

УДК 66.081.6

DOI 10.47367/0021-3497\_2023\_6\_163

## МОДИФИЦИРОВАННОЕ НЕТКАНОЕ ФИЛЬТРУЮЩЕЕ ПОЛОТНО НА ОСНОВЕ ПЭТФ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДЫ\*

### MODIFIED NON-WOVEN FILTER FABRIC BASED ON PET FOR WATER PURIFICATION

Е.С. ДМИТРИЕВА, А.П. НЕБЕССКАЯ, Е.А. ГРУШЕВЕНКО, Т.С. АНОХИНА, А.В. ВОЛКОВ  
E.S. DMITRIEVA, A.P. NEBESSKAYA, E.A. GRUSHEVENKO, T.S. ANOKHINA, A.V. VOLKOV

(ИНХС РАН им. А.В. Топчиева)

(A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis RAS)

E-mail: tsanokhina@ips.ac.ru

*Загрязнение вод является большой проблемой современности. Для ее решения авторами разработаны модифицированные фильтры на основе нетканого полотна из полиэтилентерефталата (ПЭТФ). В качестве модификатора использовали природный полимер альгинат, сшитый катионами II и III валентных металлов. Альгинаты повышают гидрофильность ПЭТФ, что положительно сказывается на устойчивости мембран к загрязнениям маслами. Фильтры показали свою устойчивость к воздействию органических растворителей. Это открывает большие возможности применения разработанных мембран при фильтрации реальных водных стоков, сложных по своему составу. Модификация альгинатом позволяет существенно увеличить задерживающую способность нетканого фильтрующего полотна. Показано, что сшивающий катион модификатора вносит определяющий вклад в фильтрующую способность полотна. Так, в ряду полотен, модифицированных альгинатом  $\text{Cu}^{2+}$  -  $\text{Al}^{3+}$  -  $\text{Ca}^{2+}$  -  $\text{Fe}^{3+}$ , селективность по красителю Remazol Brilliant Blue R возрастает от 18 до 88%. Сравнительная фильтрация антибиотика цефтриаксона через ПЭТФ полотно и полотно, модифицированное альгинатом железа, показала, что задерживающая способность возрастает с 5% до 69%.*

---

\*Результаты получены при финансовой поддержке Минобрнауки России. Проект 13.2251.21.0166 (идентификатор проекта RF---2251.61322X0044). Соглашение МНТС БРИКС 075-15-2022-1218.

*Water pollution is a big problem of our time. To solve this problem, the authors have developed modified filters based on non-woven fabric made of polyethylene terephthalate (PET). The natural polymer alginate cross-linked with cations of II and III valence metals was used as a modifier. Alginates increase the hydrophilicity of PET, which has a positive effect on the resistance of membranes to contamination with oils. The filters have shown their resistance to organic solvents. It opens up great opportunities for the developed membranes when filtering real water wastes with complex composition. Modification with alginate can significantly increase the retention capacity of a non-woven filter fabric. It has been shown that the cross-linking cation of the modifier makes a decisive contribution to the filtering ability of the fabric. In a series of fabrics modified with alginate  $Cu^{2+}$  -  $Al^{3+}$  -  $Ca^{2+}$  -  $Fe^{3+}$ , selectivity for the model dye Remazol Brilliant Blue R increases from 18 to 89%. Based on comparative filtration of the antibiotic ceftriaxone through PET fabric and fabric modified with iron alginate, it was shown that the retention capacity increases from 5% to 69%.*

**Ключевые слова:** полиэтилентерефталат, фильтрующее полотно, нанофильтрация, антибиотики, модификация, инверсия фаз, альгинат.

**Keywords:** polyethylene terephthalate, fabric filter, nanofiltration, antibiotics, modification, phase inversion, alginate.

Одной из основных проблем настоящего времени является загрязнение природных вод. Особенно остро этот вопрос стоит в связи с локальной недостаточностью водных ресурсов. Большой вклад в загрязнение природных вод вносит промышленность, в том числе текстильные предприятия. Так, на производство 1 кг ткани затрачивается примерно 100-200 кг воды [1] в зависимости от ее типа. Например, на производство х/б ткани затрачивается более чем в 2 раза больше воды, чем на акриловые ткани [2]. Известно, что в состав сточных вод текстильных предприятий входят щелочи, кислоты, органические растворители, поверхностно-активные вещества, нефтепродукты и красители [3]. Примерно тот же качественный состав имеют сточные воды многих других типов производств [4]. Отличия заключаются лишь в концентрации отдельных компонентов.

