

Научная статья

УДК 677.529

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-2-117-123>

CC BY 4.0

Градиентные нетканые материалы с модифицированным поверхностным нанослоем для фильтрационной подготовки воды в строительстве

Виктор Геннадьевич Назаров¹ , Леонид Алексеевич Иванов² , Александр Васильевич Дедов^{1*} ,
Елена Сергеевна Бокова³ , Евгений Сергеевич Статник⁴ 

¹ Московский политехнический университет, Москва, Россия

² Российская инженерная академия, Москва, Россия

³ Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, Москва, Россия

⁴ Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: dedovs55@rambler.ru

АННОТАЦИЯ: Введение. Целью работы является определение влияния структуры сформированного в результате модификации поверхностного слоя фильтрующих материалов на их водопроницаемость и размер улавливаемых твердых частиц. **Материалы и методы исследования.** В качестве объектов исследования использовали нетканые полотна из смеси полиэтилентерефталатных (ПЭТФ) (70 масс.%) и бикомпонентных волокон (БКВ) структуры ядро-оболочка. Нетканые материалы получали механическим способом формирования холста с последующим его упрочнением методом иглопрокалывания. Полученные материалы подвергали модификации путем термообработки. Перенос воды в модифицированных материалах определяли по коэффициенту проницаемости, эффективность фильтрации – по количеству улавливаемых частиц определенного размера. **Результаты и их обсуждение.** Показано, что нетканые иглопробивные материалы без дополнительной термообработки не пригодны для фильтрации воды. Предложен метод тепловой и деформационно-тепловой модификации нетканых полотен, обеспечивающий получение градиентных материалов с регулируемой толщиной наноразмерного поверхностного слоя. Несмотря на снижение водопроницаемости, модифицированный материал улавливает твердые частицы с эквивалентным диаметром 2–4 мкм по сравнению с немодифицированным (порядка 20 мкм), что является достаточным для подготовки воды к использованию в парогенераторах и при производстве строительных материалов. **Заключение.** Установлены оптимальные параметры деформационно-тепловой обработки для получения высокоэффективного фильтрующего нетканого материала: температура 180°C, скорость обработки 3,5 м/мин.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нетканое иглопробивное полотно, тепловая обработка, фильтрация воды, фильтрующий нанослой.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Назаров В.Г., Иванов Л.А., Дедов А.В., Бокова Е.С., Статник Е.С. Градиентные нетканые материалы с модифицированным поверхностным нанослоем для фильтрационной подготовки воды в строительстве // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 2. С. 117–123. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-2-117-123>. – EDN: ASVYVS.

ВВЕДЕНИЕ

Вода и водяной пар широко используются в строительной сфере [1–9]. Качество строительных работ и материалов, а также продолжительность бесперебойной работы установок генерации водяного пара [10–15] во многом зависят от содержания в воде твердых примесей различной природы. Учитывая необходимость использования в строительстве относительно больших объемов воды, фильтрующие материалы в системах ее подготовки должны не только улавливать твердые частицы заданного размера,

но и обладать высокой водопроницаемостью. Проницаемость и улавливание твердых частиц прямо противоположно зависят от размеров пор фильтрующего материала. Проницаемость возрастает с увеличением размеров пор, но при этом происходит снижение эффективности фильтрации.

Авторами статьи предложены способы тепловой и деформационно-тепловой обработки нетканых иглопробивных полотен [16–22] для получения градиентных материалов, в которых размеры пор изменяются по толщине [11, 15, 19–22]. Получены нетканые материалы с модифицированным поверхност-

© Назаров В.Г., Иванов Л.А., Дедов А.В., Бокова Е.С., Статник Е.С., 2023

ным слоем наноразмерной толщины и фиксируемой или регулируемой пористостью в объеме. Толщина и размер пор модифицированного слоя определяют как водопроницаемость, так и эффективность фильтрации, изменение пористости в объеме — водопроницаемость материала. В модифицированном поверхностном слое происходит накопление фильтруемых частиц в виде шлама, что создает возможность для его удаления с фильтра обратным потоком воды и, таким образом, обеспечивает многократное использование фильтрующего материала.

