

УДК 628.3

DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-4-70-79

© Е. А. Корнеева, ст. преподаватель

© E. A. Korneeva, senior lecturer

© А. П. Авсюкевич, канд. техн. наук, доцент

© A. P. Avsuykevich, PhD in Sci. Tech., Associate Professor

© Д. Г. Летенко, канд. физ.-мат. наук, доцент

© D. G. Letenko, PhD in Sci. Phys.-Math., Associate Professor

(Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия)

(Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russia)

E-mail: Linka360639020@yandex.ru,

E-mail: Linka360639020@yandex.ru,

aap.spbgasu@yandex.ru, dletenko@mail.ru

aap.spbgasu@yandex.ru, dletenko@mail.ru

## ВОЛОКНИСТЫЙ ФИЛЬТР И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ СТОЧНЫХ ВОД

### FIBROUS FILTER AND EFFICIENCY OF USING IT IN WASTEWATER FILTRATION

Недорогостоящие и эффективные методы очистки сточных вод являются одной из актуальных задач современности. В данной статье исследовалась возможность применения полимерных волокнистых материалов для удаления частиц размером до 20 мкм из сточных вод. Было показано, что волокнистые полимерные материалы обладают высокой эффективностью и при этом не требуют больших затрат. В рамках исследования изучена структура волокнистого материала из полипропилена и полиэтилена, а также возможность его применения в качестве фильтрационного материала при очистке нефтесодержащих сточных вод. Полученные результаты свидетельствуют о потенциале полимерных волокнистых материалов и открывают новые перспективы для усовершенствования технологий очистки сточных вод.

*Ключевые слова:* волокнистый фильтр, полимеры, сточные воды, нефтепродукты, фильтрация.

Inexpensive and effective methods of wastewater treatment are one of the urgent challenges of our time. The paper considers the possibility of using polymeric fibrous materials to remove from wastewater particles 20 μm in size. Fibrous polymeric materials are shown to be highly effective while being inexpensive. Within the frames of the study, there has been investigated the structure of fibrous material made of polypropylene and polyethylene, as well as the possibility of applying it as a filtration material in the treatment of oily wastewater. The results obtained indicate the potential of polymer fibrous materials and open up new prospects for improving wastewater treatment technologies.

*Keywords:* fibrous filter, polymers, wastewater, petroleum products, filtration.

#### Введение

Поиск материалов и разработка новых фильтрационных устройств в настоящее время являются важной проблемой в вопросах снижения стоимости и повышения эффективности очистки стока, а также уменьшения нагрузки на сооружения последующей глубокой очистки [1–5].

Для фильтрации грубодисперсных сточных вод можно использовать различные материа-

лы: песок, гравий, уголь активированный, полимерные материалы, химические сорбенты. Выбор материала зависит от того, какие загрязнители содержатся в сточных водах и какие требования предъявляются к очистке [6–9].

К полимерным материалам, которые широко используются для фильтрации грубодисперсных сточных вод, относятся:

1) полиэтилен (ПЭ) — обладает хорошей химической стойкостью и механической

прочностью, что делает его эффективным для фильтрации сточных вод с различными загрязнителями;

2) полипропилен (ПП) — имеет высокую термическую и химическую стойкость, что позволяет использовать его для фильтрации агрессивных сточных вод;

3) полиамид (ПА) — обладает хорошей прочностью и термической устойчивостью, что делает его подходящим для фильтрации сточных вод при высоких температурах;

4) полиэфир (ПЭТ) — хорошо переносит воздействие ультрафиолетового излучения и имеет высокую механическую прочность, что делает его эффективным для использования на открытых площадках.

Данные полимерные материалы могут быть использованы как сами по себе, так и в сочетании с другими материалами для создания эффективных систем фильтрации грубодисперсных сточных вод.

Особое внимание в большинстве исследований по очистке сточных вод уделяют волокнистым фильтрационным материалам, которые конкурируют с традиционными фильтрующими материалами, такими как нетканые или мембранные. Полимеры обладают рядом преимуществ: высокая производительность и качество очистки, долговечность, устойчивость к химическим и биологическим воздействиям, гидрофобность, снижение затрат на утилизацию и эксплуатацию, возможность повторного использования материала. Они также могут применяться при высоких давлениях для фильтрации жидкостей и газов [10–16].

Во многих исследованиях отмечают следующие преимущества фильтрационных материалов из синтетических волокон: легкость, практичность, гидрофобность, быстрая регенерация, высокая степень очистки фильтрата, высокая производительность при фильтрации, износостойкость, долговечность, они не подвержены влиянию вред-

ных микроорганизмов благодаря легкому удалению с них осадочных слоев.

Таким образом, волокнистые фильтрационные материалы для очистки сточных вод обладают рядом преимуществ и способны обеспечить эффективную и надежную фильтрацию воды.

Фильтрационные материалы из полиэтиленовых и полипропиленовых волокон предпочтительны из-за своей экологической чистоты — при их производстве используется минимальное количество химических добавок и обработок, что снижает риск выброса вредных веществ в окружающую среду. Полиэтилен и полипропилен являются материалами, подходящими для повторной переработки, что способствует сокращению отходов.

