

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ ФИЛЬТРОВ ФОПС®. ТЯЖЁЛЫЕ МЕТАЛЛЫ

¹М.П. Фёдоров, ¹В.Н. Чечевичкин, ¹М.А. Тряскин,
¹А.В. Чечевичкин, ¹Л.А. Якунин

¹Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института СанктПетербургского политехнического университета Петра Великого

Проведена оценка проблем, связанных с испытанием оборудования для очистки поверхностного стока, загрязнённого тяжёлыми металлами. Рассмотрена специфика нахождения тяжёлых металлов в нём и особенности работы очистного оборудования в реальных условиях. Представлена конструкция разработанного стенда для испытаний фильтрующих патронов (в частности фильтров ФОПС®) в натуральную величину, а также методика моделирования на нём сточных и природных вод, загрязнённых тяжёлыми металлами. Приведены результаты исследований, отражающие конкретные особенности работы фильтров ФОПС®.

Ключевые слова: фильтр ФОПС®, поверхностный сток, испытательный стенд, тяжёлые металлы, очистка сточных вод от ионов тяжёлых металлов

Статья поступила в редакцию 05.09.2022, доработана 21.10.2022, принята к публикации 01.11.2022

Universal Bench for Full-scale Testing of FOPS® Filters. Heavy metals

¹M.P. Fedorov, ¹V.N. Chechevichkin, ¹M.A. Tryaskin, ¹A.V. Chechevichkin, ¹L.A. Yakunin

¹Higher School of Hydrotechnical and Energy Construction, Institute of Civil Engineering, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, 195251 Saint Petersburg, Russia

The problems associated with the testing of equipment for treating surface runoff contaminated with heavy metals are assessed. The specifics of the heavy metals present in it and the features of processing were considered. The article presents the design of the developed full-scale bench for testing filter cartridges (in particular, FOPS® filters), as well as the technique for modeling waste and natural waters contaminated with heavy metals on it. The study results reflecting the operational features of FOPS® filters were presented.

Keywords: FOPS® filters, surface runoff, test bench, heavy metals, wastewater treatment from heavy metal ions

Received 05.09.2022, revised 21.10.2022, accepted for publication 01.11.2022

DOI: 10.18412/1816-0395-2023-1-4-11

Процесс поступления металлов в окружающую среду в результате деятельности людей, названный академиком А.Е. Ферсманом ещё в 1927 г. техногенезом и оказывающий отрицательное воздействие на природу, в настоящее время значительно усилился [1].

Поверхностный сток (ПС), в той или иной форме вбирающий в себя диспергированные на поверхности различные тя-

жёлые металлы (ТМ), придаёт им значительную подвижность, чем усугубляет отрицательное воздействие техногенеза на природу. Сброс ПС в водные объекты без очистки категорически запрещён [2], поскольку загрязнение водоёмов ТМ негативно сказывается на гомеостазе всех биоценозов, в них существующих.

Важнейшая особенность ПС — наличие больших объёмов вод, подлежащих очистке

до крайне низких значений концентраций (нормативов сброса), что подразумевает использование значительных количеств различных очищающих материалов.

Сорбционно-фильтрационные технологии очистки, позволяющие удобно оперировать с большим количеством очищающих грузов и использующие принципы снижения подвижности ионов ТМ на искусственных геохимических

барьерах, являются наиболее приближенными к естественным природным процессам [1].

Для очистки ПС чаще всего применяют дешёвые природные минеральные материалы (природные цеолиты (ПЦ), опоки, трепела, вермикулиты и др.), обладающие барьерными свойствами в отношении ТМ [1]. Экспонирование ТМ на поверхности этих материалов способствует их надёжной фиксации не только в момент удаления из водных сред, но и при дальнейших действиях по их утилизации в составе почвенных субстратов, смесей с отходами полигонов, некоторых строительных материалов и элементов дорожных одежд.

Эксплуатация систем сорбционно-фильтрационной очистки ПС наиболее удобна и рентабельна при использовании материалов, упакованных промышленным способом в водопроницаемые контейнеры — фильтрующие патроны [3 — 5]. Наиболее разработаны как в техническом (широкая линейка стандартных типоразмеров), так и в практическом плане (большой опыт эксплуатации) оригинальные фильтрующие патроны, выпускаемые под маркой ФОПС® [6] и широко распространенные в России. Разнообразные задачи очистки ПС, решаемые с помощью сорбционно-фильтрационных технологий, обусловлены использованием различных материалов в фильтрах ФОПС®, а также режимов их действия.

Для поглощения растворённых форм ТМ из водных растворов традиционно используют ПЦ [7]. Эти материалы доступны (на территории России находится много месторождений ПЦ хорошего качества) и обладают уникальными фильтрационно-ионообменными свойствами. Вместе с тем, реальные условия при очистке ПС, в которых работают фильтрующие загрузки из ПЦ, значительно отличаются от теоретических представлений и лабораторных опытов.

Для проведения ресурсных испытаний фильтров ФОПС® в

натуральную величину, а также моделирования состава сточных вод и гидравлических условий применения этих фильтров на базе лаборатории "Технологии очистки промышленных и поверхностных сточных вод" Инженерно-строительного института ФГАОУ ВО "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" был создан стенд, конструкция и особенности эксплуатации которого при очистке вод от нефтепродуктов были описаны ранее [8].

Внешний вид части стенда, где обеспечивается создание и поддержание заданных концентраций растворимых форм различных ТМ, представлен на рис. 1. Конструкция фильтров ФОПС®, особенности их размещения в стенде и скоростные режимы испытаний описаны в [8].

Гидравлическая схема стенда для испытаний фильтров ФОПС® по очистке водных сред от растворимых форм ТМ представлена на рис. 2.

