

2. *Main aspects of the theory and technology of producing permeable materials with the organized porous structure through deformation processing / Y. Piatshushyk [et al.] // 15th International Plansee Seminar, Reutte, Austria. – Reutte, 2001. – Vol. 3. – P. 285–299.*

3. *Дробыш, А. А. Получение пористых проницаемых материалов и изделий из минеральных композиций способом радиального прессования для фильтрации жидкостей и газов : дис. ...канд. техн. наук : 05.16.05 / А. А. Дробыш. – Минск, 2007. – 154 с.*

4. *Crystallization mechanism of basalt glass fibers in air / M. S. Manylov [et al.] // Mendeleev Communications. – 2013. – Vol. 23, № 6. – P. 361–363.*

5. *Влияние размера частиц порошка на структурные характеристики пористых проницаемых макротел на основе природного кварца / О. П. Реут [и др.] // Порошковая металлургия : респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск, 2006. – Вып. 29. – С. 337–341.*

6. *Влияние режимов формирования на характеристики пористых материалов из базальтовых волокон / Е. Е. Петюшик [и др.] // Порошковая металлургия : респ. межвед. сб. науч. тр. – Минск, 2022. – Вып. 45. – С. 143–146.*

7. *Закономерности структурообразования спеченных композиционных материалов на основе базальтового волокна / Е. Е. Петюшик [и др.] // Новые материалы и технологии: Порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 50-летию основания Гос. науч. учреждения «Ин-т порошковой металлургии им. акад. О. В. Романа», Минск, 14–16 сент. 2022. – Минск, 2022. – С. 411–415.*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ТЕХНИЧЕСКОЙ ВОДЫ ПОРИСТЫМ МАТЕРИАЛОМ НА ОСНОВЕ БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА

**Е. Е. Петюшик¹, И. В. Фомихина¹, А. А. Дробыш²,
Т. Е. Евтухова², О. В. Степанова², И. В. Саксонов²**

¹*Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа,
г. Минск, Беларусь*

²*Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь*

Введение. Традиционно применяемые сегодня устройства очистки воды работают в режиме фильтрации, когда частицы загрязнений удерживаются на зернах фильтрующего материала

в объеме пористого слоя. В ряде случаев процессы объемной фильтрации не способны обеспечивать требуемый эффект очистки, особенно при использовании водозаборов из поверхностных источников.

Известным техническим решением, позволяющим повысить качество очистки и кардинально уменьшить габариты устройств с одновременным уменьшением расходов на регенерацию, является замена фильтрующих материалов, работающих в режиме объемной фильтрации, на фильтроэлементы, у которых удаляемые загрязнения собираются на поверхности фильтрующей перегородки. В этом случае задерживаются частицы, размер которых больше пор, а затем из них образуется слой загрязнений, который также является фильтрующим материалом. Такой процесс характерен для жесткой пористой перегородки толщиной 1–20 мм, с размерами пор 1–20 мкм (режим микрофильтрации), организованной в виде пластин или труб различного диаметра (фильтроэлементы), которые работают при малых скоростях фильтрования. Если при работе зернистых загрузок скорости фильтрования составляют обычно 10–25 м/ч, то скорости фильтрования в режиме микрофильтрации не должны превышать 5 м/ч [1]. Накапливающиеся на фильтрующей поверхности загрязнения периодически удаляются в дренаж методом обратной промывки отфильтрованной водой. В известных технических решениях один фильтрующий модуль обрабатывает от 0,02 до 0,50 м³/ч жидкости [2, 3].

Цель работы – исследовать процесс очистки технической воды трубчатыми фильтроэлементами в режиме микрофильтрации без применения дополнительных химических реагентов.

Материалы и методики исследований. Для проведения экспериментов использовали изготовленные из алюмосиликатного порошка многослойные трубчатые фильтроэлементы диаметром 65 мм и длиной 400–500 мм с толщиной стенки 4 мм. Толщина мембранного слоя, содержащего карбид кремния, – 100–200 мкм, размер пор – 4–7 мкм. Фильтроэлементы диаметром 65 мм и длиной 400–500 мм с толщиной стенки 4 мм, изготовленные из базальтового волокна, имели щелевые поры средним размером менее 20 мкм.

Вид и структура фильтроэлементов представлены на рис. 1.

После монтажа труб в экспериментальном модуле фильтрацию через образцы проводили снаружи внутрь. Измерения производительности и перепадов давления осуществляли счетчиками воды и манометрами. Определение цветности, мутности, кислотности, перманганатной окисляемости, концентраций железа, алюминия в воде, химическое потребление кислорода (ХПК) проводили по стандартным методикам.