В настоящее время достаточно актуальна тема изучения и внедрения новых фильтрационных материалов для улучшения систем очистки сточных вод. Одной из важных задач является исследование эффективности новых волокнистых полимерных материалов, предназначенных для фильтрации сточных вод.

#### Методы

В рамках данного исследования был создан фильтр из полимерного волокнистого материала для использования его в системе очистки сточных вод.

Фильтрующий слой представляет собой волокнистую структуру из полипропилена. Выбор данного вида материала является наиболее рациональным для очистки сточных вод в связи с его подходящими физико-химическими свойствами. Так как фильтрующий слой имеет тонковолокнистую структуру с большим количеством плотно намотанных слоев и не держит форму, следует предусмотреть поддерживающие слои.

Таким образом, исследуемый фильтр (рис. 1) был изготовлен из трех слоев разных видов полимеров. Два слоя выполнены из полиэтилена — верхний и нижний слои,

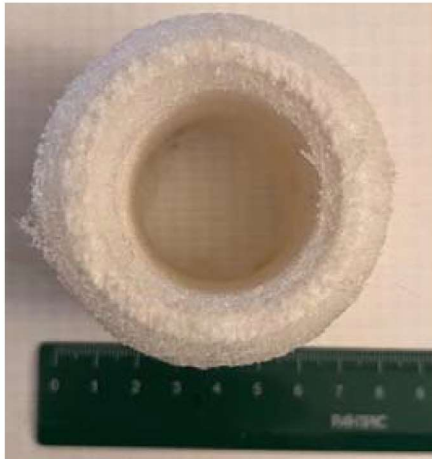


Рис. 1. Трехслойный фильтр из полипропилена и полиэтилена в разрезе



Рис. 2. Микроскоп Tescan VEGA 3 SBH

размер которых варьируется от 5 до 5,8 мм каждый. Данные слои являются поддерживающими и выполняют функцию грубой очистки. Средний слой выполнен из полипропилена, он плотный, толщина колеблется от 4,6 до 5,2 мм.

Для основательного изучения процессов работы фильтра были проведены исследования структуры материала на базе лаборатории СПбГАСУ на сканирующем электронном микроскопе Tescan VEGA 3 SBH (рис. 2).

Микроскоп управляется через персональный компьютер с энергодисперсионной при-

ставкой для элементного микроанализа и вакуумирования образцов. Для изучения были взяты кусочки каждого слоя  $7 \times 5$  мм. В результате исследования проанализированы свойства и структура слоев фильтра.

В рамках исследования проводились опыты с распределением частиц в модельных растворах, а также на пробах стока до и после прохождения фильтра. Работа осуществлялась на комплексном оборудовании для исследования субмикросистем Maivern Zetasizer Nano ZSP (рис. 3).

Лазерный анализатор характеристик частиц субмикронного и нано-диапазона пред-

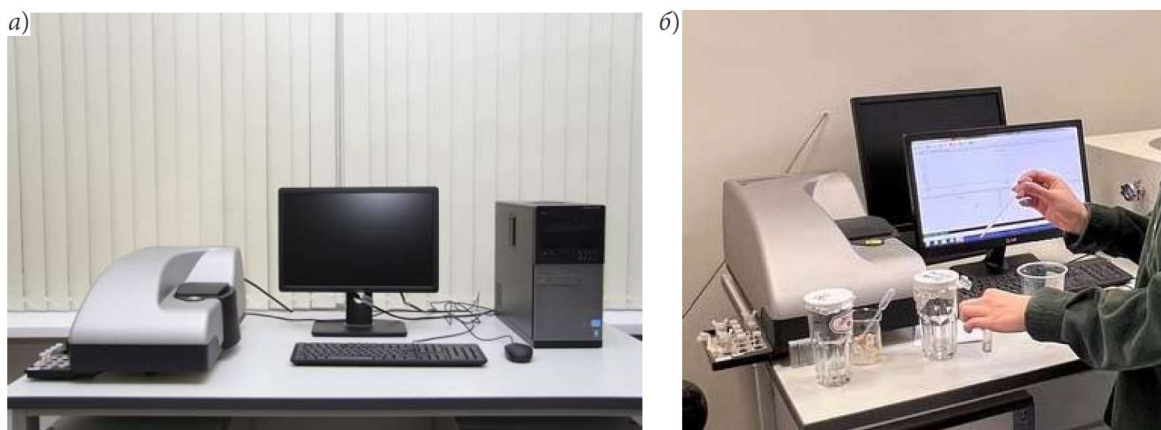


Рис. 3. Комплексное оборудование для исследования субмикросистем Maivern Zetasizer Nano ZSP: а — Maivern Zetasizer Nano ZSP; б — анализ пробы

назначен для определения размеров частиц, дзета-потенциала и молекулярной массы, макромолекул и молекулярных соединений в жидких средах. В ходе исследования были оценены пробы модельных и реальных жидкостей до и после прохождения фильтрации через полимерный материал.