Испытуемые фильтры 1 устанавливаются в пластиковый колодец 2 на опорное кольцо 3 при помощи подъёмного устройства. Подача модельного ПС, имитирующего исходный (неочищенный) ПС, производится через распределитель потока 4 при открытом кране 5, а очищенная вода (после филь-



Рис. 1. Стенд для создания и поддержания заданных концентраций растворимых форм ТМ
Fig. 1. Bench for producing and maintaining specified concentrations of soluble forms of heavy metals

ра) через сливной штуцер 6 поступает на устройство контроля расхода 7. Отбор проб для проведения анализов вод после фильтра осуществляется при помощи крана 8, а исходной воды (перед очисткой) — крана 9.

Режим работы фильтра ФОПС® определяется подачей модельного ПС, а именно: сверху фильтра (режим I), снизу фильтра при полном заполнении (режим II) и сверху фильтра при малом заполнении (режим III) модельным ПС колодца 2. Последний режим имитирует работу фильтра ФОПС® в ситуации, часто встречающейся на практике, когда очищенный сток отводится по водоотводному лотку, расположенному на дне канализационного колодца (при моделировании режима III сток отводится через штуцер

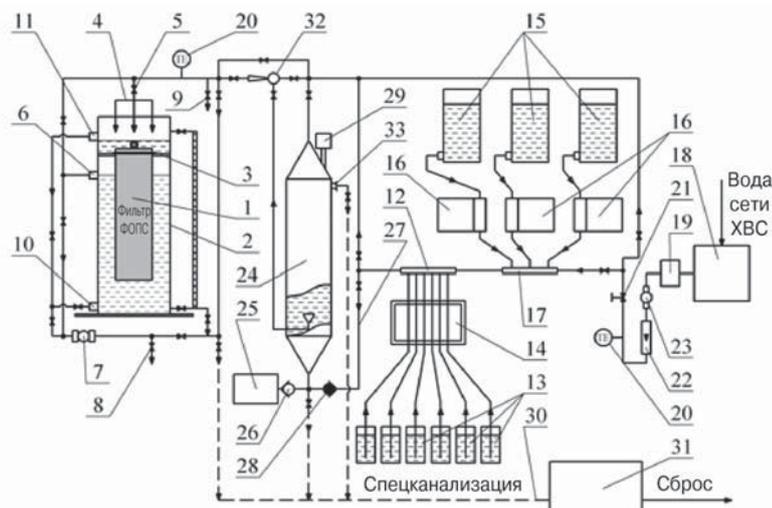


Рис. 2. Гидравлическая схема универсального стенда для испытаний фильтров ФОПС®

Fig. 2. Hydraulic scheme of the universal FOPS® filter test bench

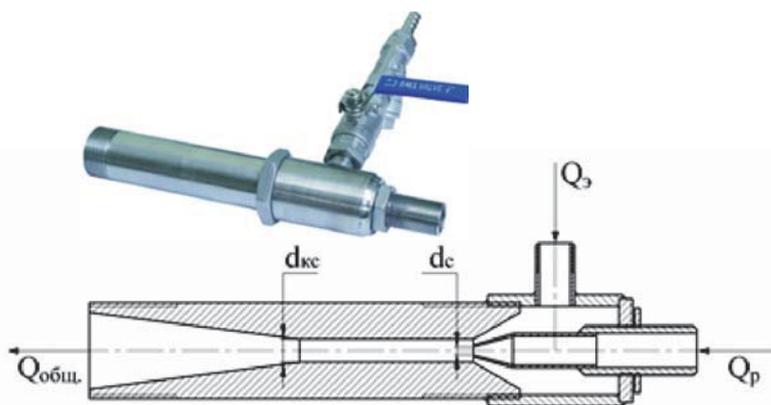


Рис. 3. Внешний вид и схема водо-водяного эжектора центрального типа для $Q_{\text{общ}} = 2,0 \text{ м}^3/\text{ч}$ (габаритные размеры $D \times \text{Ш} \times B - 310 \times 50 \times 98 \text{ мм}$)
Fig. 3. Appearance and layout of the water-to-water ejector of the central type for $Q_{\text{total}} = 2.0 \text{ м}^3/\text{h}$ (overall dimensions $L \times W \times H - 310 \times 50 \times 98 \text{ mm}$)

10). Для обеспечения режима работы II модельный ПС в колодец 2 подаётся через штуцер 6, поступает в нижнюю часть фильтра, проходит через него снизу вверх, выводится из верхней части колодца через штуцер 11 и далее идет на устройство контроля расхода 7.

Важной составляющей модельного ПС является раствор ТМ, который готовят с помощью дозировки через инъекционный узел 12 в поток воды сети холодного водоснабжения (ХВС), прошедшей дополнительную очистку (её характеристики приведены в [8]), концентрированных растворов солей требуемых ТМ из стеклянных ёмкостей 13 при помощи шестиканального перистальти-

ческого насоса 14. Концентрация солей в ёмкостях 13 и скорость подачи насоса 14 выбираются (при заданной скорости подачи модельного ПС на фильтр 1) в соответствии с требуемой рабочей концентрацией (РК) ТМ в модельном ПС.

Другие показатели модельного ПС (рН, перманганатная окисляемость/ХПК, содержание, жёсткость и др.) формируют путём дозирования в поток воды соответствующих растворов из ёмкостей 15 посредством насосов-дозаторов 16 через инъекционный узел 17.

Вода сети ХВС проходит дополнительную очистку на установке 18, после чего её термостатируют, применяя

комплекс оборудования, включающего нагреватель 19, датчики температуры 20 и систему автоматики.

Рабочий расход воды сети ХВС для приготовления раствора ТМ и модельного ПС, подаваемого на фильтр 1, устанавливаются с помощью регулирующего вентиля 21, ротаметра 22 и расходомера 23.