Цель работы — определение влияния структуры поверхностного слоя фильтрующего материала на водопроницаемость и размер улавливаемых твердых частиц.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования использовали нетканые иглопробивные полотна из смеси ПЭТФ (ТУ 6-13-0204077-95-91) и БКВ (фирма Самсунг, Республика Корея) в соотношении 70:30 % масс. Линейная плотность ПЭТФ волокон составляла 0,33 текс (диаметр 20–25 мкм), БКВ — 0,44 текс (диаметр 30–33 мкм). Бикомпонентные волокна имели структуру ядро-оболочка [17,18], где оболочка состояла из низкомолекулярного ПЭТФ с температурой плавления 110–120°C, а ядро — из высокомолекулярного ПЭТФ с температурой плавления 250–270°C.

Нетканые материалы получали механическим способом формирования холста на приставке чесального агрегата «Шпинбау» (Германия) с последующим его упрочнением методом иглопрокалывания на агрегате «Дило» (Германия) при варьировании плотности иглопрокалывания для получения нетканых полотен с разным значением поверхностной и объемной плотности.

Далее часть материалов с поверхностной плотностью 0,35 кг/м², толщиной 3,0 мм и объемной плотностью 117 кг/м³ подвергали тепловой модификации двумя способами.

Согласно первому, нетканые материалы держивали на металлической пластине, нагретой до 180°C в течение 0,5; 1,0; 3,0; 4,0; 6,0 и 10,0 мин. Во втором способе использовали специально разработанное оборудование (рис.1), в котором полотно подвергали деформационно-тепловому воздействию в зазоре между нагретым до 180°C валом и транспортной лентой. Скорость обработки составила 3,5, 12 и 15 м/мин.

Разработанное оборудование позволяет решать технические проблемы, связанные с налипанием волокон на поверхность нагретого вала в случае использования обычного каландра. Центрирование и регулирование натяжения ленты, быстрое охлаж-

дение многослойного материала при выходе из зоны деформационно-теплого воздействия, а также футеровка поверхности нагреваемого вала фторкаучуком обеспечивают полное и эффективное устранение налипания.

Кроме того, изготовление транспортной ленты из арамидных волокон методом прокалывания закольцованного полотна обеспечивает длительную эксплуатацию вала при высокой температуре, которая достигает 220°C.

Давление на полотно в зазоре между транспортной лентой 4 и нагретым валом 2 регулируется положением направляющих валов 3, движение которых ограничивает поперечный сдвиг транспортной ленты 4 и обеспечивает ее центрирование. Натяжение валов 3 осуществляется пневматическими цилиндрами.

Высокая скорость охлаждения обработанных материалов достигается интенсивным воздушным обдувом.

В зазоре между валом и транспортной лентой создается достаточно малое механическое воздействие на полотно, что в совокупности с принудительной подачей материала транспортной лентой способствует уменьшению его вытяжки и позволяет контролировать и регулировать изменение пористости в зоне деформационно-теплого воздействия.

Фиксация структуры обработанных материалов обеспечивается интенсивным обдувом холодным воздухом при выходе полотна из зазора между валом и транспортером. Высокая скорость охлаждения ограничивает вытяжку материала в момент выхода из зазора и прекращения принудительной транспортировки.

Достаточно большой диаметр вала, который составляет 1 м, позволяет увеличить продолжительность деформационно-теплого воздействия на материал, снизить температуру обработки и регулировать прогрев материала по толщине в зависимости от его объемной плотности.

Перенос воды в модифицированных материалах, полученных с применением теплового и деформационно-теплого способов обработки, определяли расчетом коэффициента проницаемости (K , м²), согласно уравнению:

$$K = \frac{\mu dw}{\Delta P}, \quad (1)$$

где μ — коэффициент вязкости воды, Па·с; d — толщина материала, м; ΔP — напор потока воды, Па; w — скорость фильтрации воды, м/с.

Скорость фильтрации воды в материалах определяли экспериментально согласно требованиям ГОСТ 52608-200 при постоянном напоре воды 500 Па (высота водяного столба 50 мм).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование пористой структуры модифицированных полотен

На рис. 2 представлены микрофотографии модифицированных градиентных материалов на основе смеси ПЭТФ и БКВ (70:30), полученных на устройстве (рис. 1) в зазоре между нагретым валом и транспортерной лентой. Материалы получали при постоянной температуре вала 180°C и скорости обработки: 3,5; 12 и 15 м/мин.

