
29 Politekhnicheskaya St., Saint-Petersburg, 195251, Russian Federation, tel.: +7 (812) 552-75-57, e-mail: vicerector.fm@spbstu.ru

<sup>2</sup> Elagin Sergei, Director of the Engineering Services Department, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
29 Politekhnicheskaya St., Saint-Petersburg, 195251, Russian Federation, tel.: +7(812) 297-20-45,  
e-mail: dgigpu@spbstu.ru

<sup>3</sup> Klokov Aleksandr, Head of the Chief Process Engineer Service of the «Wastewater Disposal of St. Petersburg» Branch,  
SUE «Vodokanal of St. Petersburg»  
1 Bely Island, Saint-Petersburg, 198184, Russian Federation, tel.: +7(812) 438-44-47,  
e-mail: Klokov\_AI@vodokanal.spb.ru

<sup>4</sup> Leonov Leonid, Chief Specialist for Technological Development, Department of Analysis and Technological Development  
of Water Supply and Wastewater Disposal Systems, SUE «Vodokanal of St. Petersburg»  
42 Kavalergardskaia St., Saint-Petersburg, 191015, Russian Federation, tel.: +7(812) 326-52-42,  
e-mail: Leonov\_LV@vodokanal.spb.ru

<sup>5</sup> Triaskin Mikhail, Research Engineer at the Research Laboratory «Technologies for the treatment of industrial  
and surface wastewater», Higher School of Hydraulic and Energy Construction of the Civil Engineering Institute,  
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
29 Politekhnicheskaya St., Saint-Petersburg, 195251, Russian Federation, tel.: +7(964) 391-07-09,  
e-mail: tryaskin\_ma@spbstu.ru

<sup>6</sup> Chechevichkin Aleksei, General Director, AQUA-Venture®, LLC  
22 Grazhdanskii Ave., Saint-Petersburg, 195220, Russian Federation, tel.: +7(812) 640-08-40, e-mail: 01@6400840.ru

<sup>7</sup> Iakunin Leonid, Head of Design Department, Aqua-Venture®, LLC  
22 Grazhdanskii Ave., Saint-Petersburg, 195220, Russian Federation, tel.: +7(812) 640-08-40, e-mail: 77@6400840.ru

**For citation:** Grekov M. A., Elagin S. V., Klokov A. I., Leonov L. V., Triaskin M. A., Chechevichkin A. V., Iakunin L. A. Experience of all-season use of FOPS® filter with natural zeolite for the treatment of surface runoff from technologically disturbed territories. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2024, no. 1, pp. 44–51. DOI: 10.35776/VST.2024.01.07. (In Russian).

The aspects of pollution of surface runoff from residential areas with heavy metals is considered, and the main sources of their inflow are described. The results of full-scale tests of FOPS®-Z filter (with natural zeolite media) are presented. The efficiency and level of heavy metals removal from surface runoff using the FOPS®- Z filter was estimated. Tests were carried out on a real residential area in St. Petersburg for seven seasons (2021–2022). The results of using FOPS®-K filter basket (installed upstream of FOPS®-Z filter) at the first stage of purification of surface runoff from the residential area are presented, as well as the results of a study of the fractional composition of wastes accumulated in the FOPS®-K filter basket for the entire period of testing.

**Key words:** FOPS®filter, filter cartridge, treatment, surface runoff, heavy metals, coefficient of variation.

Загрязнение территорий городов и, как следствие, формирование на них содержащих различные загрязнители поверхностных сточных вод приобретает в последнее время катастрофический характер. Проведенные в последние годы многочисленные исследования свидетельствуют о значительном загрязнении поверхностных сточных вод с селитебных территорий различными веществами, что связано с увеличением техногенной нагрузки [1; 2] и увеличением количества автотранспорта в городах. Для окружающей среды одними из наиболее опасных загрязнителей являются тяжелые металлы. В поверхностных сточных водах с улично-дорожной сетью селитебных территорий чаще всего содержатся железо, марганец, цинк, свинец, алюминий, в меньших количествах — медь, никель и кадмий [3–6].

Основным источником загрязнения поверхностных сточных вод с селитебных территорий тяжелыми металлами является автотранспорт. Тяжелые металлы попадают в поверхностные сточные воды при смыте осевших на водосборных поверхностях селитебных территорий нерастворимых продуктов коррозии элементов конструкции автомобилей и износа тормозных

колодок, а также продуктов сгорания топлива [7; 8]. Эти нерастворимые формы в зависимости от ряда факторов (степень диспергируемости нерастворимых форм, окислительно-восстановительные и кислотно-основные условия, наличие в поверхностных сточных водах комплексообразователей и поверхностно-активных веществ) могут образовывать высокоподвижные растворимые соединения [9; 10].