Окончательная подготовка раствора ТМ проводится путём его перемешивания в напорном баке 24 благодаря сжатому воздуху или азоту, поступающим из блока газопобеспечения 25 через обратный клапан 26. Для предотвращения попадания газа в магистраль 27 служит обратный клапан 28. Для пневматического перемешивания раствора в баке 24 предназначены щелевые распределители, а выпуск воздуха из напорного бака 24 осуществляется воздухоотводчиком 29. Напорный бак 24 используется в случае необходимости изменения параметра Eh (окислительно-восстановительный потенциал, мВ) как сатуратор воды кислородом воздуха (увеличение Eh) или как дегазатор (уменьшение Eh).

Вся вода, используемая в процессе работы на стенде, сливается в спецканализацию 30 и после её очистки на установке 31 сбрасывается в канализационную сеть.

Изучение промышленно производимых фильтров ФОПС® в натуральную величину на стенде выполняют со штатной рабочей производительностью $2,0 \text{ м}^3/\text{ч}$. Для дозирования в поток с указанной производительностью были применены различные инъекционные насосы и водо-водяной эжектор, характеристики которых представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что нестабильность подачи перистальтических шланговых насосов выше, чем у плунжерных (мембранных), из-за изменчивости во времени упругих свойств силиконовых трубок, используемых в них. Нестабильность по-

Таблица 1. Характеристики насосов для дозирования растворов солей ТМ
Table 1. Characteristics of pumps for dosing solutions of heavy metal salts

Тип насоса	Способ введения раствора	Нестабильность подачи, % по массе/ч	Стандартное отклонение дозы, %	Диапазон дозирования, $\text{дм}^3/\text{ч}$	Обозначение
Перистальтический одноканальный с электрической регулировкой	Инъекция	$(2,0 \pm 0,5)^1$	$1,0 \pm 0,3$	$(0,1-0,8)^2$	ПСЭ1
Плунжерный микронасос с механической регулировкой		$< 1,0$	$0,6 \pm 0,2$	$0,01-0,10$	ПМ
Мембранный с электрической регулировкой		$< 1,0$	$0,3 \pm 0,1$	$0,01-1,00$ $0,3-20,0$	МЭ
Перистальтический шестиканальный с механической регулировкой	Эжекция	$(1,2 \pm 0,4)^1$	$(0,8 \pm 0,3)^2$ $(3,5 \pm 1,2)^3$	$(0,01-2,00)^4$	ПСМ6
Водо-водяной эжектор		$(2-5)^5$	–	$20-1000$	Э

¹Дрейф отрицательный. ²Для одного канала. ³Для параллельных каналов.
⁴На одном канале для трубок диаметром (1,0–4,0) мм и 8-ми диапазонах изменения скорости вращения ротора. ⁵При колебаниях уровня всасывания рабочего раствора для эжектирования – не более $\pm 5 \text{ мм}$.

дачи эжектора в значительной степени зависит от колебания уровня всасывания раствора.

В конструкции стенда (см. рис. 2) использовался эжектор 32 из нержавеющей стали (рис. 3) с относительной подачей $q = 0,02$, который при общем расходе $Q_{\text{общ}} = 2000 \pm 20 \text{ дм}^3/\text{ч}$ обеспечивал эжектируемый расход $Q_3 = 40 \pm 0,5 \text{ дм}^3/\text{ч}$. Расчётные диаметры сопла d_c и смесительной камеры $d_{кс}$ (при постоянных значениях длины камеры смещения (90 мм) и угла конусности диффузора $\alpha = (15 \pm 0,5)^\circ$ представлены в табл. 2 для различных значений относительных расходов (от 0,01 до 0,45), что позволяет выбрать конструкцию эжектора в зависимости от необходимого объёма дозирования раствора ТМ.

На рис. 4 показано изменение во времени заданных РК различных ТМ (Fe, Mn, Al, Zn, Pb и Cd), дозируемых в поток с рабочим расходом $2,0 \pm 0,1 \text{ м}^3/\text{ч}$ при помощи шестиканального перистальтического насоса-дозатора (каждый ТМ дозировался по отдельному каналу в поток через инжекционный узел 12). На представленных на рис. 4 зависимостях заметен дрейф в сторону снижения РК ТМ в модельном ПС с течением времени. Кроме того, из рис. 4 следует, что флуктуации значений текущих концентраций Fe, Al и Mn значительно ниже, чем относительная погрешность их определения методом атомно-адсорбционной спектроскопии [10], а в случае с Zn, Pb и Cd — приближаются к ней.

На рис. 5 представлены аналогичные зависимости, что и на рис. 4, но при дозировании раствора ТМ (из бака 24) при помощи водо-водяного эжектора 32 (см. рис. 2).

Раствор ТМ, полученный в напорном баке 24 вышеизложенным способом, дозируют эжектором 32 в режиме опорожнения (при выключенной системе дозирования в поток) или в режиме постоянного уровня этого раствора в баке 24 (при этом система дозирования

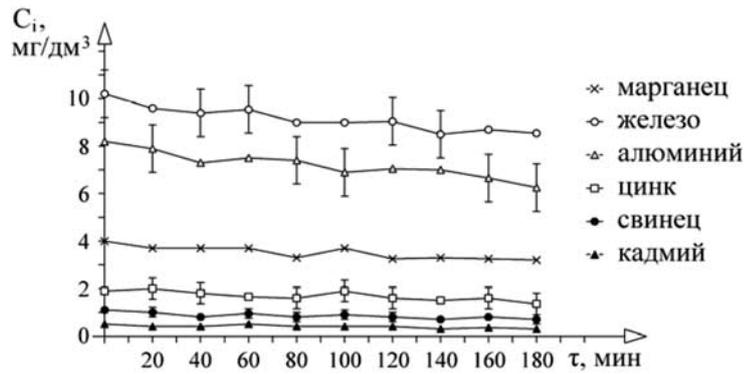


Рис. 4. Зависимости РК различных ТМ в модельном растворе от времени при дозировании шестиканальным перистальтическим насосом

Fig. 4. Dependences of the operating concentrations of various heavy metals in a model solution on time when dosing with a six-channel peristaltic pump

в поток работает непрерывно, а избыток раствора сливается из бака 24 через штуцер 33 в спецканализацию).