Особым составом обладают стоки фармацевтических и пищевых производств,

отходы рыбоводства, животноводства, медицинских учреждений, бытовые стоки [5, 6]. В них появляется еще один компонент – антибиотики [7-9], представляющие особую опасность для человечества [10-11]. Данная проблема актуальна для всего мира. Это подтверждают исследования состояния окружающей среды в разных странах и регионах [12-14]. Массовое и неконтролируемое использование антибиотиков приводит к катастрофам не только в сфере экологии, но и в сферах фармацевтики и здравоохранения [15-18]. Главная опасность загрязнения окружающей среды антибиотиками заключается в появлении резистентности у микроорганизмов (табл. 1). В связи с этим «старые» антибиотики становятся непригодными для лечения, и фармацевтика вынуждена находиться в постоянном поиске новых лекарств.

Т а б л и ц а 1

| Антибиотик  | Год открытия | Резистентные микроорганизмы | Год появления резистентности |
|-------------|--------------|-----------------------------|------------------------------|
| Пенициллин  | 1928         | Стафилококки                | 1940                         |
|             |              | Пневмококки                 | 1965                         |
| Тетрациклин | 1950         | Шигеллы                     | 1959                         |
| Эритромицин | 1953         | Стрептококки                | 1968                         |
| Метициллин  | 1960         | Стафилококки                | 1962                         |

|               |      |  |      |
|---------------|------|--|------|
| Гентамицин    | 1967 | Энтерококки                                | 1979 |
| Ванкомицин    | 1972 | Энтерококки                                | 1988 |
|               |      | Стафилококки                               | 2002 |
| Цефтриаксон   | 1982 | Гонококки ( <i>Neisseria gonorrhoeae</i> ) | 2009 |
| Имипенем      | 1985 | Энтеробактерии                             | 1998 |
| Цефтазидим    | 1985 | Энтеробактерии                             | 1987 |
| Левифлоксацин | 1996 | Пневмококки                                | 1996 |
| Линезолид     | 2000 | Стафилококки                               | 2001 |
| Цефтаролин    | 2010 | Стафилококки                               | 2011 |

Таким образом, здоровье и жизнь человечества зависит от разработки эффективных методов очистки сточных вод от загрязнителей различных типов. Очистка сточных вод может осуществляться с помощью коагуляции-флокуляции [19, 20], фотокаталитической деградации [21], адсорбции [22, 23], ультразвукового облучения [24], биологической очистки [25-29], физической очистки, например, под действием центробежных сил [30]. Данные методы часто предполагают использование дополнительных реагентов. Это создает дополнительную нагрузку на этапе утилизации образующегося ила и обуславливает высокую стоимость процесса [31].

Хорошей альтернативой данным методам являются фильтрационные, в том числе баромембранные, процессы [32]. Они не требуют реагентов, отличаются низкими энергетическими затратами, нечувствительны к условиям окружающей среды. К баромембранным процессам относятся микрофильтрация (МФ), ультрафильтрация (УФ), нанофильтрация (НФ) и обратный осмос (ОО) [31, 33].

Сложный состав сточных вод, часто включающий в себя органические растворители, накладывает дополнительные ограничения при выборе материалов фильтров. Химическая устойчивость является одним из ключевых требований к фильтрующему полотну (мембране) наряду с высокими разделительными и транспортными характеристиками, а также невысокой стоимостью. В связи с этим большое внимание обращают на себя недорогие промышленные полимеры, устойчивые в большинстве органических растворителей.