После завершения процесса очистки с поверхности мембраны (наружная поверхность трубчатого фильтроэлемента) снимали осадок и высушивали при температуре 90 °С. Исследование морфологии и элементного состава примесей, собравшихся на поверхности мембраны, проводили на аттестованном сканирующем

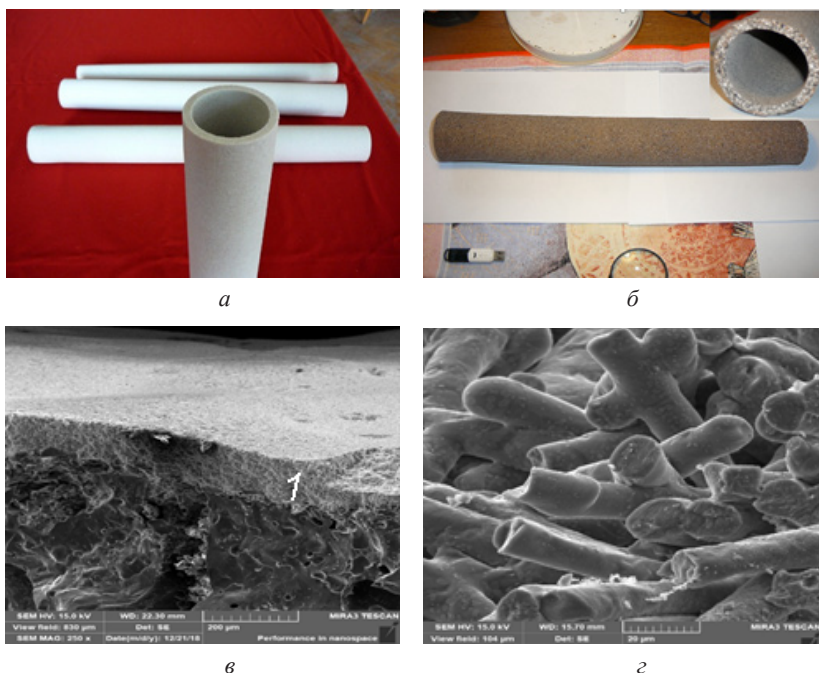


Рис. 1. Вид и структура фильтроэлементов из алюмосиликатных порошков (а, в; 1 – мембрана) и базальтового волокна (б, г)

электронном микроскопе высокого разрешения MIRA фирмы TESCAN (Чехия) с микрорентгеноспектральным анализатором фирмы Oxford Instruments Analytical (Великобритания). Погрешность метода в данном случае составляет 3–5 отн. %.

Микрорентгеноспектральный анализ образцов (МРСА) проводили по площади, используя карты характеристического рентгеновского излучения.

Результаты и их обсуждение. В табл. 1 представлены результаты лабораторных исследований по диапазонам колебаний показателей исходной технической воды в период испытаний.

Таблица 1. Показатели исходной воды

Показатель	Единица измерения	Диапазон значений
Взвешенные вещества	мг/дм ³	<3
Цветность	град	12–95
Прозрачность	–	10–30
Сухой остаток	мг/дм ³	220–250
Химическое потребление кислорода	мгО/дм ³	11–29
Перманганатная окисляемость	мгО ₂ /дм ³	4,7–7,0
Жесткость	мг-экв/дм ³	<3
Железо, общее	мг/дм ³	0,07–0,78
Алюминий	мг/дм ³	0,20–2,67
Кислотность	–	6,3–8,0

В производственных условиях ОАО «Полоцк-Стекловолокно» проведены испытания опытного модуля, состоящего из многослойных фильтрующих труб, изготовленных реакционным спеканием на основе алюмосиликатов, и фильтрующих труб из базальтового волокна. Модули использовали для очистки технической воды, предназначенной для отмывки продукции завода до требований технических нормативных правовых актов (ТНПА).

Как следует из табл. 1, значительные колебания показателей не гарантируют соответствия продукции ТНПА после отмывки исходной технической водой. Показатели воды после очистки фильтрующими трубами на основе алюмосиликатных порошков с мембранным слоем и базальтового волокна представлены в табл. 2.