Как видно из приведенных фотографий, для каждого режима термообработки характерно появление в структуре материала поверхностного модифицированного нанослоя, характеризующегося высокой плотностью упаковки волокон. Разница в плотности упаковки способствует формированию материала с градиентом распределения плотности и пористости по толщине. При этом толщина поверхностного модифицированного слоя и структура объемной части материала зависят от скорости обработки, то есть продолжительности контакта с горячей поверхностью вала.

При высокой скорости обработки, равной 15 м/мин, формируется плохо различимый наноразмерный по толщине модифицированный поверхностный слой с выраженной границей раздела между ним и объемной частью полотна. Структура объемного слоя материала в целом соответствует типичной структуре необработанного нетканого полотна (рис. 2 а).

Уменьшение скорости деформационно-тепловой обработки с 15 до 12 м/мин приводит к увеличению толщины модифицированного слоя и формированию переходного слоя между ним и объемной частью материала, в котором существенно уменьшается толщина пучков волокон. Различная плотность упаковки волокон по длине пучков переходного слоя приводит к образованию пор, которые имеют форму конуса, направленного вершиной к модифицированному поверхностному слою (рис. 2 б).

При скорости обработки 3,5 м/мин поверхностный модифицированный слой имеет значительную толщину. В поверхностном слое и в объеме материала появляются плотные сферические структуры различных размеров, расположенные на небольшом расстоянии друг от друга, между которыми формируется система сообщающихся извилистых капилляров (рис. 2 в).

Влияние скорости обработки в зазоре между нагретым валом и транспортерной лентой на формирование структуры поверхности модифицированных градиентных материалов представлено на рис. 3.

Согласно способу получения нетканых полотен методом иглопрокалывания они неизбежно имеют два

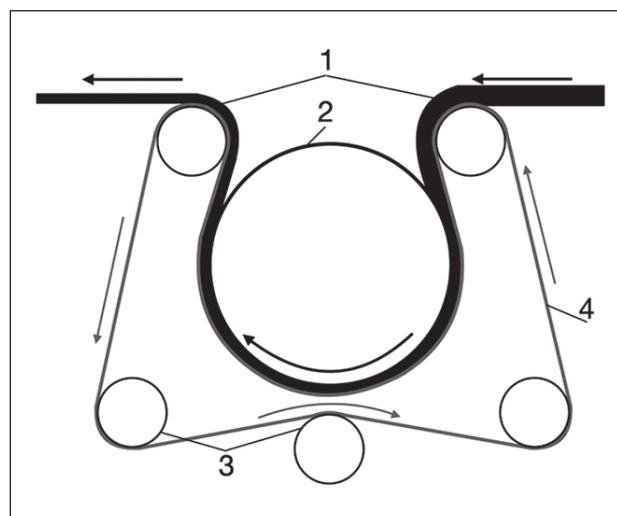


Рис. 1. Схема устройства для деформационно-тепловой обработки полотен из волокон с различной температурой плавления: 1 — полотно; 2 — нагретый вал; 3 — направляющие валы; 4 — транспортерная лента (тонкой стрелкой показано направление движения транспортерной ленты; толстой стрелкой — движение полотна)

основных весьма распространенных типа дефектов поверхности, влияющих на тонкость фильтрации воды. Первый связан с неравномерным распределением волокон, что проявляется наличием на поверхности полотна характерных чередующихся полос с высокой и низкой плотностью упаковки волокон. Этот дефект является следствием непрерывной продольной протяжки полотна при реализации операции иглопрокалывания. Второй вид дефектов — это отверстия на поверхности материала от действия игл (рис. 3 а).

Очевидно (рис. 3 б, в, г), что при деформационно-тепловой обработке вышеуказанные дефекты нивелируются: исчезновение явно выраженных отверстий на модифицированной поверхности и отсутствие полос свидетельствует о более равномерном распределении волокон в поверхностном слое. Устранение дефектов на поверхности является следствием деформационного сдвига, ориентации и уплотнения волокон поверхностного слоя при прохождении материала в зазоре между валом и транспортерной лентой.

На рис. 4 приведена микрофотография структуры нетканого материала, обработанного на металлической пластине, нагретой до 180°C при продолжительности выдержки 4 мин.