К примеру, полиэтилентерефталат (ПЭТФ) является устойчивым к воздействию многих, в том числе и агрессивных,

органических растворителей [34, 35]. Наиболее известными исключениями из списка растворителей являются аминоспирты, с которыми полиэтилентерефталат реагирует с образованием более низкомолекулярных продуктов [36], а также спирты, способствующие гидролизу ПЭТФ в щелочной среде [37]. С точки зрения переработки полимерных отходов такая химическая устойчивость является большим недостатком полимера, но в мембранной технологии – большим преимуществом. Так, благодаря устойчивости к воздействию большинства органических растворителей ПЭТФ является перспективным полимером для изготовления волокнистых фильтрационных мембран, в том числе и для решения проблем очистки сточных вод с текстильных предприятий или выделения антибиотиков.

ПЭТФ уже хорошо известен в качестве мембранного полимера [38]. Полиэтилентерефталат используют в мембранной дистилляции [39], в фильтрационных процессах для разделения газовых сред [40, 41] и водоочистки [42]. ПЭТФ зарекомендовал себя в процессах микро- (МФ) и ультрафильтрации (УФ) для антимикробной очистки воды [43] и при разделении водонефтяных эмульсий [44, 45, 46]. К сожалению, ПЭТФ в чистом виде не всегда может обеспечить необходимый уровень селективности или быстро подвергается загрязнению, в связи с чем мембранные свойства резко ухудшаются. Для повышения фильтрационных и эксплуатационных характеристик иногда прибегают к модификации ПЭТФ. Для повышения устойчивости к загрязнению используют гидрофилизацию ПЭТФ, например, с помощью акриловой кислоты [47]. Для увеличения селективности в работе [48] ав-

торы использовали оксиды цинка и железа. Разработанная ими мембрана показала высокую эффективность при удалении ионов тяжелых металлов из водных стоков. Для аналогичных целей использовали ПЭТФ мембрану, модифицированную хитозаном [49] и цеолитом [50]. Эти работы очень важны и демонстрируют возможность применения ПЭТФ не только для очистки воды от крупных загрязнителей в МФ и УФ процессах, но и для более тонкой нанофильтрационной очистки, что актуально для удаления красителей из сточных вод текстильных предприятий или для удаления антибиотиков.

В литературе в качестве модификаторов ПЭТФ известны гидрогели, в частности поли(N-изопропилакриламид) [51]. «Зеленые» технологии, которые актуальны в последнее время [52], требуют замены синтетических материалов на природные. Среди них широко известны хитозан и целлюлоза [53]. Перспективным природным [54] гидрогелем [55] для модификации ПЭТФ является сшитый катионами металлов альгинат. Гидрофильное альгинатное покрытие позволит увеличить устойчивость мембраны к загрязнениям. Фильтры на основе солей альгината давно применяются в нанофильтрационных процессах [56, 57, 58]. Важно, что альгинат – недорогой полимер, который добывается не только за рубежом, но и в России [59] и производится Очаковским комбинатом пищевых ингредиентов и Архангельским опытно-водорослевым комбинатом.

Таким образом, целью данной работы становится модификация нетканого фильтрующего полотна ПЭТФ солями альгината для повышения эффективности нанофильтрационной очистки сточных вод от красителей и антибиотиков.

#### Методы

В качестве мембранных фильтров использовали нетканое полотно ПЭТФ (Crane Technical Materials, США). Плотность нетканого полотна  $87 \text{ г/м}^2$ , толщина  $90\text{--}99 \text{ мкм}$ , воздухопроницаемость  $16,0\text{--}29,6 \text{ см}^3 \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{кПа}^{-1}$ .

Модификацию ПЭТФ осуществляли методом нанесения на его поверхность тонкого слоя из сшитого солями II и III ва-

лентных металлов альгината. Для этого модификатор (альгинат натрия – Alg (Rhône-Poulenc, Франция)) растворяли в дистиллированной воде в концентрации 10% масс. до образования однородного геля. На поверхности ПЭТФ ракельным ножом с зазором 0,2 мм формовали тонкий слой и сшивали его 0,35 моль-экв/л водными растворами неорганических солей на протяжении 30 минут (рис. 1). Для сшивки модификатора использовали неорганические соли (Химмед, Россия):  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ . После сшивки мембранные фильтры дважды промывались дистиллированной водой в течение 10 минут, после чего подвергались испытаниям. При необходимости хранения мембранные фильтры помещали в дистиллированную воду. Для удобства введены условные обозначения фильтрующих полотен в зависимости от наличия модификации и сшивающего катиона модификатора: ПЭТФ, ПЭТФ-CaAlg, ПЭТФ-AlAlg, ПЭТФ-FeAlg, ПЭТФ-ZnAlg, ПЭТФ-CuAlg.