Загрязнение поверхностных сточных вод тяжелыми металлами может происходить дополнительно как при смыте продуктов коррозии кровель из оцинкованной стали (цинка в виде подвижных соединений), так и за счет инфильтрационного просачивания загрязненных пластовых вод через стыки труб, стенки или днища канализационных колодцев (растворенных биогенных форм железа и марганца, а также подвижных форм цинка, алюминия, меди, никеля и кадмия) [6]. Кроме того, для селитебных территорий характерно наличие значительного количества мусора, который также оказывает влияние на состав поверхностных сточных вод [11; 12]. В лабораторных условиях подобные сточные воды смоделировать крайне затруднительно, поэтому изучение возможности их очистки целесо-

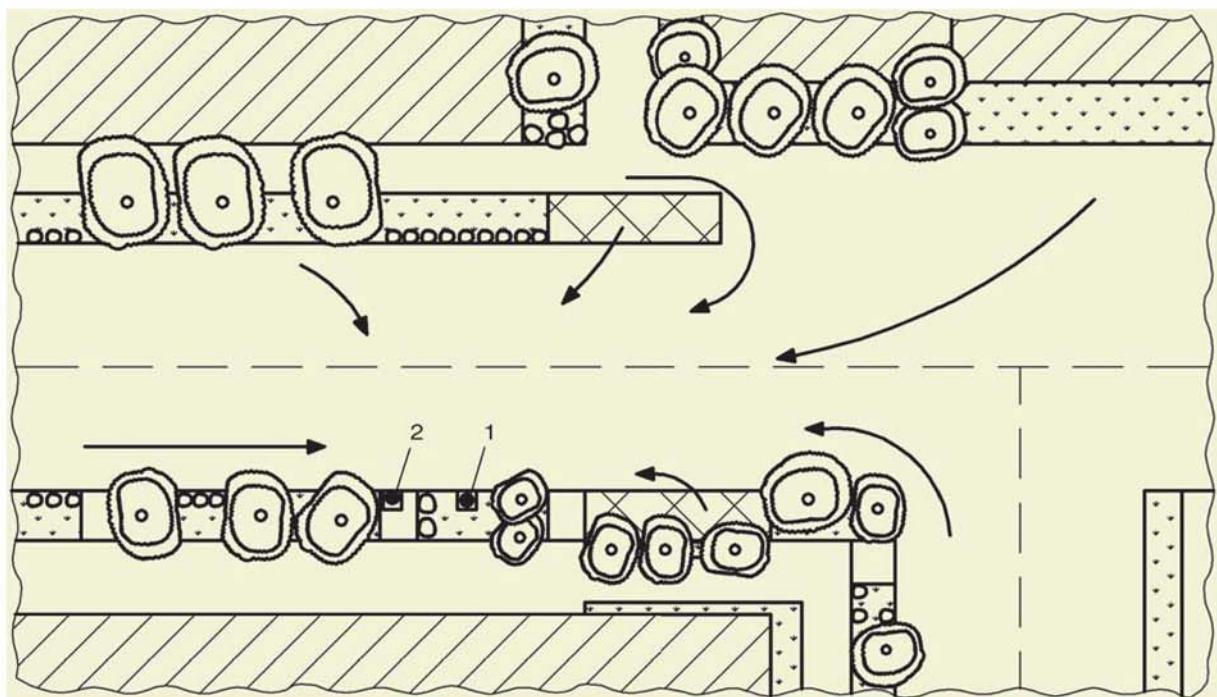


Рис. 1. Схема участка территории для испытаний фильтра ФОПС®-Ц-0,58-1,8

кровля; асфальт (дорога); асфальт (тротуар); места стоянки автотранспорта; газон; дерево; кустарник; → направление движения ПСВ; 1 – колодец с фильтрами ФОПС®; 2 – байпасный колодец

образно проводить на территориях реальных объектов.

Очистка сильно загрязненных тяжелыми металлами поверхностных сточных вод представляет собой сложную технологическую задачу, основными составляющими которой являются: оптимизация необходимой эффективности очистки и минимизация капитальных и эксплуатационных затрат. Решение вышеуказанной задачи невозможно без применения сорбционно-фильтрационных технологий [1; 6; 12–15], причем наиболее перспективным подходом к их реализации является использование недорогих материалов природного происхождения (цеолиты, трепела, опоки, слюды и др.), упакованных промышленным способом в водопроницаемые контейнеры – фильтрующие патроны [1; 6; 16–18]. Наиболее технически проработанным и широко применяемым для очистки поверхностных сточных вод оборудованием такого типа являются фильтры, выпускаемые под торговой маркой ФОПС® [1; 6; 16; 19].

Для проведения натурных испытаний были взяты фильтр ФОПС®-Ц-0,58-1,8 и фильтр-корзина ФОПС®-К-0,58 (для предварительной очистки поверхностных сточных вод от мусора и крупных взвешенных веществ), целесообразность применения которых была обоснована во время испытаний, описанных в работе [1].