Из рис. 5, а видно, что в режиме опорожнения концентрации дозируемых ТМ во времени существенно снижаются за счёт уменьшения всасывания эжектора при снижении уровня раствора в баке 24. В режиме постоянного уровня такого

снижения нет, а флуктуации текущих значений РК различных ТМ после эжектора не превышают относительной погрешности их определения (см. рис. 5, б).

Поскольку для создания заданных РК растворимых форм (ионов) ТМ в рабочем потоке ($2 \text{ м}^3/\text{ч}$) необходимо знать, сколько и какой концентрации растворов солей тех или иных

Таблица 2. Расчётные параметры водо-водяного эжектора
Table 2. Design parameters of water-to-water ejector

Параметры	Относительная подача q								
	0,01	0,02	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,33	0,45
Рабочий расход Q_p , $\text{м}^3/\text{ч}$	1,98	1,96	1,90	1,80	1,70	1,67	1,60	1,50	1,40
Эжектируемый расход Q_3 , $\text{м}^3/\text{ч}$	0,02	0,04	0,10	0,20	0,30	0,33	0,40	0,50	0,06
Диаметр камеры смещения $d_{кс}$, мм	5,8	5,9	6,1	6,7	7,1	7,5	7,9	8,4	9,5
Диаметр сопла d_c , мм	5,2	5,2	5,2	5,2	5,1	5,1	5,1	5,1	5,1

Примечание. Даны параметры водо-водяного эжектора, представленного на рис. 3.

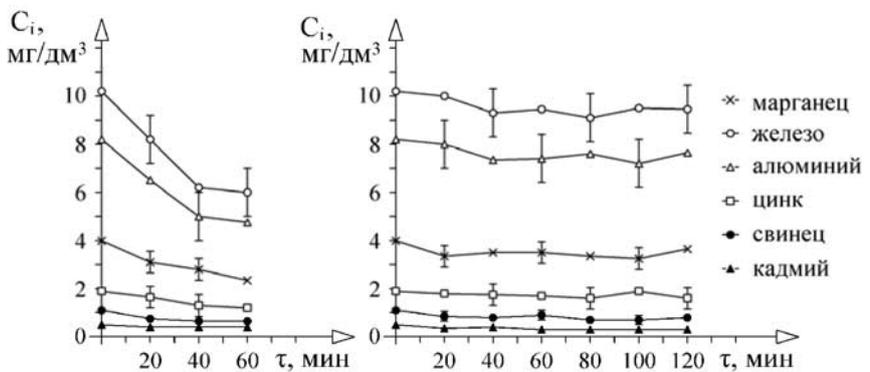


Рис. 5. Зависимости РК различных ТМ в модельном растворе от времени при дозировании смеси эжектором:

а – режим опорожнения; б – режим постоянного уровня

Fig. 5. Dependences of the operating concentrations of various heavy metals in a model solution on time when dosing the mixture with the ejector:

a – emptying mode; b – constant level mode

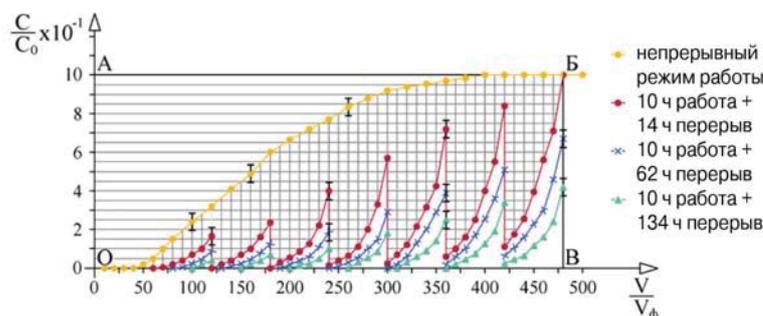


Рис. 6. Динамические (выходные) кривые изменения концентрации иона Mn^{2+} после фильтра ФОПС[®]-Z-0,58-1,8 (модельный раствор с $C_{Mn^{2+}}^0 = 100 \text{ мг/дм}^3$)

Fig. 6. Dynamic (output) curves of changes in the concentration of the Mn^{2+} ion after the FOPS[®]-Z-0.58-1.8 filter (model solution with $C_{Mn^{2+}}^0 = 100 \text{ mg/dm}^3$)

ТМ нужно продозировать в единицу времени, то такие расчёты необходимы в привязке к выбору возможных насосодозаторов.

В табл. 3 исходя из положений [9, 10] и собственного опыта представлены рекомендации по созданию модельного ПС с использованием солей различных ТМ, учитывая их растворимость и удобство работы с ними, и насосного оборудования, которые в комплексе наиболее пригодны для воспроизводимого получения заданных, стабильных РК этих ТМ в потоке.

На основании данных табл. 3 можно выбрать тип дозатора исходя из массовой концентра-

ции раствора соли конкретного ТМ и подходящего объёма его дозирования.

Важнейшей характеристикой сорбционных материалов, а также изделий на их основе (фильтрующих патронов), требующей первоочерёдной оценки, служит величина их динамической обменной ёмкости (ДОЕ, мг/г) до заданного проскока (например, заданной концентрации на сброс очищенного ПС), определяемой как:

$$ДОЕ = C_n V / m,$$

где C_n — заданная проскоковая концентрация загрязнителя, мг/дм³; V — объём загрязнённого ПС, прошедшего через фильтр до заданного момента,

дм³; m — масса сорбционного материала в фильтре, г.

Динамические сорбционные исследования на применявшемся стенде проводились с использованием растворов иона Mn^{2+} , как типичного представителя загрязнений ПС, мало изученного в практическом плане.