Очевидно, что при этом способе обработки образуется плотный модифицированный микроразмерный поверхностный слой, а объемная часть материала характеризуется равномерной по всей толщине плотностью упаковки волокон (рис. 4).

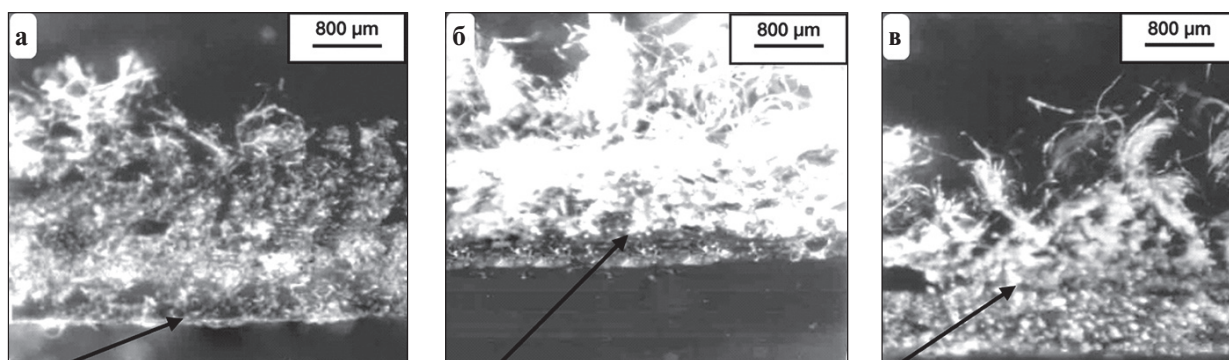


Рис. 2. Микрофотографии поперечного среза термобработанных материалов на основе смеси ПЭТФ (70 %) и БКВ (30 %). Скорость обработки, м /мин: а – 15; б – 12; с – 3,5. Температура вала – 180°C (стрелками показана граница между модифицированным поверхностным слоем и объемом)

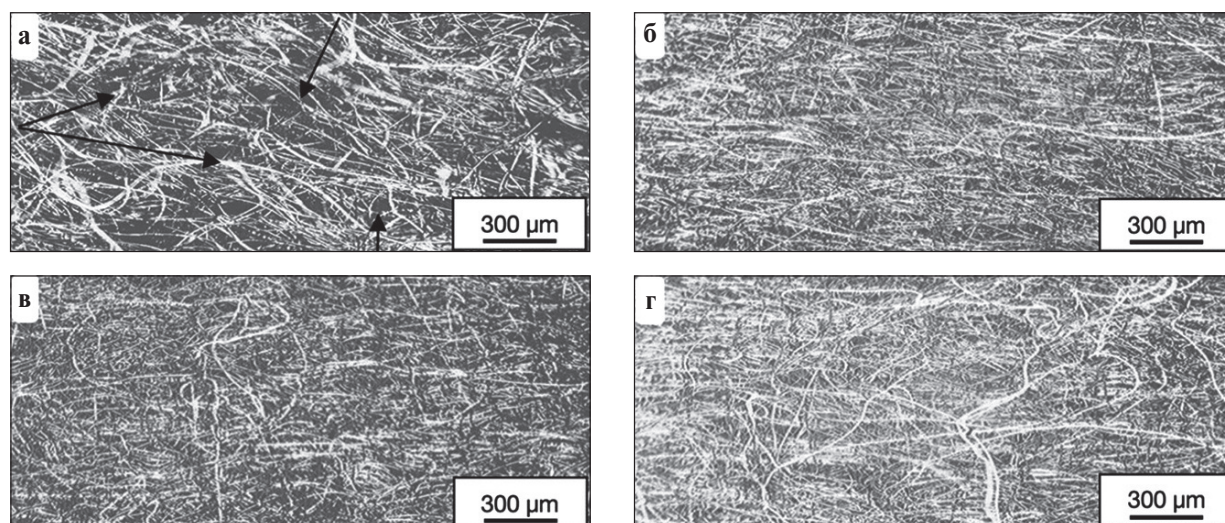


Рис. 3. Микрофотографии поверхности нетканых материалов на основе смеси ПЭТФ (70 %) и БКВ (30 %): а – исходный немодифицированный нетканый материал. Материал, обработанный при скорости, м /мин: б – 15; в – 12; г – 3,5. Температура вала – 180°C (стрелками на поверхности полотна показаны отверстия от действия игл, направление обработки показано стрелками сбоку)

Таким образом, рассмотренные способы тепловой и деформационно-тепловой модификации нетканых полотен на основе смеси ПЭТФ и БКВ позволяют получать градиентные материалы с регулируемой структурой поверхностного и объемных слоев, которые могут использоваться в качестве фильтров предварительной очистки воды.