Для уточнения пропускной способности материала было проведено исследование дисперсности частиц в модельных растворах до и после фильтрации. В исследовании был использован оптический бинокулярный микроскоп Leiz (рис. 4). Микроскоп оснащен электронным измерительным блоком и возможностью фотофиксации, что позволяет проводить исследования структуры материалов при увеличении от 32 до 1200 раз.

#### Результаты

Изучаемый фильтр имеет волокнистую структуру из двух видов материала. Фильтрующий слой образован относительно равномерно распределенными тонкими волокнами. Наружный слой (рис. 5) имеет волокнистую структуру с толщиной волокон от 131 до 1366 мкм и расстоянием между волокнами от 0,2 мм до 2 мм.

Средний слой (рис. 6) имеет волокнистую плотную структуру с толщиной волокон от



Рис. 4. Оптический бинокулярный микроскоп Leiz

24 до 275 мкм и расстоянием между волокнами от 15 мкм до 500 мкм.

Третий, нижний слой (рис. 7) имеет волокнистую запекающуюся структуру с толщиной волокон от 231 до 485 мкм и расстоянием между волокнами от 150 мкм до 563 мкм.

Свойства полипропиленовых волокон и нитей включают высокую устойчивость

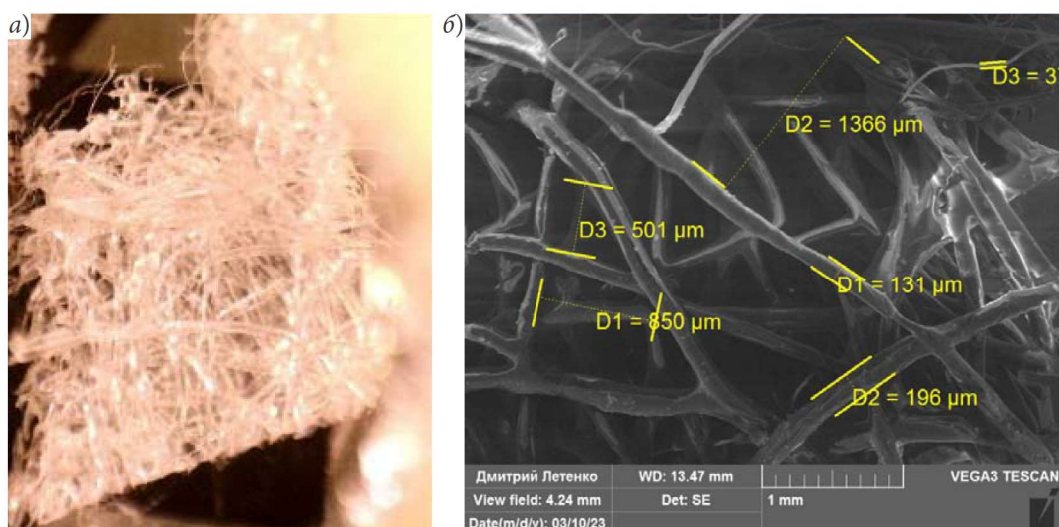


Рис. 5. Наружный слой большого диаметра полимерного волокнистого фильтра: а — образец в оптическом микроскопе; б — образец в электронном микроскопе

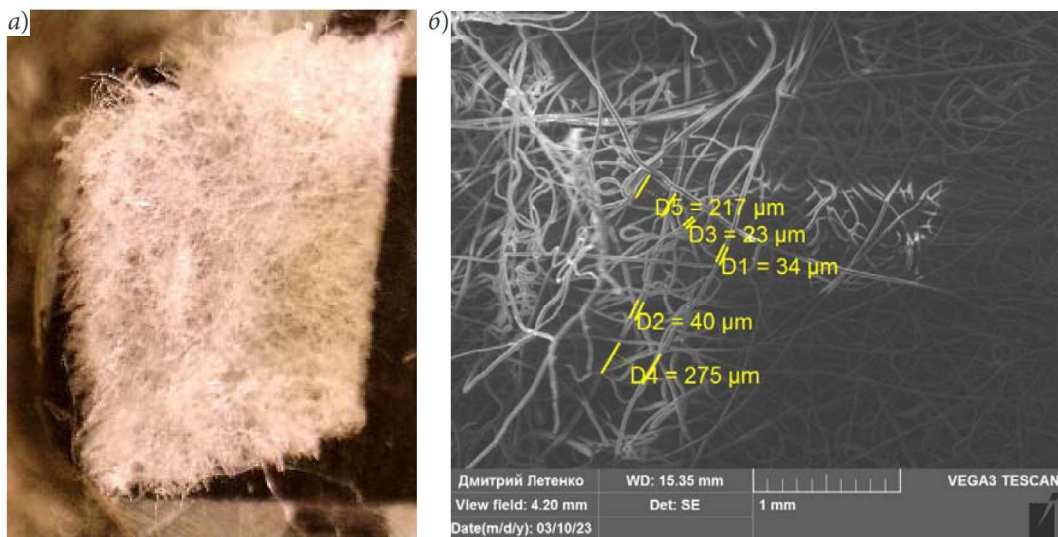


Рис. 6. Внутренний слой волокнистого полимерного фильтра: а — образец в оптическом микроскопе; б — образец в электронном микроскопе