На рис. 6 приведены зависимости относительной концентрации иона Mn^{2+} (C/C_0) от относительного объёма фильтра (V/V_ϕ , где V_ϕ — объём загрузки фильтра), прошедшего через фильтр с КП-породой до появления за слоем исходной концентрации СП = 100 мг/дм³ для двух режимов — непрерывного (24 ч каждый день) и прерывистого в нескольких вариантах (10 ч работы + 14 ч перерыва; 10 + 62 ч и 10 + 134 ч), моделирующих 10-часовой дождь каждый день и дождь на 2-е и 5-е сутки соответственно. Подача модельного ПС, содержащего ион марганца, производилась снизу вверх (режим II), в результате чего фильтр находился в полностью смоченном модельным ПС состоянии.

На рис. 6 площадь прямоугольника ОАВВ соответствует количеству загрязнителя (иона Mn^{2+}), введённого в рабочий

Таблица 3. Рекомендации по созданию РК различных ТМ в модельном ПС

Table 3. Recommendations for creating operating concentrations of various heavy metals in model surface runoff

Модельный ион	РК, мг/дм ³	ПДК, мг/дм ³	Исходная соль	Концентрация исходной соли, % по массе							
				20		10		5		1	
				U доз, мл/ч	Насос*	U доз, мл/ч	Насос*	U доз, мл/ч	Насос*	U доз, мл/ч	Насос*
Al ³⁺	8,0	0,04	KAl(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O	–	–	2 900	МЭ	5 800	–	29 000	Э
			Al ₂ (SO ₄) ₃ ·18H ₂ O	1 250	–	2 500	–	5 000	–	25 000	–
Fe ³⁺	10,0	0,05	Fe(NO ₃) ₃ ·9H ₂ O	720	МЭ,	1 440	–	2 880	МЭ	14 400	–
			KFe(SO ₄) ₂ ·12H ₂ O	910	ПСМ 6	1 820	–	3 640	–	18 200	МЭ
Fe ²⁺	10,0	0,05	FeSO ₄ ·7H ₂ O	500	–	1 000	–	2 000	–	10 000	–
Cu ²⁺	1,0	0,005	CuSO ₄ ·5H ₂ O	39	–	78	МЭ,	156	–	780	–
Cd ²⁺	0,5	0,005	Cd(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	22	ПМ,	44	ПСМ6	88	–	440	–
			CdCl ₂ ·2,5H ₂ O	20	ПСМ6	40	–	80	ПМ,	400	ПСМ6
Pb ²⁺	1,0	0,005	Pb(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	16	–	32	–	64	–	320	–
			PbCl ₂ ·2,5H ₂ O	–	–	–	–	55	–	275	–
Ni ²⁺	2,0	0,01	NiSO ₄ ·7H ₂ O	100	–	200	–	400	–	2 000	МЭ
			NiCl ₂ ·6H ₂ O	80	–	160	ПСЭ1, МЭ	320	–	1 600	–
Zn ²⁺	2,0	0,01	Zn(NO ₃) ₂ ·3H ₂ O	75	ПМ,	150	–	300	ПСЭ1, МЭ	1 500	МЭ,
			ZnCl ₂	43	ПСМ6	83	ПМ, ПСМ6	166	–	830	ПСМ6
Mn ²⁺	4,0	0,01	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	120	–	240	–	480	–	2 400	–
			MnSO ₄ ·5H ₂ O	90	–	180	ПСЭ1, МЭ	360	–	1 800	МЭ

*Обозначения насосов см. табл. 1.

раствор и прошедшего через фильтр. Площадь над верхней динамической кривой (заштрихованная горизонтально) соответствует количеству иона Mn^{2+} , поглощенному сорбционным материалом фильтра (КП-породой) до насыщения в течение цикла непрерывной работы ($ДОЕ_{нас} = 20,2$ г/кг). Для прерывистого режима 1 (один десятичасовой дождь в сутки) это количество соответствует сумме из предыдущей площади и площади сложной фигуры, заштрихованной в клетку на рис. 6, и составило 35,2 г/кг. Площади обеих фигур определялись с помощью редактора растровых изображений "Adobe Photoshop" [11]. Для двух других прерывистых режимов (по 10 ч непрерывной работы через 2 и 5 дней соответственно) зафиксированы следующие значения $ДОЕ_{нас}$ — 42,4 и 52,5 г/кг.

Таким образом, выявлено увеличение динамической ёмкости до насыщения $C_{п} = C_0$ (при $C_{0Mn^{2+}} = 100$ мг/дм³) для прерывистых режимов от 174 до 260 %. Этот результат можно объяснить тем, что за время перерыва в работе происходит более равномерное перераспределение адсорбата (иона Mn^{2+}) в шихте сорбционного материала (КП-породы), которое приводит к увеличению поглощающей способности последнего. Указанное перераспределение происходит за счёт диффузии иона Mn^{2+} с внешней поверхности зёрен КП-породы (на которой они первоначально поглощаются в динамическом сорбционном процессе) в их глубину, а также по сечению фильтра от центра к стенкам (т.е. от ядра потока с максимальной концентрацией к пристеночной области с минимальной концентрацией). Подобное явление наблюдалось, например, при динамическом сорбционном поглощении иона NH_4^+ на колонке с КП-породой [12].

Следует отметить, что возможности стенда не исчерпываются моделированием реаль-

ных сорбционно-динамических условий работы фильтрующих патронов. Для практики не менее важно решение гидростатических задач, например оценки проницаемости слоя зернистых материалов для воды в фильтрующих патронах.

Традиционные для сорбционно-динамических процессов зернистые материалы (активированные угли, ПЦ, карбонатные и силикатные породы и др.) применяют для динамических сорбционных колонн (с высотой слоя шихты более 1,5 м) с зернением 1–3 и 3–5 мм, а для сорбционно-фильтрующих аппаратов (типа скорых фильтров с высотой слоя не более 1,2 м) — зернением 0,1–0,5 и 0,5–1,0 мм. Определение коэффициентов фильтрации (K_f), характеризующих пропускную способность фильтрующих патронов по воде как изделий в целом, крайне важно с точки зрения стандартизации их применения при очистке ПС, особенно в случае новых материалов или загрузок комбинированного состава.