Исследование водопроницаемости обработанных полотен

Коэффициент проницаемости нетканых полотен (K), содержащих бикомпонентные волокна, и материалов, полученных при постоянной температуре вала (180°C) и варьировании скорости движения транспортера, связан с удельным объемом пор, кото-

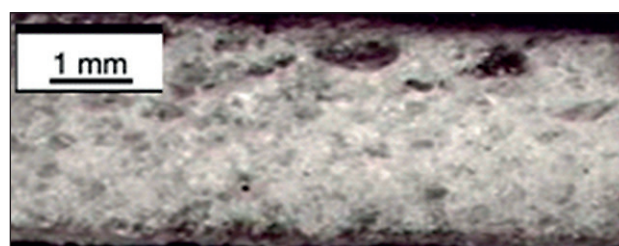


Рис. 4. Микрофотография поперечного среза нетканого материала на основе смеси ПЭТФ (70 %) и БКВ (30 %), термообработанного на пластине. Температура вала – 180°C (поверхность, контактирующая с металлической пластиной, внизу)

рый рассчитывали как объем пор на единицу массы образца (V_M , м³/кг).

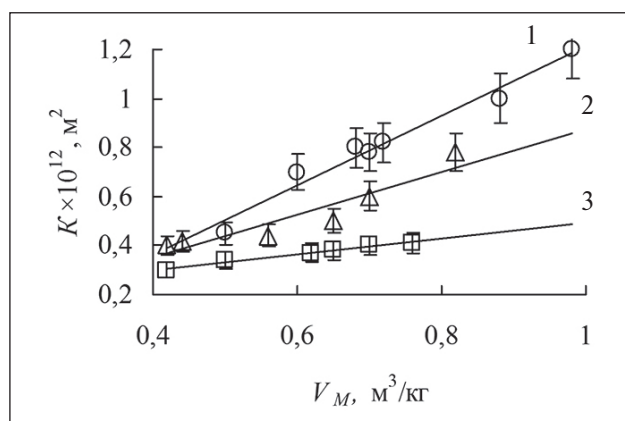


Рис. 5. Зависимости коэффициента водопроницаемости от удельного объема пор полотен различной объемной плотности: 1 — исходное немодифицированное полотно; 2 — материалы, термообработанные на пластине в течение 0,5; 1,0; 3,0; 4,0; 6,0 и 10,0 мин; 3 — материалы, полученные обработкой между валом и транспортной лентой при скорости движения материала 3,5, 12 и 15 м/мин. Температура термообработки — 180°C.

Зависимости K от V_M для немодифицированного и модифицированных путем деформационно-тепловой обработки нетканых материалов представлены на рис. 5.

Параметр V_M регулировали, используя немодифицированные полотна с различной объемной плотностью, а также используя варьирование при получении модифицированных материалов продолжительности выдержки полотна на металлической пластине и скорости обработки.

Соотношение между K и V_M модифицированных нетканых полотен, полученных термообработкой на металлической пластине и деформационно-тепловой обработкой между валом и транспортной лентой, описывается линейными зависимостями, которые подчиняются уравнению общего вида:

$$K = k \times V_M, \quad (2)$$

где k — коэффициент приведения, равный для немодифицированных полотен 1,2; для модифицированных материалов, полученных термообработкой на металлической пластине, — 1,0; при деформационно-тепловой обработке на устройстве (рис. 1) — 0,6 (кг × м²)/м³.