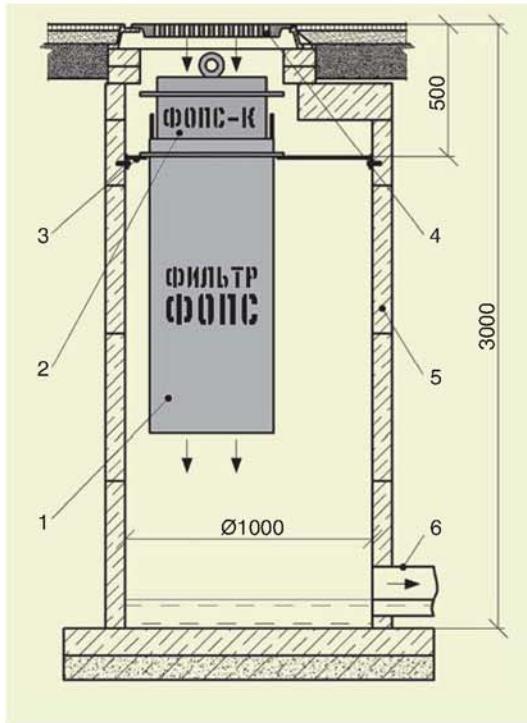
Натурные испытания фильтра ФОПС®-Ц-0,58-1,8 проводились на участке центрального

кампуса ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» общей площадью 0,35 га, схема которого представлена на рис. 1.

Фильтры ФОПС®-Ц-0,58-1,8 и ФОПС®-К-0,58 были установлены в сборный железобетонный колодец диаметром 1 м, схема которого приведена на рис. 2, на разборное опорное кольцо ОК-1,0-0,58-РА (СТО 64235108-005-2016) согласно техническим указаниям [19]. Условия эксплуатации фильтров ФОПС®-Ц-0,58-1,8 и ФОПС®-К-0,58 были аналогичны описанным ранее [1].

В период испытаний (апрель 2021 г. – ноябрь 2022 г.) с интервалом один раз в месяц производили отбор проб поверхностных сточных вод до и после фильтра ФОПС®-Ц-0,58-1,8, в которых определяли содержание значимых загрязнителей. В табл. 1 приведены максимальные исходные (до фильтра) концентрации  $C_0^{\max}$  тяжелых металлов в поверхностных сточных водах, которые были отмечены за весь период испытаний.

Из данных табл. 1 видно, что поверхностные сточные воды, формировавшиеся на улично-дорожной сети селитебной территории, где проводились испытания фильтра ФОПС®-Ц-0,58-1,8, были существенно загрязнены тяжелыми металлами. Средние за сезон исходные концентрации  $\bar{C}_0$  тяжелых металлов в поверхностных сточных водах, поступавших на фильтр ФОПС®-Ц-0,58-1,8, приведены в табл. 2.



**Рис. 2. Схема канализационного колодца с установленными фильтрами ФОПС®-Ц-0,58-1,8 и ФОПС®-К-0,58**  
1 – фильтр ФОПС®-Ц-0,58-1,8; 2 – фильтр-корзина ФОПС®-К-0,58; 3 – кольцо опорное ОК-1.0-0,58-РА; 4 – дождеприемник ДБ2(В125)-1-60; 5 – канализационный колодец диаметром 1 м; 6 – трубопровод отведения очищенных поверхностных сточных вод

Как видно из данных табл. 2, максимальное содержание практически всех определявшихся тяжелых металлов наблюдалось весной и зимой, что, вероятно, связано с накоплением их в снежном покрове за зимний период и последующим смызов этих загрязнителей в ливневую канализацию во время снеготаяния и первых весенних дождей. Минимальное содержание определявшихся тяжелых металлов наблюдалось летом, что может быть связано с регулярным проведением мероприятий по уборке и мойке проезжей части автомобильной дороги, а также значительным уменьшением количества автомобилей на данной территории в летний период.

Колебательный характер изменения исходных концентраций  $C_0$  тяжелых металлов в поверхностных сточных водах связан с тем, что эти загрязнители поступали на водосборные поверхности селитебной территории, на которой проводились испытания фильтра ФОПС®-Ц-0,58-1,8, нерегулярно и в разных количествах (в основном от автотранспорта). Изменчивость исходных концентраций  $C_0$  может быть оценена с помощью коэффициентов вариации  $\sigma_{C_0}$ , определяемых по формуле:

$$\sigma_{C_0} = \frac{1}{\bar{C}_0} \sqrt{D_{C_0}^2} \cdot 100\%, \quad (1)$$

Таблица 1

Загрязнитель	$C_0^{\max}$ , мг/дм <sup>3</sup>
Железо (общ.)	19,2
Марганец	0,98
Алюминий	15
Цинк	0,84
Свинец	0,45
Кадмий	0,018

Таблица 2

Загрязнитель	$\bar{C}_0$ , мг/дм <sup>3</sup>			
	весна	лето	осень	зима
Железо (общ.)	11,05	2,75	4,32	5,9
Марганец	0,49	0,47	0,43	0,76
Алюминий	8,1	3,1	3,5	2,4
Цинк	0,63	0,41	0,59	0,46
Свинец	0,34	0,19	0,26	0,34
Кадмий	0,0034	0,0017	0,0034	0,0015

Примечание: цветом выделены максимальные средние исходные концентрации тяжелых металлов.