Определение K_f проводилось в испытательном колодце 2 стенда (см. рис. 2), куда помещался фильтрующий патрон с испытуемым зернистым материалом (рис. 7), через который со строго заданным расходом пропускали модельный ПС и измеряли высоту его слоя над слоем зернистого материала в фильтре (Δh на рис. 7).

Величина K_f , см/с, рассчитывалась в соответствии с законом Дарси [13] по формуле:

$$K_f = 0,01 Q_p H_f / \Delta h S_f,$$

где Q_p — рабочий расход воды через слой, м³/с; H_f — высота слоя зернистого материала, м; S_f — площадь сечения фильтра, м²; Δh — высота слоя воды над слоем зернистого материала в фильтре, м.

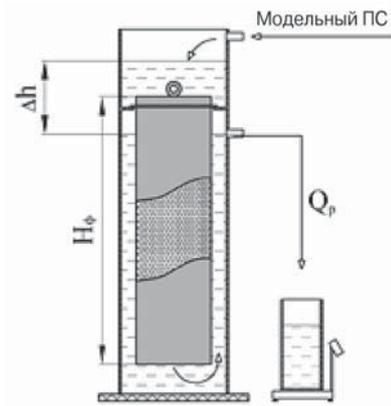


Рис. 7. Схема экспериментов по определению K_f фильтрующих патронов с зернистыми нагрузками в колодце испытательного стенда

Fig. 7. Experimental designs for determining the hydraulic permeability of cartridges with granular loadings in the well of the test bench

В табл. 4 даны рассчитанные по результатам испытаний значения коэффициентов фильтрации (K_f , см/с) зернистых материалов различного гранулометрического состава на основе ПЦ — КП-породы (Бадинское месторождение) в исходном и MnO_2 -модифицированном виде. MnO_2 -модификация КП-пород приводит к сглаживанию микрорельефа поверхности их частиц [14], что сказывается на режиме омывания их водным потоком в фильтре. Кроме возможностей по моделированию, MnO_2 -КП-породы представляют собой новый сорбционно-каталитический материал, очень перспективный для очистки различных водных сред.

Из табл. 4 видно, что для одних и тех же диапазонов дисперсного состава слои из MnO_2 -модифицированной КП-породы имеют значения K_f выше, чем слои из исходной КП-породы, что может быть объяснено более гладкой (за счёт нанесения MnO_2 -фазы) наружной поверхностью частиц MnO_2 -КП-породы.

Таблица 4. Значение K_f для некоторых зернистых материалов различного дисперсного состава, мм

Table 4. The value of the hydraulic permeability for some bulk materials of various disperse composition, mm

Вид зернистого материала	K_f , см/с		
	3–5	1–3	0,5–1,0
КП-порода	$2,20 \pm 0,10$	$0,51 \pm 0,05$	$0,08 \pm 0,01$
MnO_2 -КП-порода	$2,80 \pm 0,20$	$1,10 \pm 0,07$	$0,21 \pm 0,03$

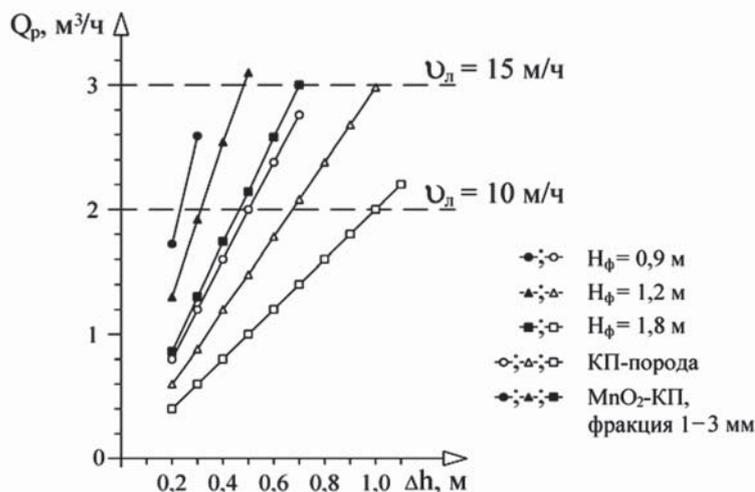


Рис. 8. Зависимости рабочей производительности (Q) фильтров ФОПС®-0,58 с различной высотой загрузки от высоты слоя воды в колодце над ними (Δh)

Fig. 8. Dependences of performance characteristics (Q) of FOPS®-0.58 filters with different loading heights on the height of the water layer in the well above them (Δh)

В ходе проведённых экспериментов было также оценено взаимное влияние зернения загрузки и их высоты, а также высоты слоя воды над загрузкой на рабочий расход воды через фильтрующие патроны с точки зрения обеспечения оптимальных условий для реализации сорбционных процессов.

Фильтрующие патроны в канализационных сетях, очищающие реальный ПС, работают в условиях переменного притока ПС во времени [15] как при дождях различной интенсивности, так и в течение одного дождя. В таких условиях уровень неочищенного ПС над фильтрующим патроном может колебаться

значительно, при этом для создания оптимального режима работы сорбционной шихты фильтрующего патрона необходим контроль соблюдения значения линейной скорости прохождения ПС через фильтр не более чем 10 м/ч (что на практике часто не выполняется).

На рис. 8 представлены зависимости рабочей производительности фильтрующих патронов с шихтой из различных зернистых материалов (на основе КП-породы) от высоты слоя воды над слоем зернистых материалов (Δh, м, в соответствии со схемой на рис. 7).