Линейный вид зависимостей K от V_M для немодифицированных и модифицированных нетканых материалов при различных методах тепловой обработки свидетельствует о зависимости проницаемости волокнистых материалов от разделения потока воды в поверхностном слое. Кроме того, для моди-

фицированных градиентных материалов линейная зависимость отражает прямо пропорциональное соотношение между увеличением толщины поверхностного модифицированного слоя, что отражается уменьшением V_M , и снижением коэффициента проницаемости. Проницаемость модифицированных материалов, полученных на нагретой металлической пластине, практически соответствует проницаемости немодифицированных нетканых полотен с соответствующей удельной пористостью (рис. 5). Проницаемость градиентных материалов, полученных обработкой между нагретым валом и транспортной лентой, зависит от сдвига волокон поверхностного слоя, следствием которого является возрастание плотности упаковки и переориентация волокон.

Исследование эффективности фильтрации воды

Фильтрующие характеристики исходного необработанного нетканого полотна определяли с применением безнасосной установки вакуумного фильтрования при перепаде давления 0,5 атм. Для искусственного загрязнения воды использовали частицы оксида железа. Гранулометрический состав частиц, который определяли по параметру эквивалентного диаметра частиц (D , мкм) до фильтрации (рис. 6), устанавливали анализом изображений системы «ВидеоТестТ».

Параметр N_f рассчитывали из уравнения:

$$N_f = \frac{N_0 - N_1}{N_0} 100, \quad (3)$$

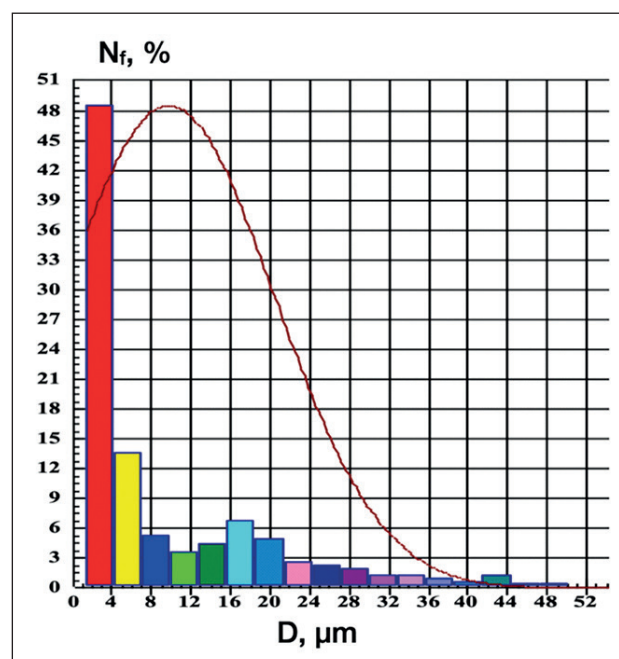


Рис. 6. Гранулометрический состав частиц оксида железа до фильтрации

где N_0 и N_f — число частиц определенной фракции до фильтрации и число частиц этой фракции в фильтрате, соответственно. Чем выше значение N_f , тем больше частиц данной фракции извлекается из воды в процессе фильтрации, что позволяет оценить тонкость фильтрации.

Из рис. 6 видно, что 70% частиц имели эквивалентный размер менее 10 мкм.

Изменение гранулометрического состава частиц (N_f , %) после фильтрации воды в немодифицированном нетканом полотне и в градиентных модифицированных материалах, полученных обработкой на металлической пластине и валковом оборудовании, представлено на рис. 7. Модифицированные материалы, обработанные двумя способами, имели одинаковую поверхностную плотность 0,35 кг/м².

Исходное полотно и модифицированный материал, полученный обработкой на металлической пластине в течение 4 мин, практически не фильтруют

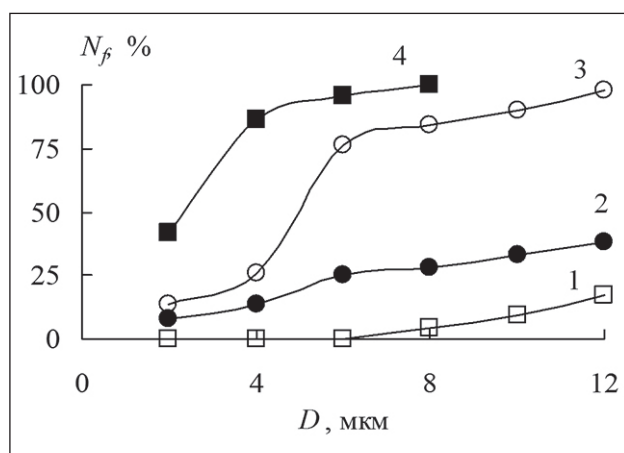


Рис. 7. Гранулометрический состав частиц оксида железа после фильтрации воды через: 1 — немодифицированное полотно; 2 — модифицированный материал, полученный при выдержке на нагретой металлической пластине в течение 4 мин; 3, 4 — модифицированный материал, полученный деформационно-тепловой обработкой при скорости 12 (3) и 3,5 (4) м/мин

воду от твердых частиц (рис. 7, зависимости 1 и 2), что объясняется высокой дефектностью их поверхностных слоев.