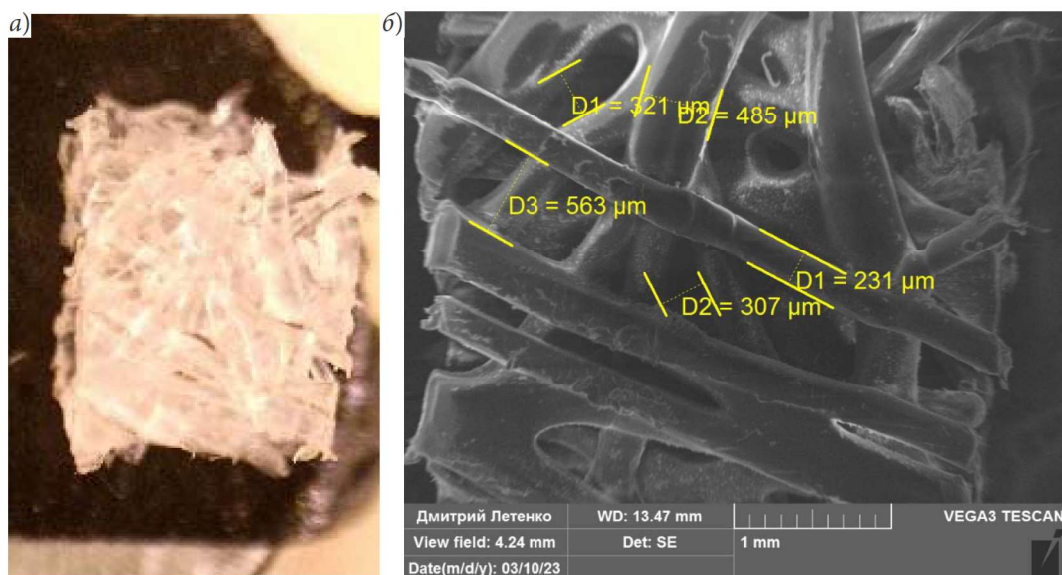


Рис. 7. Наружный (нижний) слой меньшего диаметра полимерного волокнистого фильтра: а — образец в оптическом микроскопе; б — образец в электронном микроскопе

к износу как в сухом, так и во влажном состоянии, материал не впитывает влагу, поэтому сохраняет свою эффективность даже при работе с влажными средами, что помогает предотвращать забивание фильтра и улучшает процесс очистки воды, обладает устойчивостью к агрессивным средам.

Полиэтиленовые волокна отличаются высокой упругостью и низкой способностью

впитывать влагу. Во влажном состоянии их механические свойства (прочность, растяжимость, сминаемость) практически не меняются. Это позволяет получать из полиэтиленовых волокон изделия, хорошо сохраняющие форму, что, в свою очередь, обосновывает выбор материала.

В результате анализа структуры фильтра видно, что внешние слои имеют схожую

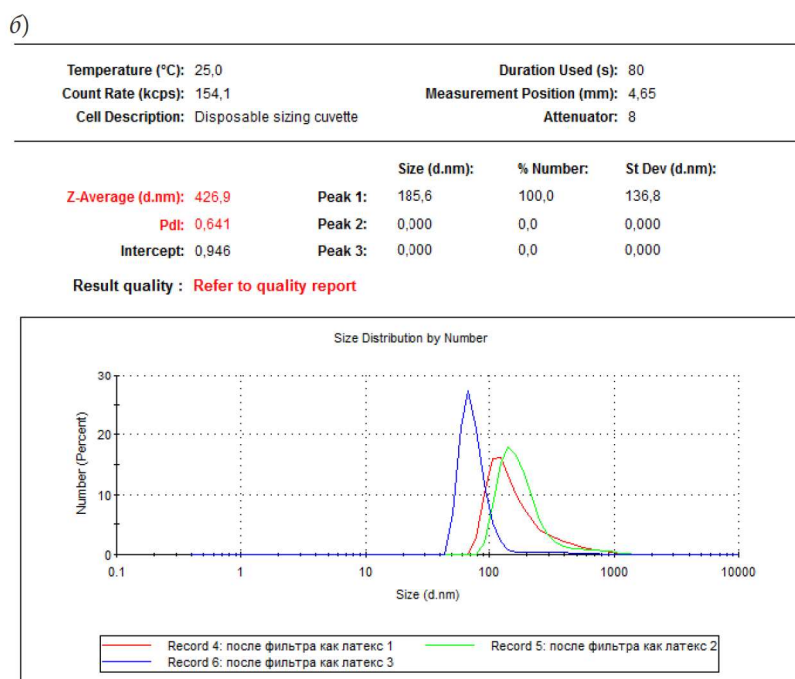
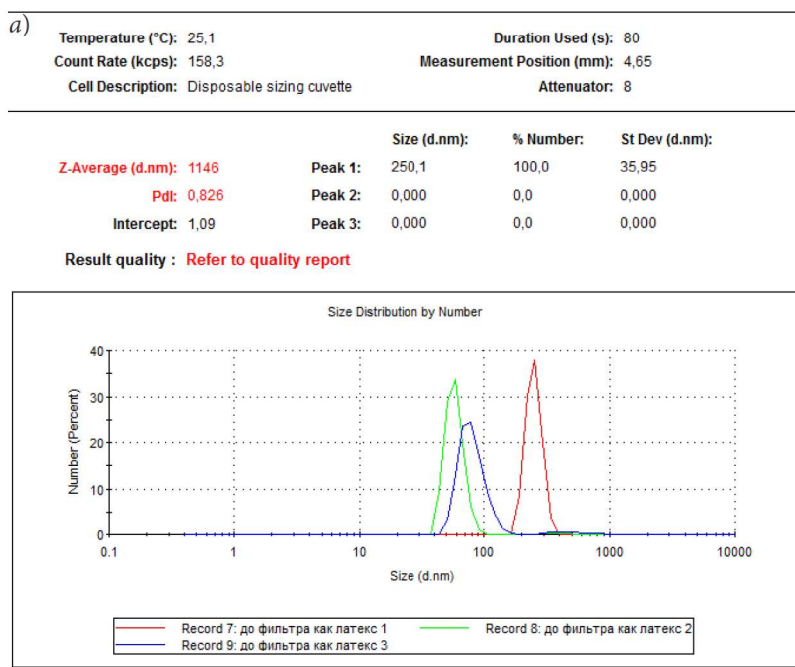