Таблица 3

Загрязнитель	$\overline{\sigma_{C_0}}$ , %			
	весна	лето	осень	зима
Железо (общ.)	54,6	59,2	73,6	20,9
Марганец	34,7	48,1	38	10,3
Алюминий	85	82,9	55	31,1
Цинк	27,5	17	24	21,7
Свинец	30,2	44,2	41,7	17,6
Кадмий	99,6	25,9	37,1	20

где  $D_{C_0}$  – дисперсия (отклонение) значения  $C_0$  относительно  $\bar{C}_0$ , мг/дм<sup>3</sup>.

Оценка изменчивости исходных концентраций загрязнителей в поверхностных сточных водах с помощью средних за сезон значений коэффициентов вариации  $\overline{\sigma_{C_0}}$  представлена в табл. 3.

Из данных табл. 3 видно, что исходные концентрации алюминия, железа (общего) и кадмия в поверхностных сточных водах характеризуются максимальной изменчивостью, а цинка – минимальной. Вместе с тем минимальная изменчивость исходных концентраций всех определявшихся тяжелых металлов наблюдалась во время зимнего сезона, что, вероятно, связано с ограничением общей подвижности поверхностных сточных вод в это время.

Таблица 4

Загрязнитель	$\bar{C}_0$ , мг/дм <sup>3</sup>	$\bar{\sigma}_{C_0}$ , %	$\bar{C}_0$ , мг/дм <sup>3</sup>	$\bar{\sigma}_{C_0}$ , %
	первый год работы	второй год работы		
Железо (общ.)	7,7	47,5	2,9	51,9
Марганец	0,61	35,1	0,44	31,5
Алюминий	7	49,1	0,96	27,9
Цинк	0,48	23,8	0,54	17,6
Свинец	0,32	30,7	0,22	34,9
Кадмий	0,003	85,9	0,002	37,5

Период испытаний (578 дней) может быть условно разбит на первый и второй год работы фильтра ФОПС®-Ц-0,58-1,8. В табл. 4 представлены полученные в результате расчетов средние за первый и за второй годы работы фильтра ФОПС®-Ц-0,58-1,8 исходные концентрации  $\bar{C}_0$  и значения коэффициентов вариации исходных концентраций  $\bar{\sigma}_{C_0}$  тяжелых металлов, определявшихся при исследовании. Как видно из данных табл. 4, в течение первого и второго годов работы фильтра ФОПС®-Ц-0,58-1,8 изменчивость исходных концентраций каждого из определявшихся тяжелых металлов в поверхностных сточных водах была примерно одинаковой, при этом достаточно высокой, чем подтверждается сделанный ранее вывод о нерегулярности поступления этих загрязнителей на водосборные поверхности данной селитебной территории.

Очищающую способность фильтра ФОПС® наиболее наглядно характеризует эффективность очистки  $\bar{\mathcal{E}}$ , которую определяли по формуле:

$$\bar{\mathcal{E}} = \frac{C_0 - C_i}{C_0} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где  $C_i$  – концентрация загрязнителя после фильтра, мг/дм<sup>3</sup>.

Изменчивость значений эффективности очистки  $\bar{\mathcal{E}}$  может быть оценена с помощью коэффициента вариации  $\bar{\sigma}_{\mathcal{E}}$ , определяемого по формуле:

$$\bar{\sigma}_{\mathcal{E}} = \frac{1}{3} \sqrt{D_{\mathcal{E}}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $\bar{\mathcal{E}}$  – средняя эффективность очистки (математическое ожидание), %;  $D_{\mathcal{E}}$  – дисперсия (отклонение) значения  $\mathcal{E}$  относительно  $\bar{\mathcal{E}}$ , %.

Средние за первый и второй годы работы фильтра ФОПС®-Ц-0,58-1,8 величины эффективности очистки поверхностных сточных вод для каждого из определявшихся тяжелых металлов и значения характеризующих ее изменчивость коэффициентов вариации приведены в табл. 5.

Таблица 5

Загрязнитель	$\bar{\mathcal{E}}$ , %	$\bar{\sigma}_{\mathcal{E}}$ , %	$\bar{\mathcal{E}}$ , %	$\bar{\sigma}_{\mathcal{E}}$ , %
	первый год работы	второй год работы		
Железо (общ.)	96,5	4,1	65,2	24,5
Марганец	98,1	1,3	70	30
Алюминий	99,1	0,5	84,6	7,2
Цинк	97,9	1,1	77,7	15,4
Свинец	92,7	7,6	68,9	21,1
Кадмий	93	2,8	78,8	18,2

Из данных табл. 5 следует, что на протяжении первого года работы фильтр ФОПС®-Ц-0,58-1,8 стабильно обеспечивал высокую эффективность очистки поверхностных сточных вод от всех определявшихся при исследовании тяжелых металлов, которая характеризовалась незначительной изменчивостью, а за второй год работы средняя эффективность очистки существенно снизилась, но оставалась вполне приемлемой для водоочистного оборудования. Изменчивость эффективности очистки за второй год была значительно выше, чем за первый год работы, что свидетельствует о некоторой нестабильности фильтрационно-сорбционного режима внутри фильтра ФОПС®-Ц-0,58-1,8 в течение второго года работы.