Размер частиц, которые улавливают градиентные нетканые материалы, полученные при деформационно-тепловом воздействии, зависит от скорости обработки. При скорости обработки 12 м/мин получен материал, который задерживает 75% частиц эквивалентным диаметром 6 мкм и полностью задерживает частицы эквивалентным диаметром более 12 мкм (рис. 7, зависимость 3). При снижении скорости обработки до 3,5 м/мин материал улавливает 75% частиц эквивалентным диаметром 3 мкм и полностью улавливает частицы эквивалентным диаметром более 8 мкм (рис. 7, зависимость 4).

Для удаления осадка отфильтрованных частиц с поверхности материалов, полученных при скорости обработки 3,5 и 12 м/мин, использовали метод промывки фильтра обратным потоком воды. После первого цикла фильтрации, который выполняли до снижения проницаемости материала на 50%, масса частиц на фильтре уменьшилась на 92% при постепенном снижении массы удаляемых частиц после 8 циклов фильтрации до 72%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

— Предложен деформационно-тепловой способ модификации нетканых иглопробивных полотен из смеси полиэтилентерефталатных и бикомпонентных волокон в соотношении 70:30, позволяющий получить градиентные материалы с регулируемой толщиной модифицированного поверхностного слоя, структура которого определяет водопроницаемость и эффективность фильтрации воды.

— При скорости деформационно-тепловой обработки, равной 3,5 м/мин, получен материал, который улавливает 75% твердых частиц эквивалентным диаметром 3 мкм и полностью улавливает частицы эквивалентным диаметром более 8 мкм с коэффициентом водопроницаемости порядка 10^{-11} м², что является достаточным для фильтрации воды в строительстве и производстве строительных материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Patanaik A., Anandjiwala R., Some Studies on Water Permeability of Nonwoven Fabrics. *Textile Research J.* 2009; 79(2): 147–152.
2. Ozen I. Multi-layered breathable fabric structures with enhanced water resistance. *J. Engineered Fibers and Fabrics.* 2012; 7(4): 63–69.
3. Kothari V. K., Das A., Singh S., Filtration behavior of woven and nonwoven fabrics. *Indian J. Fibre and Textile Research.* 2007. V. 32. № 6. P. 214–220.
4. Almanea M.N., Elkhatib E.A., Mahdy A.M. Effects of water treatment residuals on the kinetics of Ni(II) sorption and desorption in some arid soils. *Alex. Sci. Exch. J.* 2016. 37(2): 287–299.