Рис. 8. Распределение частиц модельного раствора с нефтепродуктами:  
 а — до фильтрации; б — после фильтрации

структуру и один материал, но нижний слой имеет меньшее расстояние между волокнами и более плотную структуру. Средний слой имеет тонковолокнистую структуру с большим количеством плотно намотанного волокнистого материала, он мягкий и не держит

форму. Таким образом, внешние слои выполняют функцию каркаса и предотвращают попадание крупных частиц на средний слой.

На рис. 8–10 показаны результаты исследований, проведенных на лазерном анализаторе характеристик частиц суб-

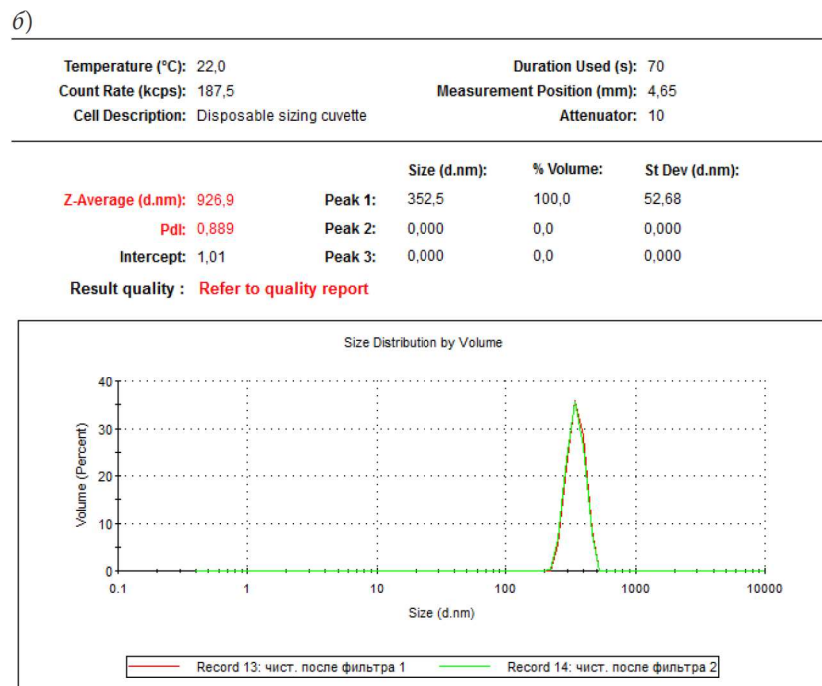
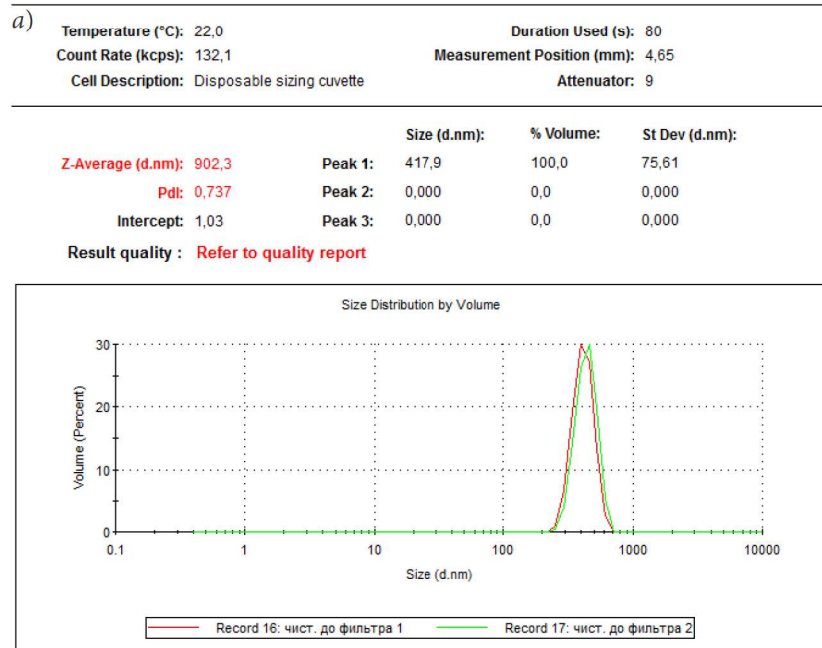