В табл. 5 приведены экспериментально выявленные об-

ласти режима скоростей сорбционных процессов для двух типов зернистых материалов в зависимости от высоты их слоя и зернения и высоты слоя воды над ними. Опираясь на полученные данные, становится возможным на практике проводить подбор оптимальной фракции зернистых материалов и высоты их слоя, при которых обеспечивается необходимый режим скорости жидкой фазы. Например, можно рекомендовать использование зернистого материала фракцией 0,5–1,0 мм вместо материала фракцией 1,0–3,0 мм, уменьшив при этом высоту слоя шихты до 1,2 м или 0,9 м (вместо 1,8 м), что будет способствовать экономии фильтрующих зернистых материалов.

Таким образом, разработанный универсальный стенд для испытаний фильтрующих патронов очистки ПС позволяет комплексно испытывать такие изделия в натуральную величину (например, фильтры ФОПС®, выпускаемые ООО "Аква-Венчур®").

Дозирующая система стенда, в состав которой могут входить насосы различных марок, даст возможность выбирать необходимые расходные характеристики и получать требуемые постоянные концентрации загрязняющих веществ (ГМ) в потоке с удовлетворительной стабильностью.

Универсальный стенд позволяет моделировать реальный режим работы фильтров ФОПС® в канализационных колодцах и оценивать особенности происходящих при этом массообменных и гидравлических процессов.

В условиях реального применения в прерывистом режиме поступления ПС на фильтры их динамическая ёмкость возрастает на 174–260 % по массе по сравнению с непрерывным режимом.

Для небольших высот фильтров ФОПС® рекомендована работа с более мелкими фракциями зернистых материалов (0,5–1,0 мм) вместо часто практикуемых с зернением 1,0–3,0 мм.

Таблица 5. Области оптимального режима скоростей сорбционных процессов в фильтрах ФОПС® для различных зернистых материалов
Table 5. Areas of optimal speed mode of sorption processes in FOPS® filters for various granular materials

Высота фильтра H _φ , м	Высота слоя воды над фильтром Δh, м								
	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
КП-порода (фракция 1–3 мм, K _φ = (0,51 ± 0,05) см/с)									
0,9	+	+	+	+	-	-	-	-	-
1,2	+	+	+	+	+	+	-	-	-
1,8	+	+	+	+	+	+	+	+	+
MnO ₂ -КП-порода (фракция 1–3 мм, K _φ = (1,10 ± 0,07) см/с)									
0,9	+	-	-	-	-	-	-	-	-
1,2	+	+	-	-	-	-	-	-	-
1,8	+	+	+	+	-	-	-	-	-
MnO ₂ -КП-порода (фракция 0,5–1,0 мм, K _φ = (0,21 ± 0,03) см/с)									
0,9	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Примечание. Знаком «+» отмечены области обеспечения оптимальной линейной скорости движения воды через фильтр ФОПС® не более 10 м/ч, а знаком «-» – области обеспечения скорости более 10 м/ч.

Литература

1. **Алексеев В.А.** Геоэкология: экологическая геохимия: учебник. Изд. 2-е, перераб. Ростов н/Д, Феникс, 2017. 685 с.
2. **Федеральный закон РФ** от 03 июня 2006 г. №74-ФЗ "Водный кодекс Российской Федерации (с изменениями на 31 октября 2016 года)". М., "Собрание законодательства Российской Федерации" № 23 от 05.06.2006, ст. 2381, ГУ изд-во "Юридическая литература" Администрации Президента РФ.
3. **Верещагина Е.М., Витковская Р.Ф.** Модернизация технологической схемы очистки стоков АЗС комплексного типа. Вестник молодых учёных СПГУТД. 2017. № 4. С. 13–18.
4. **Винокуров К.И., Крестьянинова А.Ю.** Локальные очистные сооружения поверхностного стока на автомобильных дорогах и мостовых переходах. Экология и строительство. 2019. № 4. С. 44–52. DOI: 10.35688/2413-8452-2019-04-005.
5. **Фролова И.Е., Сашин Н.К., Хлупин В.С.** Очистка поверхностного стока с портовых гидротехнических сооружений. Экология и строительство. 2021. № 4. С. 25–36.
6. **Чечевичкин А.В.** Проектирование и применение локальных очистных сооружений поверхностного стока на основе фильтров ФОПС®. СПб., Любавич, 2017. 176 с.
7. **Убугунов Л.Л., Меркушева М.Г., Кожевникова Н.М.** Агрохимическое минеральное сырьё: природные цеолиты. Улан-Удэ, Изд-во БНЦСО РАН, 2012. 444 с.
8. **Фёдоров М.П., Масликов В.И., Чечевичкин А.В., Якунин Л.А.** Универсальный стенд для натурных испытаний фильтров ФОПС®. Нефтепродукты. Экология и промышленность России. 2020. Т. 24. № 4. С. 4–9.
9. **ГОСТ 31952-2012** Устройства водоочистные. Общие требования к эффективности и методы её определения. М., Стандартинформ, 2013. 27 с.
10. **ГОСТ 31870-2012** Вода питьевая. Определение содержания элементов методами атомной спектроскопии. М., Стандартинформ, 2013. 19 с.
11. **Муслов С.А., Зайцева Н.В., Самосадная И.Л., Гавриленкова И.В.** Три способа измерения площади плоских фигур произвольной формы программными методами. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 5. С. 89–93.
12. **Ватин Н.И., Чечевичкин А.В., Чечевичкин В.Н.** Сорбционная очистка промышленных высококонцентрированных вод природными цеолитами от ионов аммония. СПб., Изд-во СПбОДЗПП, 2007. 35 с.
13. **Гиргидов А.Д.** Механика жидкости и газа (гидравлика). СПб., Изд-во Политехнического ун-та, 2007. 545 с.
14. **Кораблев В.В., Чечевичкин А.В., Боричева И.К., Самонин В.В.** Структура и морфологические свойства клиноптилолита, модифицированного диоксидом марганца. Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2017. Т. 10. № 1. С. 100–111. DOI: 10.18721/JPM.10110.
15. **Алексеев М.И., Курганов А.М.** Организация отведения поверхностного (дождевого и талого) стока с урбанизированных территорий М., Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2000. 352 с.