Фильтр ФОПС®-Ц-0,58-1,8 на протяжении всего периода испытаний обеспечивал высокое качество очистки поверхностных сточных вод. Как видно из рис. 3, в течение первого года работы обеспечивалась очистка до нормативов, установленных для сброса в водные объекты рыбохозяйственного значения ПДК<sub>рыбхоз</sub>, а в течение второго года работы – до нормативов, установленных для приема в централизованные общеуплавные системы водоотведения ПДК<sub>о.с.</sub>.

Пропускная способность фильтра ФОПС®-Ц-0,58-1,8 на протяжении всего периода испытаний была высокой, чему способствовало удаление мусора из поверхностных сточных вод с помощью фильтра-корзины ФОПС®-К-0,58.

Чистка фильтра ФОПС®-К-0,58 за весь период испытаний (578 дней) производилась один раз, по их завершении. Фильтр ФОПС®-К с мусором, изъятый из канализационного колодца, показан на рис. 4. Обращает на себя внимание факт прорастания непосредственно на субстрате мусора семян трав и деревьев, которые попали в корзину фильтра ФОПС®-К-0,58 осенью 2021 г. Мусор из корзины фильтра ФОПС®-К-0,58 выгружался в мешки и высушивался в лаборатории до постоянного веса при температуре  $22 \pm 1^{\circ}\text{C}$ .

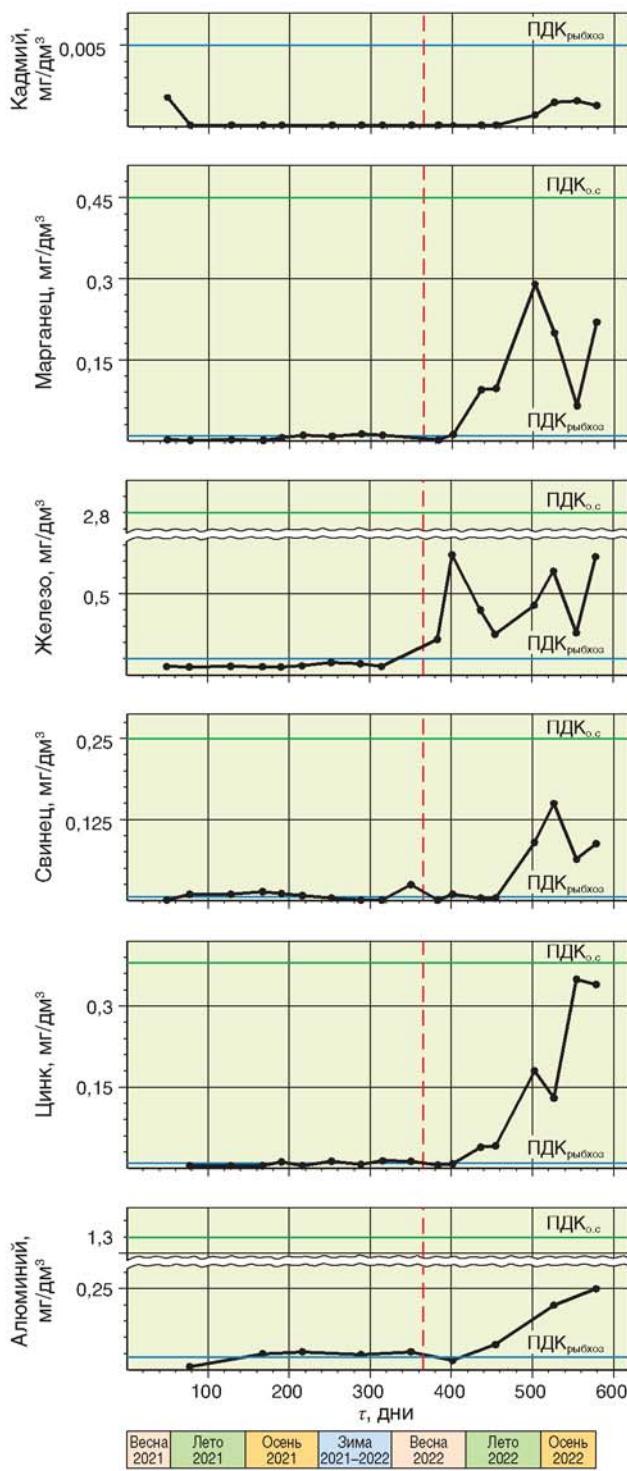


Рис. 3. Изменение концентраций тяжелых металлов после фильтра ФОПС®-Ц в течение периода испытаний

— граница раздела двух лет испытаний

За время проведения испытаний фильтром ФОПС®-К-0,58 было удалено из поверхностных сточных вод 11,94 кг мусора (после сушки), или 6,3 г/м³ (в пересчете на 1 м³ поверхностных сточных вод), что близко к полученным нами ранее в 2016 г. данным, а именно 5,9 г/м³ [1]. Массовая доля  $\omega$  фракций мусора достигает максимума для частиц с размером  $d_r$  от 0,1 до 0,5 мм, о чём сви-