Таблица 2. Показатели воды после очистки

Показатель	Единица измерения	Диапазон значений	
		Алюмосиликат	Базальт
Взвешенные вещества	мг/дм ³	<3	–
Цветность	град	8–12	–
Прозрачность	–	>30	–
Сухой остаток	мг/дм ³	203–240	184–199
Химическое потребление кислорода	мгО/дм ³	9,8–11,5	–
Перманганатная окисляемость	мгО ₂ /дм ³	3,96–4,4	4,4–5,1
Жесткость	мг-экв/дм ³	<3	<3
Железо, общее	мг/дм ³	0,03–0,19	0,06–0,08
Алюминий	мг/дм ³	0,2–2,4	–
Кислотность	–	6,6–7,2	–

Сравнение диапазонов изменения концентраций в исходной и фильтрованной воде указывает на значительное сужение диапазонов после очистки в сторону уменьшения концентрации по цветности, прозрачности, перманганатной окисляемости, ХПК, железу. Например, для концентрации ХПК дисперсия (степень отклонения значений переменной от средней величины) уменьшается с 0,063 до 0,001. Для концентрации по железу дисперсия уменьшается с 0,057 до 0,012. Наблюдается незначительное уменьшение кислотности, сухого остатка, цветности, концентрации алюминия. Взвешенные вещества и жесткость остаются практически без изменения.

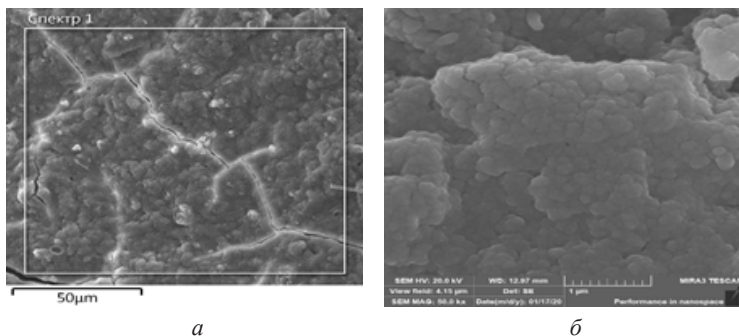
Поскольку перед поступлением на завод техническая вода на станции осветления подвергается обработке алюминийсодержащими коагулянтами, минимальную растворимость гидроокись алюминия, в которую переходят ионы алюминия при гидролизе алюминийсодержащих коагулянтов при их контакте с обрабатываемой водой, приобретает при нейтральном водородном показателе рН 6,0–6,5. При таком значении водородного показателя равновесная концентрация ионов алюминия в чистой воде минимальна и составляет <0,04 мг/дм³.

При снижении рН < 6,0 концентрация растворенного алюминия начинает экспоненциально нарастать, начиная с рН 5,7 до

стигает аналитически заметных значений, а при рН 5,5 обычно уже преодолевает предельно допустимую концентрацию. Если же в обработанной коагулянтной природной воде при нейтральном рН в диапазоне 6,0–7,0 обнаруживается достаточно высокая остаточная концентрация алюминия (например, 0,20–0,40 мг/дм³), то это говорит о наличии алюминия не в растворенной, а в коллоидной форме. Таким алюминийсодержащим коллоидом могут быть агрегированные соединения частично растворимых комплексов металла (железа) – гуматов алюминия. Причем эти агрегированные соединения, возможно, имеют амeboобразный вид с содержанием до 18 молекул структурированной воды на 1 молекулу гидроокиси алюминия [4]. Можно предположить, что некоторая критическая концентрация агрегированных соединений создает условия несоответствия продукции ТНПА. Следовательно, сужение после очистки диапазонов в сторону уменьшения концентрации по цветности, прозрачности, перманганатной окисляемости, ХПК, железу приведет к уменьшению концентрации агрегированных соединений и интегрально повысит качество очистки технической воды.

Результаты исследований морфологии и элементного состава примесей, собравшихся на поверхности мембраны, представленные на рис. 2, подтверждают сделанные предположения.

Структура термически обработанного при температуре 60–70 °С осадка имеет вид глобул средним размером 0,1–0,4 мкм (см. рис. 2, б). Усредненный химический состав осадка указывает на доминирующую роль соединений алюминия и железа на фоне аномально малого количества кремния, большое количество которого характерно для примесей водозаборов поверхностных источников (см. рис. 2 а, в). Проведенный анализ указывает, что для успешной очистки исследуемой технической воды амeboобразный вид примесей предполагает использование малых линейных скоростей фильтрации. При этом данный вид примесей подразумевает и ограничение величины рабочего давления из-за возможности продавливания данных агрегированных соединений через поры даже субмикронного уровня.



Статистика	Al	Si	P	S	Ca	Fe	O
–	%	%	%	%	%	%	%
Усреднение	37,6	5,2	1,0	2,1	2,2	4,9	Остальное

в

Рис. 2. Морфология и элементный состав примесей на поверхности мембраны: *а* – область осадка с границами площади для микрорентгеноспектрального анализа; *б* – структура осадка; *в* – результаты микрорентгеноспектрального анализа

Результаты соответствия продукции ТНПА представлены в табл. 3.