References

1. **Alekseenko V.A.** Geoeкологиya: ekologicheskaya geokhimiya: uchebnik. Izd. 2-e, pererab. Rostov n/D, Feniks, 2017. 685 s.
2. **Federal'nyi zakon RF** ot 03 iyunya 2006 g. №74-FZ "Vodnyi kodeks Rossiiskoi Federatsii (s izmeneniyami na 31 oktyabrya 2016 goda)". M., "Sobranie zakonodatel'stva Rossiiskoi Federatsii" № 23 ot 05.06.2006, st. 2381, GU izd-vo "Yuridicheskaya literatura" Administratsiya Prezidenta RF.
3. **Vereshchagina E.M., Vitkovskaya R.F.** Modernizatsiya tekhnologicheskoi skhemy ochistki stokov AZS kompleksnogo tipa. Vestnik molodykh uchenykh SPGUTD. 2017. № 4. S. 13–18.
4. **Vinokurov K.I., Krest'yaninova A.Yu.** Lokal'nye ochistnye sooruzheniya poverkhnostnogo stoka na avtomobil'nykh dorogakh i mostovykh perekhodakh. Ekologiya i stroitel'stvo. 2019. № 4. S. 44–52. DOI: 10.35688/2413-8452-2019-04-005.
5. **Frolova I.E., Sashin N.K., Khlupin V.S.** Ochistka poverkhnostnogo stoka s portovykh gidrotekhnicheskikh sooruzhenii. Ekologiya i stroitel'stvo. 2021. № 4. S. 25–36.
6. **Chechevichkin A.V.** Proektirovanie i primenenie lokal'nykh ochistnykh sooruzhenii poverkhnostnogo stoka na osnove fil'trov FOPS®. SPb., Lyubavich, 2017. 176 s.
7. **Ubugunov L.L., Merkusheva M.G., Kozhevnikova N.M.** Agrokhimicheskoe mineral'noe syr'e: prirodnye tselolity. Ulan-Ude, Izd-vo BNTsSO RAN, 2012. 444 s.
8. **Fedorov M.P., Maslikov V.I., Chechevichkin A.V., Yakunin L.A.** Universal'nyi stend dlya naturnykh ispytaniy fil'trov FOPS®. Nefteprodukty. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2020. T. 24. № 4. S. 4–9.
9. **GOST 31952-2012** Ustroistva vodoochistnye. Obshchie trebovaniya k effektivnosti i metody ee opredeleniya. M., Standartinform, 2013. 27 s.
10. **GOST 31870-2012** Voda pit'evaya. Opredelenie soderzhaniya elementov metodami atomnoi spektroskopii. M., Standartinform, 2013. 19 s.
11. **Muslov S.A., Zaitseva N.V., Samosadnaya I.L., Gavrilenkova I.V.** Tri sposoba izmereniya ploshchadi ploskikh figur proizvol'noi formy programmnyimi metodami. Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy. 2017. № 5. S. 89–93.
12. **Vatin N.I., Chechevichkin A.V., Chechevichkin V.N.** Sorbtsionnaya ochistka promyshlennykh vysokokontsentririrovannykh vod prirodnyimi tselolitami ot ionov ammoniya. SPb., Izd-vo SPbODZPP, 2007. 35 s.
13. **Girgidov A.D.** Mekhanika zhidkosti i gaza (gidravlika). SPb., Izd-vo Politekhnicheskogo un-ta, 2007. 545 s.
14. **Korablev V.V., Chechevichkin A.V., Boricheva I.K., Samonin V.V.** Struktura i morfologicheskie svoystva klinoptilolita, modifitsirovannogo dioksidom margantsa. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki. 2017. T. 10. № 1. S. 100–111. DOI: 10.18721/JPM.10110.
15. **Alekseev M.I., Kurganov A.M.** Organizatsiya otvedeniya poverkhnostnogo (dozhdevogo i talogo) stoka s urbanizirovannykh territorii M., Izd-vo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2000. 352 s.

М.П. Фёдоров – академик РАН, д-р техн. наук, президент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, e-mail: m.fedorov@spbstu.ru • В.Н. Чечевичкин – канд. хим. наук, зав. научно-исследовательской лабораторией, Высшая школа гидротехнического и энергетического строительства Инженерно-строительного института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (ВШГИЭС ИСИ СПбПУ), e-mail: chechevichkin_vn@spbstu.ru • М.А. Тряскин – инженер, ВШГИЭС ИСИ СПбПУ, e-mail: tryaskin_ma@spbstu.ru • А.В. Чечевичкин – инженер, ВШГИЭС ИСИ СПбПУ, e-mail: chechevichkin_av@spbstu.ru • Л.А. Якунин – инженер, ВШГИЭС ИСИ СПбПУ, e-mail: yakunin_la@spbstu.ru

M.P. Fedorov – Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Engineering Science, President, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, e-mail: m.fedorov@spbstu.ru • V.N. Chechevichkin – Cand. Sci. (Chem.), Head of the Research Laboratory, Higher School of Hydrotechnical and Energy Construction, Institute of Civil Engineering, Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (HSHEC ECS SPbU), e-mail: chechevichkin_vn@spbstu.ru • M.A. Tryaskin – Engineer, HSHEC ECS SPbU, e-mail: tryaskin_ma@spbstu.ru • A.V. Checherevichkin – Engineer, HSHEC ECS SPbU, e-mail: chechevichkin_av@spbstu.ru • L.A. Yakunin – Engineer, HSHEC ECS SPbU, e-mail: yakunin_la@spbstu.ru