Рис. 9. Распределение частиц водопроводной воды: а — до фильтрации; б — после фильтрации

микронного и нано-диапазона, предназначенного для определения распределения частиц в соответствии с исследуемыми концентрациями растворов до и после прохождения фильтрации на полимерном фильтре.

Показательной величиной является значение аттенюатора, которое с повышением качества образца увеличивается с 8 до 10 единиц, что говорит об эффективности фильтрации и снижении количества распределения в объеме крупных частиц.

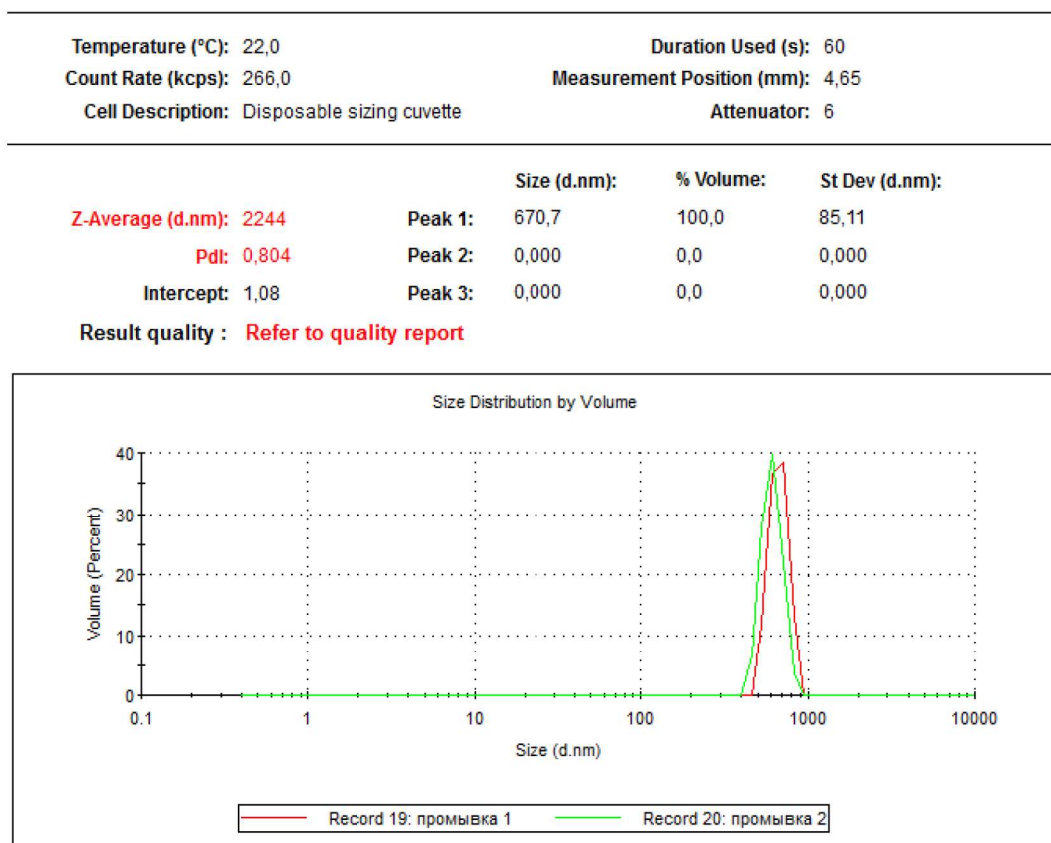


Рис. 10. Промывная вода после работы с модельным раствором, включающим нефтепродукты