Рис. 4. Фильтр ФОПС®-К-0,58 по окончании испытаний

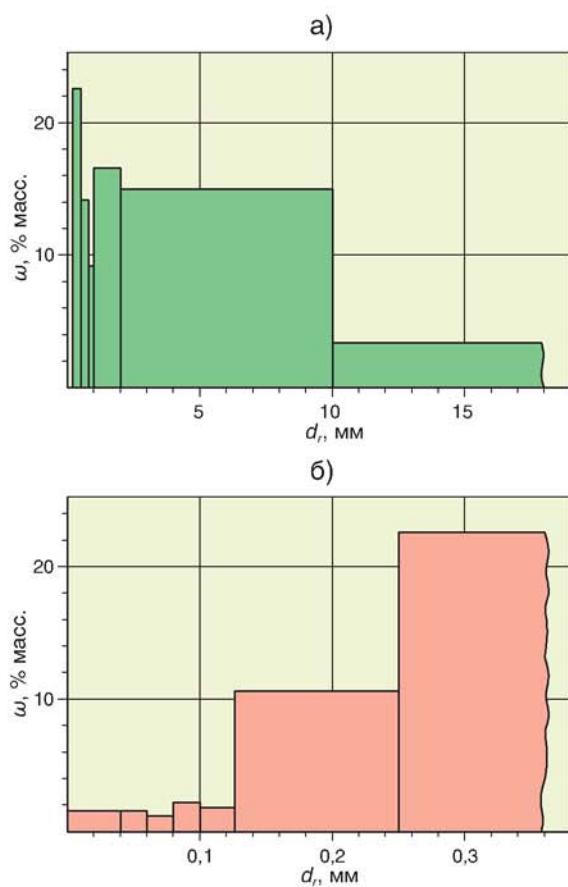


Рис. 5. Распределение массовой доли крупных (а) и мелких (б) фракций собранного фильтром ФОПС®-К мусора

детельствуют результаты ситового анализа, представленные на рис. 5.

Следует отметить, что в случае отсутствия в колодце фильтра ФОПС®-К-0,58 весь собранный в его корзине песок оседал бы на шихте (загрузке) фильтра ФОПС®-Ц-0,58-1,8, что, несомненно, снизило бы как эффективность очистки, так и ресурс работы последнего.