Таблица 3. Данные гидравлических испытаний

Фильтрующий материал	Дата	Расход на отмывку, м ³	Расход, м ³ /ч	$P_{вх}$, атм	Δ
Алюмосиликат*	25.10.19	1,16	1,2	0,9	0,5
	28.10.19	–	–	0,7	0,6
	28.10.19	0,65	2,0	0,7	0,56
	28.10.19	1,2	0,63	1,1	0,78
Базальт**	16.01.20	1,62	1,2	0,8	0,3
	06.02.20	2,0	1,0	1,5	1,28

Примечание. Степень отмывки: готовая продукция (кремнеземное волокно) соответствует ТНПА с оценкой не ниже 7 (*) и не ниже 8 (**) по 10-балльной шкале.

Из представленных результатов следует, что многослойная структура алюмосиликатных труб, имеющая мембранный слой (размер пор – 4–7 мкм, толщина – 100–200 мкм) при линейных

скоростях 0,12–0,14 м/мин и перепадом давления в диапазоне 0,4–0,6 атм на пористой перегородке, обеспечивает соответствие продукции ТНПА не ниже 7 по 10-балльной шкале. Структура труб из базальтового волокна, характеризующаяся наличием щелевых пор с размерами менее 20 мкм при выбранных скоростях фильтрации и перепадом давления на пористой перегородке, обеспечивает соответствие продукции ТНПА не ниже 8 по 10-балльной шкале.

Для проведения опытно-промышленных испытаний из алюмосиликатных фильтрующих труб собран опытный образец установки с площадью фильтрации 0,8 м². При рабочем давлении до 1,3 атм и скорости фильтрации 0,03–0,07 м/мин на пористой перегородке создавали перепад давления не более 0,3 атм и обеспечивали условия соответствия готовой продукции ТНПА с оценкой не ниже 9 по 10-балльной шкале.

Результаты работы опытного образца установки представлены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты контрольных испытаний, 2020 г.

Дата	Ассортимент продукции	Расход воды, м ³
29.01	ВК-11(9)	0,9
	PS-23(9)	1,9
30.01	PS-23(9)	0,8
		2,7
03.02	ВК-11(9)	1,2
	PS-23(9)	0,9
04.02	КВ-11(6)	1,3
07.02	ВК-11(9)	1,9

Примечание. Степень отмывки: готовая продукция (кремнеземное волокно) соответствует ТНПА с оценкой не ниже 9 по 10-балльной шкале.

Заключение. Доказана возможность очистки технической воды из водозаборов поверхностных источников многослойными пористыми материалами на основе алюмосиликатов с размерами пор мембранного слоя 4–7 мкм и базальтового волокна со щелеобразными порами размером менее 20 мкм от примесей

в виде алюминийсодержащих коллоидных соединений. Амебообразный вид примесей предполагает использование линейных скоростей фильтрации в диапазоне 0,03–0,14 м/мин. При этом ограничение величины рабочего давления величиной 1,3–1,5 атм гарантирует отсутствие продавливания данных агрегированных соединений через поры исследуемых материалов и обеспечивает соответствие готовой продукции ТНПА с оценкой не ниже 7 по 10-балльной шкале.

Литература и источники

1. *Драгинский, В. Л.* Предложения по повышению эффективности очистки воды при подготовке водоочистных станций к выполнению требований СанПиН 2.1.4.559-96 «Питьевая вода. гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества» [Электронный ресурс] / В. Л. Драгинский, В. М. Корабельников, Л. П. Алексеева // База нормативной документации: www.complexdoc.ru. – Режим доступа: http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/549039/predlozheniya_po_povysheniyu_effektivnosti_ochistki_yody_pri_podgotovke.pdf. – Дата доступа: 06.02.2012.

2. *Мембранные системы БИОКОН для ультра- и микрофильтрации. Применение в различных отраслях промышленности* [Электронный ресурс] // ЗАО «БИОКОН». – Режим доступа: <http://biocon-russia.narod.ru/russian/a1.htm>. – Дата доступа: 08.02.2012.

3. *Применение мембранных керамических фильтров в процессе очистки различных жидкостей и получении питьевой воды* [Электронный ресурс] // Портал «ДЕЛОРУС». – Режим доступа: http://www.delorus.com/every/ooo_marinservis/membrannie_keromicheskie_filtri.php. – Дата доступа: 20.03.2012.

4. *Коагулянты* : обзор [Электронный ресурс]. – Режим доступа https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%84%D0%B0%D1%82_%D0%B0%BB%D1%8E%D0%BC%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D1%8F/. – Дата доступа: 20.03.2020.