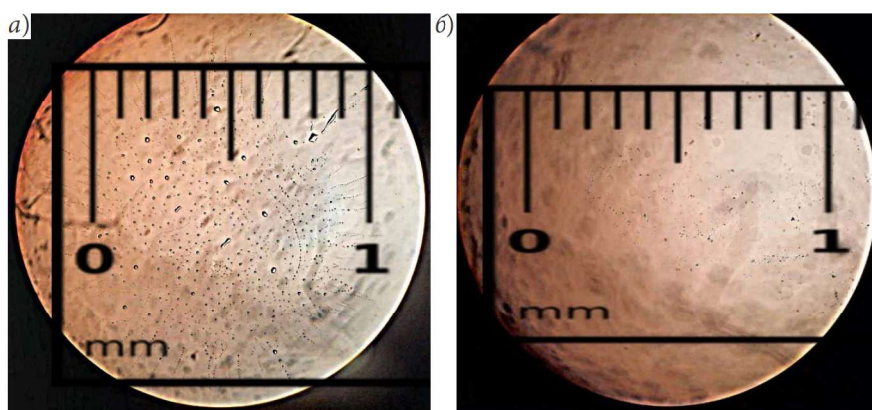


Рис. 11. Микроскопическое исследование модельного раствора:  
*a* — до фильтрации; *б* — после фильтрации

Рассмотрев пиковые точки до и после прохождения фильтрации, можем отметить, что размер частиц в световом поле заметно уменьшается, т. е. можно судить об эффективности использования фильтра в системе очистки сточных вод, но для обоснования

и повсеместного использования требуются уточняющие исследования.

В результате изучения дисперсности частиц на оптическом микроскопе были получены положительные данные. На фото (рис. 11) представлены размеры эмульсий



нефтепродуктов модельного раствора до и после фильтрации.

На рис. 11, *а* слева указан снимок модельного раствора до фильтрации, где видны эмульсионные пленки размером 10–50 мкм; на рис. 11, *б* — 1–20 мкм, что говорит о приближенных значениях, соответствующих микрофильтрации.

### Выводы

В рамках проведенного научного исследования можно сделать вывод, что выбранные полимерные материалы могут быть применимы в системах очистки сточных вод.

По результатам исследования предлагаемых материалов полимерного фильтра были получены положительные результаты, которые могут быть применены для очистки грубодисперсных и нефтесодержащих сточных вод. Качество очистки по дисперсности достигает до 20 мкм, что сопоставимо с микрофильтрацией. Данный показатель позволяет конкурировать с другими фильтрующими материалами и устройствами.

Дальнейшие исследования направлены на более детальное изучение характеристик полимерного фильтра.

### Библиографический список

1. Wang L. K., Wang M. H. S., Shammas N. K., and Aulenbach D. B. Environmental flotation engineering, Wang, Springer Nature Switzerland, 2021. № 8. 433 p. Best Water Treatment Book of All Time” (Rated and honored by the BookAuthority in 2022).
2. Косинцев В. И., Сечин А. И., Бордунов С. В. и др. Фильтрационная очистка сточных вод // Современные наукоемкие технологии. 2008. № 4. С. 60–62.
3. Буря А. И., Кудина Е. Ф. Вода — свойства, проблемы и методы очистки: монография. Днепропетровск: Пороги, 2006. 520 с.
4. Pinchuk L. S., Goldade V. A, Makarevich A. V., Kestelman V. N. Melt Blowing: Equipment, Technology and Polymer Fibrous Materials. Berlin: Springer, 2002. 212 p.
5. Van Turnhout J. Thermally stimulated discharge of polymer electrets. Amsterdam: Elsevier Publ. Co., 1975. 335 p.
6. Герасимов В. М. Волокнистые и пленочные материалы в технологиях горного производства. Чита: ЧитГУ, 1998. 91 с.
7. Пат. № RU 2 527 097 С2 Российская Федерация, МПК D01F 1/10(2006.01), D01F 1/02(2006.01), B01D 39/16(2006.01), D01F 6/44(2006.01), D01F 6/94(2006.01), D01D 5/00(2006.01). Способ получения ультратонких полимерных волокон: № 2012153889/05 : заявл. 2012.12.13: опубл. 2014.08.27/ Симонов-Емельянов И. Д., Филатов Ю. Н., Петров А. В.; заявитель МИТХТ им. М.В. Ломоносова. 5 с.
8. Zhang L., Zhou J. W., Zhang B., et al. Semi-analytical and computational investigation of different fibrous structures affecting the performance of fibrous media. Sci Prog 2020; 103: 1–25.
9. Горожанкина Г. И., Пинчукова Л. И. Сорбенты для сбора нефти: сравнительные характеристики и особенности применения // Трубопроводный транспорт нефти. 2000. № 4. С. 12–17.
10. Сандуляк А. В. Магнито-фильтрационная очистка жидкостей и газов. Львов: Вища школа, 1984. 167 с.
11. Бордунов В. В., Коваль Е. О., Соболев И. А. Полимерные волокнистые сорбенты для сбора нефти // Нефтегазовые технологии. 2000. № 6. С. 30–31.
12. Kutchin A., Demin V., Shubnitsina E., Sazonov M. Protection of ground and water areas with use natural adsorbents. London: Thomas Telford, 2000. 1486 p.
13. Пат. № RU 2 158 177 С1 Российская Федерация, МПК B01J 20/26(2006.01), B01J 20/24(2006.01). Сорбционно-активный материал для очистки воды от нефтепродуктов: № 99116124/12 : заявл. 19.07.1999 : опубл. 27.10.2000 / Ананьева Т. А. ; заявитель Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна. 8 с.
14. Плевачук В. Г., Макаревич А. В., Паркалова Е. И. и др. Структурные и адсорбционные характеристики нетканых волокнистых полимерных фильтрующих материалов, полученных методом пневмоэкструзии // Химические волокна. 1997. № 1. С. 31–34.
15. Пат. № RU 2 324 523 С2 Российская Федерация, МПК B01D 39/16(2006.01). Способ получения волокнистого композиционного материала с высокой остаточной магнитной индукцией: № 2006117603/15 : заявл. 22.05.2006 : опубл. 20.05.2008 / Кравцов А. Г.; заявитель Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси. 8 с.
16. Пат. № RU 2 732 273 С1 Российская Федерация, МПК B01D 39/16(2006.01), D01F 1/00(2006.01), D01F 6/94(2006.01). Фильтрующий материал для тонкой очистки масел и топлив, способ его получения и применение: № 2019129461 : заявл. 18.09.2019 : опубл. 14.09.2020 / Смутьская М. А., Филатов И. Ю., Капустин И. А. ; заявитель ООО «ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ». 10 с.