## Выводы

1. Применение фильтра ФОПС®-Ц-0,58-1,8, смонтированного в дождеприемном колодце, позволило круглогодично в течение двух лет очищать поверхностные сточные воды с улично-дорожной сети селитебной территории от тяжелых металлов.
2. За первый год испытаний (весна 2021 г. – весна 2022 г.) фильтр ФОПС®-Ц-0,58-1,8 обеспечил очистку 1140 м<sup>3</sup> сильно загрязненных поверхностных сточных вод от тяжелых металлов, при этом эффективность очистки составляла: по железу общему – от 99,6 до 78,4%; по марганцу – от 99,5 до 95,4%; по алюминию – от 99,8 до 98%; по цинку – от 99,1 до 95,5%; по свинцу – от 99,7 до 76,7%; по кадмию – от 95 до 88,8%.
3. За второй год испытаний (весна 2022 г. – осень 2022 г.) фильтр ФОПС®-Ц-0,58-1,8 обеспечил очистку 768 м<sup>3</sup> сильно загрязненных поверхностных сточных вод от тяжелых металлов, при этом эффективность очистки составляла: по железу общему – от 97,4 до 55,4%; по марганцу – от 99,6 до 26%; по алюминию – от 97,6 до 77,4%; по цинку – от 99,1 до 50%; по свинцу – от 99,7 до 42,4%; по кадмию – от 94,4 до 58,1%.
4. В период испытаний фильтр ФОПС®-Ц-0,58-1,8 обеспечил высокое качество очистки поверхностных сточных вод от тяжелых металлов, содержание которых в очищенной воде на протяжении первого года испытаний не превышало нормативов, установленных для сброса в водные объекты рыбохозяйственного значения, а на протяжении второго года испытаний – нормативов, установленных для приема в централизованные общеславные системы водоотведения.
5. Фильтр ФОПС®-К-0,58, установленный перед фильтром ФОПС®-Ц-0,58-1,8, обеспечил сбор и удаление 12 кг мусора (6,3 г/м<sup>3</sup>) из поверхностных сточных вод.
6. Применение фильтра ФОПС®-К-0,58 позволило сохранить высокие показатели пропускной и очищающей способности фильтра ФОПС®-Ц-0,58-1,8 на протяжении всего периода испытаний.
7. После прохождения зимнего периода с минимальной температурой окружающего воздуха минус 20,3 °С ни повреждения конструкции, ни нарушения работоспособности как фильтра ФОПС®-К-0,58, так и фильтра ФОПС®-Ц-0,58-1,8 выявлено не было.
8. Затраты на утилизацию (размещение) одного фильтра ФОПС®-Ц-0,58-1,8 в качестве отхода IV класса опасности на полигоне ТКО могут составить около 250 руб. (без учета транспортных затрат регионального оператора отходов).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ватин Н. И., Греков М. А., Леонов Л. В., Пробирский М. Д., Рублевская О. Н., Чечевичкин А. В., Якупин Л. А. Опыт всесезонной эксплуатации фильтра ФОПС® при очистке поверхностного стока с техногенно нагруженной селитебной территории // Водоснабжение и санитарная техника. 2018. № 8. С. 40–50.
2. Чечевичкин В. Н., Ватин Н. И. Особенности состава и очистки поверхностного стока крупных городов // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 6 (50). С. 67–74.
3. Леонов Е. А., Михайлова М. С. Проблемы очистки сточных вод с поверхности автомобильных дорог на примере кольцевой автомобильной дороги вокруг Санкт-Петербурга // Жизнь и безопасность. 2002. № 3. С. 280–286.
4. Новикова О. К., Грузинова В. Л. Оптимизация отведения поверхностных сточных вод с учетом их состава с мостов и автомобильных дорог в природные водные объекты // Экологический Вестник Северного Кавказа. 2017. Т. 13. № 4. С. 30–34.
5. Lee D. H., Kim J. H., Mendoza J. A., Lee C. H., Kang J.-H. Characterization and source identification of pollutants in runoff from a mixed land use watershed using ordination analyses. *Environmental Science and Pollutant Research*, 2016, v. 23 (10), pp. 9774–9790. DOI: 10.1007/s11356-016-6155-x.
6. Ватин Н. И., Панкова Г. А., Леонов Л. В., Пробирский М. Д., Рублевская О. Н., Чечевичкин А. В., Якупин Л. А. Тестовая эксплуатация фильтра ФОПС® с природным цеолитом для очистки загрязненного инфильтратом поверхностного стока // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 9. С. 39–49.
7. Opher T., Friedler E. Factors affecting highway runoff quality. *Urban Water Journal*, 2010, v. 7, no. 3, pp. 155–172. DOI: 10.1080/15730621003782339.
8. Huber M., Welker A., Helmreich B. Critical review of heavy metal pollution of traffic area runoff: occurrence, influencing factors, and partitioning. *Science of the Total Environment*, 2016, v. 541, pp. 895–919. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.033.
9. Глухов В. В., Греков М. А., Козинец Г. Л., Тряскин М. А., Чечевичкин В. Н., Чечевичкин А. В., Якупин Л. А. Недостатки применения габионных сетчатых конструкций в гидротехнических сооружениях очистки поверхностного стока с автодорог // Экология урбанизированных территорий. 2022. № 2. С. 40–52.
10. Пшенин В. Н., Бутянов М. С. Характер загрязнения ливневых стоков с автомобильных дорог // Экология производства. 2012. № 11 (100). С. 1–7.
11. Желтобрюхов В. Ф., Лобачева Г. К., Колодницкая Н. В. Технология утилизации загрязнений придорожных урбанизированных территорий с элементами благоустройства городского ландшафта // Экология урбанизированных территорий. 2011. № 4. С. 52–58.

12. Pearson B. J., Chen J., Beeson Jr R. S. Evaluation of storm water surface runoff and road debris as sources of water pollution. *Water, Air and Soil Pollution*, 2018, v. 229 (6), pp. 1–8. DOI: 10.1007/s11270-018-3793-2.
13. Веницианов Е. В., Графова Е. О., Аюкаев Р. И., Чуднова Т. А. Многослойные сорбционные фильтры на защите водоохранных зон автотрасс от загрязнения // Вода: Химия и экология. 2012. № 12 (54). С. 32–41.
14. Корчевская А. М., Чечевичкин В. Н. Характеристики сорбционного модуля гидротехнического сооружения очистки ливневых сточных вод кладбищ // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 2 (4). С. 43–45.
15. Примин О. Г., Варюшина Г. П. Проблемы и пути эффективной очистки поверхностных сточных вод в современных условиях // Вода Magazine. 2017. № 8 (120). С. 24–27.
16. Верещагина Е. М., Витковская Р. Ф. Модернизация технологической схемы очистки стоков АЗС комплексного типа // Вестник молодых ученых Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. 2017. № 4. С. 13–18.
17. Винокуров К. И., Крестьянинова А. Ю. Локальные очистные сооружения поверхностного стока на автомобильных дорогах и мостовых переходах // Экология и строительство. 2019. № 4. С. 42–52. DOI: 10.35688/2413-8452-2019-04-005.
18. Стрелков А. К., Теплыkh С. Ю., Горшаков П. А., Жданов Д. А., Теплыkh Е. А. Применение комбинированных фильтрующих патронов на железнодорожных мостах // Вода Magazine. 2017. № 5 (117). С. 20–22.
19. Чечевичкин А. В. Проектирование и применение локальных очистных сооружений поверхностного стока на основе фильтров ФОПС®. – СПб.: Любавич, 2017. 176 с.