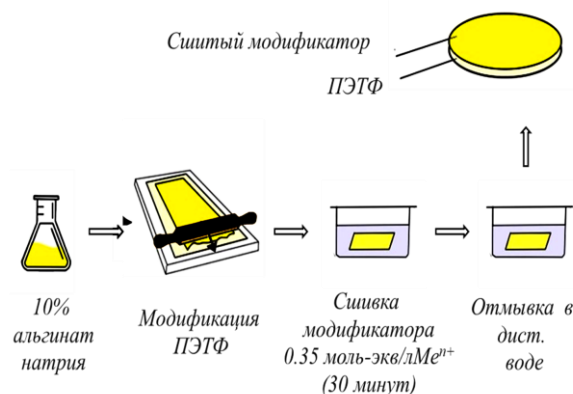


Рис. 1

Для исследования разделительных свойств мембранных фильтров применяли модельный краситель Remazol Brilliant Blue R (626 г/моль) производства Sigma Aldrich (Германия). С одной стороны, он моделирует компоненты сточных вод текстильной промышленности. С другой стороны, он близок по своей молекулярной массе ко многим антибиотикам. Также для оценки селективности мембранных фильтров использовали антибиотик цефтриак-

сон (555 г/моль) производства ОАО "Синтез" (Россия). Склонность к загрязнению оценивали с помощью химически чистого хлороформа производства Химмед-Синтез (Россия).

Гидрофильность поверхности фильтрующего полотна определяли путем измерения краевого угла смачивания с помощью гониометра ЛК-1 производства компании «ООО НПК «Открытая наука» (Россия) методом лежащей капли.

Для исследования устойчивости мембранных фильтров к органическим растворителям использовали этанол (Химмед, Россия), N-метилпирролидон – НМП (ACROS, Бельгия) и диметилформамид – ДМФ (Химмед, Россия). Исследования устойчивости к органическим растворителям проводили методом сорбционного эксперимента. Для измерения сорбции образцы мембранных фильтров помещали в выбранные растворители на несколько суток, предварительно измерив их массу. Ежедневно измеряли массу образцов после удаления с их поверхности избытка растворителя с помощью фильтровальной бумаги. Измерения останавливали в тот момент, когда характеристики мембранных фильтров на протяжении двух дней не изменялись. Для измерения сорбции использовали отдельно ПЭТФ и слой модификатора, снятый с мембранного фильтра. Расчет сорбции проводили по формуле:

$$K_s = \frac{m_1 - m_0}{m_0}, \quad (1)$$

где  $K_s$  – сорбция растворителя в полимерный материал, г/г;  $m_1$  – масса полимера после сорбции;  $m_0$  – масса полимера до сорбции.

Устойчивость к загрязнению маслами определяли с помощью хлороформа. Для этого на дно сосуда погружали исследуемый образец мембранного фильтра и заливали его водой. С помощью медицинского шприца на поверхность образца наносили каплю хлороформа ( $\rho = 1,49 \text{ г/см}^3$ ) и оценивали подводный контактный угол смачивания.

Для характеристики мембранных фильтров использован метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). СЭМ прово-

дилась на установке Thermo Fisher Phenom XLG2 Desktop SEM (США). Сколы мембран получали после предварительной пропитки мембран в изопропанол и последующего разламывания их в среде жидкого азота. С помощью настольного магнетронного напылителя Cressington 108 auto Sputter Coater (Великобритания) на подготовленные образцы в вакуумной камере ( $\sim 0,01$  мбар) наносился тонкий (5-10 нм) слой золота. Ускоряющее напряжение при съемке микрофотографий составляло 15 кэВ.

ИК-спектры ПЭТФ регистрировались в режиме отражения НПВО на ИК-микроскопе HYPERION-2000, сопряженном с Фурье-спектрометром IFS-66v/s-Bruker (скан. -50, кристалл Ge, разрешение  $2 \text{ см}^{-1}$ , диапазон  $600-4000 \text{ см}^{-1}$ ).