5. Ali F. A study of collapsible behavior of soil blended with fly ash and kota stone dust. *Imperial J. Interdisciplinary Res.* 2017; 3(2): 446–453.
6. Nikonov E.G., Pavlus M., Popovicova M. 2D Microscopic and macroscopic simulation of water and porous material interaction. *Computer Research and Modeling.* 2018; 10(1): 77–86
7. Tao F., Valenzuela Garcia A., Xiao T., Chen X., Zhang Y., Yin Y. Interfacial solar vapor generation: introducing students to experimental procedures and analysis for efficiently harvesting energy and generating vapor at the air–water interface. *J. Chem. Education.* 2020; 97(4): 1093–1100.
8. Qin S., Qian M., Chen T., Yang Q., Xu H., Zheng L., Yao Y. Hierarchical microspheres composed of mn-doped cop nanosheets for enhanced oxygen evolution. *ACS Appl. Nano Materials.* 2020; 3(11): 10702–10707.
9. Ivanov L.A., Xu L.D., Bokova E.S., Ishkov A.D., Muminova S.R. Inventions of scientists, engineers and specialists from different countries in the area of nanotechnologies. Part I. *Nanotechnologies in Construction.* 2021; 13(1): 23–31. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2021-13-1-23-31>
10. Bakhronov K. S. Intensification of the operation of an industrial evaporator. *Chem. Petroleum Engineer.* 2006; 42 (7): 433–434.
11. Pu L., Qu Z., Bai Y., Qi D., Song K., Yi P. Thermal performance analysis of intermediate fluid vaporizer for liquefied natural gas. *Appl. Thermal Engineering.* 2014; 65(1): 564–574.
12. Ivanov L.A., Bokova E.S., Muminova S.R., Katuhin L.F. Nanotechnologies: a review of inventions and utility models. Part I. *Nanotechnologies in Construction.* 2020, Vol. 12, no. 1, pp. 27–33.
13. Ivanov L.A., Xu L.D., Bokova E.S., Ishkov A.D., Borisova O.N. Inventions in the area of nanomaterials and nanotechnologies. Part I. *Nanotechnologies in Construction.* 2022; 14(1): 18–26.
14. Chidambaram P.K., Jo Y. M., Kim H. D. Theoretical and computational analyses of LNG evaporator. *J. Thermal Sci.* 2017; 26 (2): 132–137.
15. Olaoye T.S., Dewsbury M., Kunzel H. A method for establishing a hygrothermally controlled test room for measuring the water vapor resistivity characteristics of construction materials. *Energies.* 2021; 14(1): 33–45.
16. Dedov A.V., Nazarov V.G. Mechanical characteristics of needlepunch material obtained from a mixture of polyester and polypropylene fibers treated on roll calendar. *Fibre Chem.* 2011; 43(3): 259–262 .
17. Bokova E.S., Dedov A.V. Mechanical characteristics of needlepunch materials treated with heated air. *Fibre Chem.* 2012; 44(1): 32–34.
18. Dedov A.V., Nazarov V. G. Mechanical Properties of Composite Materials Based on Latex-Impregnated Needle-Punched Nonwoven Fabrics from Fibers of Different Nature. *Inorganic Materials: Appl. Research.* 2018; 9(1):47–51.
19. Dedov A. V., Roev B. A., Bobrov V. I., Kulikov G. B., Nazarov V. G. Mechanism of Stretching and Breaking of Needle-Punched Nonwovens. *Fibre Chem.* 2018; 49(5): 334–337.
20. Nazarov V.G., Doronin F.A., Evdokimov A.G., Dedov A.V. Regulation of the wettability of nonwoven cloth by oxyfluorination to improve its impregnation by latex. *Fibre Chem.* 2020; 52(2): 109–111.
21. Dedov A.V., Babushkin S.V., Platonov A.V., Kondratov A.P., Nazarov V.G. Sorptive properties of nonwoven materials. *Fibre Chem.* 2001; 33(5): 56–58.
22. Dedov A.V., Nazarov V.G. Processed Nonwoven Needle punched Materials with Increased Strength. *Fibre Chem.* 2015; 47(2): 121–125.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Назаров Виктор Геннадьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные материалы принтмедиаиндустрии», Московский политехнический университет, Москва, Россия, 110505n@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7243-9739>

Иванов Леонид Алексеевич – кандидат технических наук, вице-президент Российской инженерной академии, член Международной федерации журналистов, Москва, Россия, L.a.ivanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9513-8712>

Дедов Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Инновационные материалы принтмедиаиндустрии», Московский политехнический университет, Москва, Россия, dedovs55@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9636-9467>

Бокова Елена Сергеевна – доктор технических наук, профессор кафедры химии и технологии полимерных материалов и нанокмполитов, Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина, Москва, Россия, esbokova@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7769-9639>

Статник Евгений Сергеевич – аспирант, центр цифровой инженерии, Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия, eugene.statnik@skoltech.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1105-9206>

ВКЛАД АВТОРОВ

Назаров В. Г. – научное руководство, концепция исследований, составление плана экспериментальных работ, выводы статьи.

Иванов Л.А. – участие в разработке научной концепции работы, корректировка текста статьи.

Дедов А. В. – проведение экспериментальных работ, обработка результатов эксперимента, написание исходного текста.

Бокова Е.С. – участие в разработке научной программы исследований, доработка текста.

Статник Е. С. – проведение экспериментальных работ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 03.03.2023; одобрена после рецензирования 28.03.2023; принята к публикации 31.03.2023.