#### REFERENCES

1. Vatin N. I., Grekov M. A., Leonov L. V., Probirskii M. D., Rublevskaia O. N., Chechevichkin A. V., Iakunin L. A. [The experience of year-round operation of FOPS® filter in the purification of surface runoff from technologically disturbed residential area]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2018, no. 8, pp. 40–50. (In Russian).
2. Chechevichkin V. N., Vatin N. I. [Specific features of the composition and treatment of surface runoff in large cities]. *Inzhenerno-Stroitel'nyi Zhurnal*, 2014, no. 6 (50), pp. 67–74. (In Russian).
3. Leonov E. A., Mikhailova M. S. [Problems of highway surface runoff treatment using the example of a ring road around St. Petersburg]. *Zhizn'i Bezopasnost'*, 2002, no. 3, pp. 280–286. (In Russian).
4. Novikova O. K., Gruzinova V. L. [Optimization of the disposal of surface runoff from bridges and highways with account of their composition into the natural water bodies]. *Ekologicheskii Vestnik Severnogo Kavkaza*, 2017, v. 13, no. 4, pp. 30–34. (In Russian).
5. Lee D. H., Kim J. H., Mendoza J. A., Lee C. H., Kang J.-H. Characterization and source identification of pollutants in runoff from a mixed land use watershed using ordination analyses. *Environmental Science and Pollutant Research*, 2016, v. 23 (10), pp. 9774–9790. DOI: 10.1007/s11356-016-6155-x.
6. Vatin N. I., Pankova G. A., Leonov L. V., Probirskii M. D., Rublevskaia O. N., Chechevichkin A. V., Iakunin L. A. [Test operation of FOPS® filter with natural zeolite for infiltrate polluted surface runoff treatment]. *Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika*, 2017, no. 9, pp. 39–49. (In Russian).
7. Opher T., Friedler E. Factors affecting highway runoff quality. *Urban Water Journal*, 2010, v. 7, no. 3, pp. 155–172. DOI: 10.1080/15730621003782339.
8. Huber M., Welker A., Helmreich B. Critical review of heavy metal pollution of traffic area runoff: occurrence, influencing factors, and partitioning. *Science of the Total Environment*, 2016, v. 541, pp. 895–919. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.033.
9. Glukhov V. V., Grekov M. A., Kozinets G. L., Triaskin M. A., Chechevichkin V. N., Chechevichkin A. V., Iakunin L. A. [Disadvantages of using gabion mesh structures in hydraulic structures for highway surface runoff treatment]. *Ekologiya Urbanizirovannykh Territorii*, 2022, no. 2, pp. 40–52. (In Russian).
10. Pshenin V. N., Butianov M. S. [Form of highway storm water pollution]. *Ekologiya Proizvodstva*, 2012, no. 11 (100), pp. 1–7. (In Russian).
11. Zhelobriukhov V. F., Lobacheva G. K., Kolodnitskaia N. V. [Technology of the disposal of pollution from roadside urban areas with elements of urban landscape improvement]. *Ekologiya Urbanizirovannykh Territorii*, 2011, no. 4, pp. 52–58. (In Russian).
12. Pearson B. J., Chen J., Beeson Jr R. S. Evaluation of storm water surface runoff and road debris as sources of water pollution. *Water, Air and Soil Pollution*, 2018, v. 229 (6), pp. 1–8. DOI: 10.1007/s11270-018-3793-2.
13. Venitsianov E. V., Grafova E. O., Aiukaev R. I., Chudnova T. A. [Multilayer sorption filters Multilayersorption filters for safeguarding water protection zones of highways from pollution]. *Voda: Khimiia i Ekologiya*, 2012, no. 12 (54), pp. 32–41. (In Russian).
14. Korchevskaia A. M., Chechevichkin V. N. [Characteristics of a sorption module of a hydroengineering structure for the treatment of storm water from cemeteries]. *Inzhenerno-Stroitel'nyi Zhurnal*, 2009, no. 2 (4), pp. 43–45. (In Russian).
15. Primin O. G., Variushina G. P. [Problems and ways of providing for the effective treatment of surface runoff under current conditions]. *Voda Magazine*, 2017, no. 8 (120), pp. 24–27. (In Russian).
16. Vereshchagina E. M., Vitkovskaya R. F. [Upgrade of the process scheme for wastewater of complex gas stations treatment]. *Vestnik Molodykh Uchenykh Sankt-Peterburgskogo Universiteta Tekhnologii i Dizaina*, 2017, no. 4, pp. 13–18. (In Russian).
17. Vinokurov K. I., Krest'yaninova A. Yu. [Local treatment facilities for surface runoff from highways and bridgeworks]. *Ekologiya i Stroitel'stvo*, 2019, no. 4, pp. 42–52. DOI: 10.35688/2413-8452-2019-04-005. (In Russian).
18. Strelkov A. K., Teplykh S. Yu., Gorshkalev P. A., Zhdanov D. A., Teplykh E. A. [Application of combined filter cartridges on railway bridges]. *Voda Magazine*, 2017, no. 5 (117), pp. 20–22. (In Russian).
19. Chechevichkin A. V. *Proektirovanie i primenie lokal'nykh ochistnykh sooruzhenii poverkhnostnogo stoka na osnove fil'trov FOPS®* [Design and application of local surface runoff treatment facilities based on FOPS® filters. St. Petersburg, Liubavich Publ., 2017, 176 p.].