Для исследования нанофильтрационных свойств мембранных фильтров использованы ячейки тупикового типа. Диаметр мембран составлял 58 мм. Давление 20 атм нагнеталось гелием. Смесь, находящаяся в ячейках, постоянно перемешивалась магнитными мешалками для обеспечения равномерной концентрации веществ в растворах. Поток пермеата определяли весовым методом.

Поток выходящего пермеата отбирался в приемник жидкости. При этом измерялась масса пустого приемника и масса приемника с жидкостью. Производительность мембранных фильтров характеризовалась проницаемостью жидкости (P), которую рассчитывали по формуле:

$$P = \frac{m}{S \Delta t \Delta p}, \quad (2)$$

где  $m$  – масса пермеата, кг, прошедшего через мембранный фильтр с площадью  $S$ ,  $\text{м}^2$ , за промежуток времени  $\Delta t$ , ч;  $\Delta p$  – перепад давления.

Разделительные свойства мембранных фильтров исследовали с помощью растворов Remazol Brilliant Blue R с концентрацией 100 мг/л, а также раствора антибиотика цефтриаксон концентрацией 300 мг/л. Разделительные свойства определены путем измерения оптической плотности растворов на спектрофотометре ПЭ-5400УФ

(ПромЭкоЛаб). По градуировочной кривой вычислялись концентрации модельных задерживаемых веществ, красителей в питающем растворе и пермеате, после чего рассчитывался коэффициент задержания R (%), используемый для оценки разделительных свойств, по формуле:

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_{f0}} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где  $C_{f0}$  и  $C_p$  – концентрация растворенного

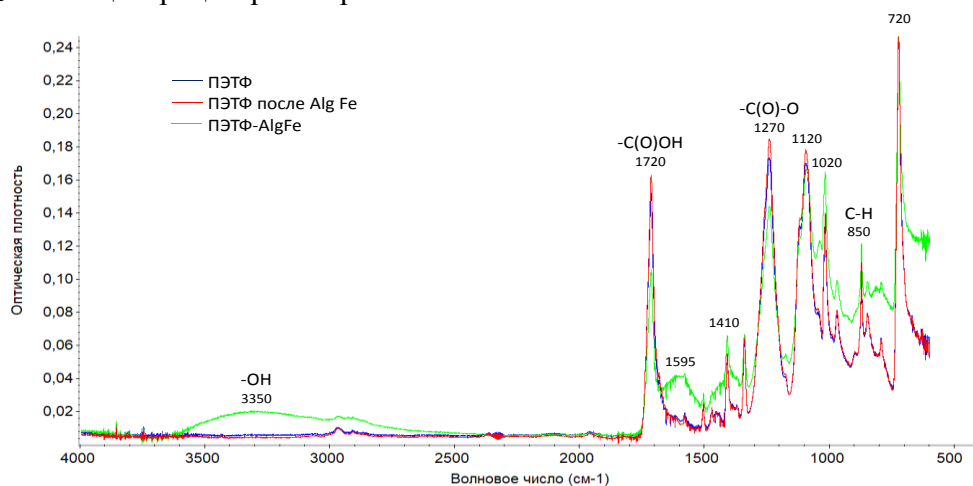


Рис. 2

На рис. 2 показано, что спектр исходного ПЭТФ и после нанесения и механического снятия слоя альгината является неизменным в сравнении с образцом AlgFe, для которого наблюдаются характерные спектральные признаки альгината. Так, для образца AlgFe характерно наличие плато в области  $3350 \text{ см}^{-1}$ , которое связано с образованием водородных связей между карбоксильными группами -ОН и катионами металлов [57]. Полоса в области  $1595 \text{ см}^{-1}$  соответствует антисимметричным колебаниям связи С=О в карбоксилат-ионах. Для всех образцов детектируются спектральные признаки ПЭТФ:  $1720 \text{ см}^{-1}$  – карбонильная связь,  $1410 \text{ см}^{-1}$  – скелетные связи в ароматическом кольце,  $1270 \text{ см}^{-1}$  – С(О)-О связь эфирной группы,  $1175, 1120, 1020 \text{ см}^{-1}$  – полосы в области скелетного кольца, соответствующие 1,4-замещению,  $850 \text{ см}^{-1}$  – деформационные колебания С-Н двух соседних связанных атомов водорода в ароматическом кольце,

вещества в питающем потоке и пермеате соответственно.