## References

1. Wang L. K., Wang M. H. S., Shammas N. K., Aulenbach D. B. *Environmental flotation engineering*, Switzerland, Springer Nature Publ., 2021, no. 8, 433 p.
2. Kosintsev V. I., et al. *Fil'tratsionnaya ochildka stochnykh vod* [Filtration wastewater treatment]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii – Modern Science-Intensive Technologies*, 2008, no. 4, pp. 60–62.
3. Burya A. I., Kudina E. F. *Voda — svoystva, problemy i metody ochildki* [Water: properties, problems and methods of purification]. Dnepropetrovsk, Porogi Publ., 2006, 520 p.
4. Pinchuk L. S., Goldade V. A., Makarevich A. V., Kestelman V. N. *Melt Blowing*. In: *Equipment, Technology and Polymer Fibrous Materials*. Berlin, Springer Publ., 2002, 212 p.
5. Van Turnhout J. *Thermally stimulated discharge of polymer electrets*. Amsterdam, Elsevier Publ. Co., 1975, 335 p.
6. Gerasimov V. M. *Voloknistye i plnochnye materialy v tekhnologiyakh gornogo proizvodstva* [Fiber and film materials in technologies of mining production]. Chita, ChitGU Publ., 1998, 91 p.
7. Simonov-Emel'yanov I. D., Filatov Yu. N., Petrov A. V. *Sposob polucheniya ul'tratonkikh polimernykh volokon* [Method of producing ultra-thin polymer fibers]. Patent RF, no. 2527097, 2014.
8. Zhang L., et al. Semi-analytical and computational investigation of different fibrous structures affecting the performance of fibrous media. *Sci Prog*, 2020, no. 103, pp. 1–25.
9. Gorozhankina G. I., Pinchukova L. I. *Sorbenty dlya sbora nefti: sravnitel'nye kharakteristiki i osobennosti primeneniya* [Sorbents for oil collection: comparative characteristics and features of application]. *Truboprovodniy transport nefti – Pipeline Oil Transportation*, 2000, no. 4, pp. 12–17.
10. Sandulyak A. V. *Magnito-fil'tratsionnaya ochildka zhidkostey i gazov* [Magneto-filtration purification of liquids and gases]. Lvov, Vishcha shkola Publ., 1984, 167 p.
11. Bordunov V. V., Koval' E. O., Sobolev I. A. *Polimernye voloknistye sorbenty dlya sbora nefti* [Polymeric fiber sorbents for oil collection]. *Neftegazovye tekhnologii – Oil and Gas Technologies*, 2000, no. 6, pp. 30–31.
12. Kutchin A., Demin V., Shubnitsina E., Sazonov M. *Protection of ground and water areas with use natural adsorbents*. London, Thomas Telford Publ., 2000, 1486 p.
13. Anan'eva T. A. *Sorbtsionno-aktivniy material dlya ochildki vody ot nefteproduktov* [Sorbent-active material for water purification from oil products]. Patent RF, no. 2158177, 2000.
14. Plevachuk V. G., et al. *Strukturnye i adsorbtsionnye kharakteristiki netkanykh voloknistykh polimernykh fil'truyushchikh materialov, poluchennykh metodom pnevmoekestuzii* [Structural and adsorption characteristics of nonwoven fiber polymeric filtering materials produced by pneumatic extrusion]. *Khimicheskie volokna – Chemical Fibers*, 1997, no. 1, pp. 31–34.
15. Kravtsov A. G. *Sposob polucheniya voloknistogo kompozitsionnogo materiala s vysokoy ostatochnoy magnitnoy induktsiey* [Method of producing fiber composite material with a high residual magnetic induction]. Patent RF, no. 2324523, 2008. 8 p.
16. Smul'skaya M. A., Filatov I. Yu., Kapustin I. A. *Fil'truyushchiy material dlya tonkoy ochildki masel i topliv, sposob ego polucheniya i primeneniya* [Filtering material for fine purification of oils and fuels, method of production and usage]. Patent RF, no. 2732273, 2020.