Концентрацию модельного красителя Remazol Brilliant Blue R определяли при длине волны  $\lambda=592 \text{ нм}$ , антибиотика цефтриаксон –  $\lambda=370 \text{ нм}$ .

#### Результаты и обсуждения

Характер взаимодействия между нетканым полотном ПЭТФ и модификатором определяли с использованием ИК-спектроскопии (рис. 2).

$730 \text{ см}^{-1}$  – неплоская деформация двух карбонильных заместителей ароматического кольца. ИК-спектры свидетельствуют о том, что между ПЭТФ и модификатором не происходит химического взаимодействия.

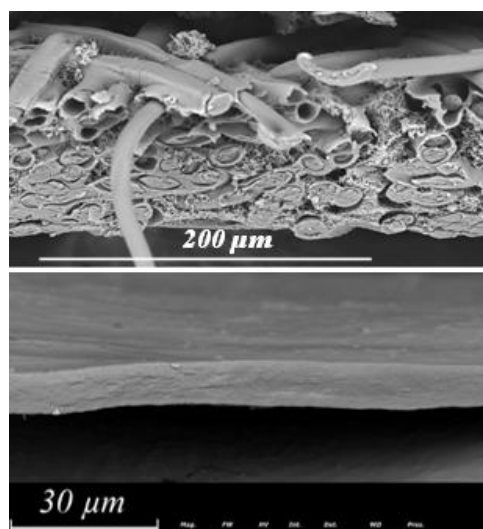


Рис. 3

Таким образом, мембранный фильтр представляет собой двухслойную систему, соединенную за счет физических взаимодействий. Толщина слоя модификатора при этом составляет примерно 15 мкм (рис. 3 – СЭМ фотография исходного ПЭТФ (сверху) и слоя модификатора CaAlg, снятого с поверхности ПЭТФ (снизу)).

Водные стоки обычно обладают сложным составом, включающим в себя органические вещества и нефтепродукты, а потому для мембранных фильтров важны не только высокие проницаемость и селективность, но и химическая устойчивость к органическим растворителям, а также устойчивость к загрязнениям. Сорбционные эксперименты показали, что как сам ПЭТФ, так и его модификаторы, сшитые альгинаты, являются устойчивыми к органическим растворителям (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

|        | ПЭТФ | CaAlg | AlAlg | FeAlg | CuAlg |
|--------|------|-------|-------|-------|-------|
| МП     | 0,23 | 0,04  | 0,07  | 0,08  | 0,05  |
| ДМФ    | 0,33 | 0,02  | 0,13  | 0,18  | 0,08  |
| Этанол | 0,28 | 0     | 0     | 0     | 0     |

Представленные в табл. 2 сорбционные данные свидетельствуют о том, что ПЭТФ и его модификаторы не подвергаются растворению в среде чистых органических растворителей. Сорбция ПЭТФ составляет 0,23 – 0,28 – 0,33 г/г для растворителей МП – этанол – ДМФ соответственно. Сорбция модификаторов, сшитых альгинатов, сильно зависит от сшивающего катиона. Наиболее близкие к ПЭТФ сорбционные характеристики имеет альгинат железа. Так, сорбция FeAlg по ДМФ составляет 0,18 г/г в сравнении с 0,33 для ПЭТФ. Минимальными сорбционными характеристиками обладает альгинат кальция, сорбция которого для ряда растворителей МП – этанол – ДМФ составляет 0,04 – 0 – 0,02 г/г. Учитывая тот факт, что предназначение разрабатываемых мембранных фильтров заключается в водной нанофильтрации, важно отметить не столько конкретные значения сорбции, сколько устойчивость полотен в органических средах. ПЭТФ и его модификаторы не растворяются даже в чистых растворителях, в том

числе в полярных апротонных (МП и ДМФ), которые часто считаются агрессивными растворителями по отношению к полимерам. Это значит, что при фильтрации водных стоков, содержащих органические растворители в качестве примесей, не произойдет разрушения и повреждения мембранных фильтров вне зависимости от концентрации органических компонентов.

Известно, что увеличение гидрофильности мембран способствует повышению их устойчивости к загрязнениям в процессах фильтрации водных растворов [58]. Данный эффект достигается за счет образования на поверхности мембраны плотного гидратного слоя, уменьшающего прямой контакт и, как следствие, адгезию загрязняющих веществ на полимере [59, 60]. В табл. 3 показано, что модификация ПЭТФ сшитыми альгинатами в большинстве случаев снижает гидрофильность фильтрующего полотна в сравнении с немодифицированным полотном ПЭТФ.

Т а б л и ц а 3

|     | ПЭТФ | ПЭТФ-<br>CaAlg | ПЭТФ-<br>AlAlg | ПЭТФ-<br>FeAlg | ПЭТФ-<br>CuAlg |
|-----|------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| θ ° | 67,6 | 35,6           | 59,0           | 79,0           | 42,6           |

Нанесение большинства сшитых альгинатов снижает контактный угол смачивания мембранных фильтров водой по сравнению с чистым ПЭТФ. Контактный угол смачивания водой чистого ПЭТФ составляет 67,5°. Нанесение альгинатов снижает угол вплоть до 35,6°, что характерно для модификации альгинатом кальция. Так, модификация ПЭТФ альгинатами имеет преимущество, заключающееся в гидрофилизации. Следовательно, можно ожидать от модифицированных волокнистых мембранных фильтров повышенной устойчивости к загрязнениям [61], что подтверждается экспериментальными данными (рис. 4).

Капли хлороформа на поверхность мембран нанесены из шприца в подводном слое для оценки склонности к загрязнению маслами. На рис. 4 видно, что по поверхности ПЭТФ капля хлороформа растекается. На поверхности модифицированной мембраны ПЭТФ-FeAlg капли имеют угол

смачивания, превышающий 90 градусов. Это свидетельствует о маслоустойчивости модифицированных мембранных фильтров. Таким образом, модифицированные ПЭТФ мембранные фильтры имеют хорошие перспективы для очистки реальных сложных стоков.

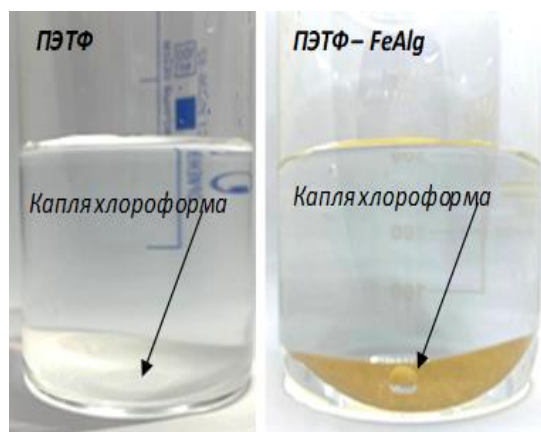


Рис. 4

Фильтрационные исследования показывают, что чистый ПЭТФ имеет более высокую проницаемость, что обусловлено более низким сопротивлением потоку растворителя (рис. 5).

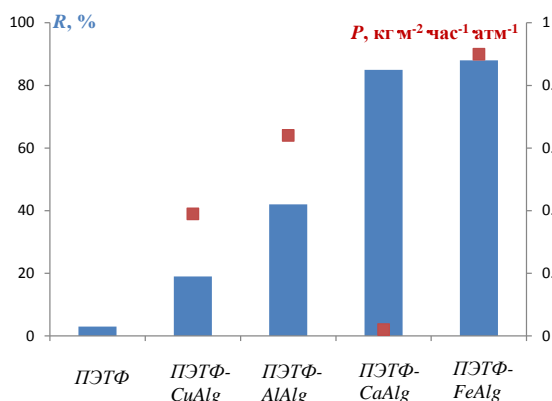


Рис. 5

Проницаемость ПЭТФ составляет  $1,9 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ , что более чем в два раза больше, чем у самого проницаемого модифицированного мембранного фильтра ПЭТФ-FeAlg ( $P = 0,9 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ ). Однако из-за своей крупной пористости, обусловленной волокнистой структурой волокна, ПЭТФ не способен хорошо задер-

живать низкомолекулярные вещества, и задерживание модельного красителя Remazol Brilliant Blue R составляет всего 13% (рис. 6).

Модификация ПЭТФ шитыми альгинатами хоть и снижает его проницаемость, зато позволяет повысить коэффициенты задерживания модельного красителя Remazol Brilliant Blue R. Как показывают экспериментальные данные, большую роль в итоговой селективности играет шивающий металл. Так, при изменении шивающего катиона в ряду Cu-Al-Ca-Fe коэффициенты задерживания растут от 19 до 88%. В исследованном ряду оптимальным мембранным фильтром при очистке воды от загрязняющих веществ с молекулярной массой, примерно равной  $620 \text{ г/моль}$ , является ПЭТФ-FeAlg. При модификации полиэтилентерефталата альгинатом железа (III) получается мембранный фильтр, обладающий среди всех прочих ПЭТФ-MeAlg максимальной проницаемостью, равной  $P=0,9 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ , а также высокой селективностью  $R=88\%$ .

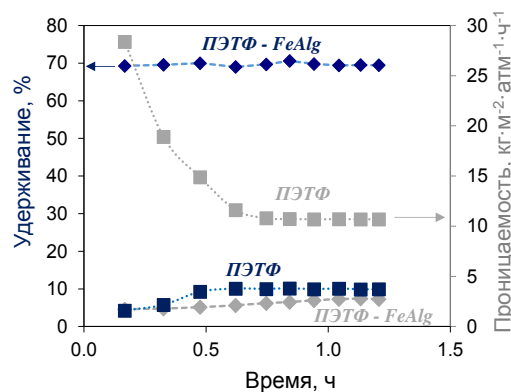


Рис. 6

Сравнение фильтрующей способности модифицированного и исходного полотна ПЭТФ показало, что модификация альгинатом железа приводит к увеличению задерживающей способности мембранного фильтра на порядок: с 6,9% до 69,9% для ПЭТФ и ПЭТФ-FeAlg. Проницаемость при этом закономерно снижается, однако остается на достаточно высоком уровне: с  $10,7 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$  до  $3,7 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$  для ПЭТФ и ПЭТФ-FeAlg. Такие характеристики полученного фильтра демонстрируют высокий потенциал его применения



для выделения как красителей, так и антибиотиков из водных сред.

## ВЫВОДЫ

В данной работе разработан подход к модификации нетканого полотна ПЭТФ природным полимером альгинатом натрия с последующей сшивкой солями металлов. Продемонстрирована устойчивость полотна ПЭТФ к органическим растворителям, в том числе к апротонным полярным растворителям МП и ДМФ. Показано, что альгинаты повышают гидрофильность ПЭТФ, что подтверждается снижением контактного угла смачивания для большинства модифицированных образцов. Также продемонстрирована на примере хлороформа маслостойчивость модифицированных мембранных фильтров. Все это демонстрирует высокий потенциал фильтров к разделению реальных промышленных стоков сложного состава. При исследовании фильтрующей способности полотен впервые показано, что на проницаемость и селективность разработанных мембранных фильтров большое влияние оказывает сшивающий катион модификатора. Так, в ряду мембранных фильтров, сшитых  $\text{Cu}^{2+}$  -  $\text{Al}^{3+}$  -  $\text{Ca}^{2+}$  -  $\text{Fe}^{3+}$ , селективность по модельному красителю Remazol Brilliant Blue R возрастает от 18 до 88%. При этом проницаемость характеризуется значениями  $0,39 - 0,64 - 0,02 - 0,9 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$  соответственно. Сравнительный анализ фильтрующей способности исходного полотна ПЭТФ и модифицированного ПЭТФ-FeAlg продемонстрировал высокую эффективность разработанного фильтра при выделении антибиотика цефтриаксона натрия из воды. Так, ПЭТФ-FeAlg характеризуется на порядок большей задерживающей способностью при сопоставимой проницаемости. Таким образом, продемонстрирован высокий потенциал разработанных фильтрующих полотен для задачи очистки сточных вод от красителей и антибиотиков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Евлантьев С.С., Войтюк А.А., Сахарова Н.А. Исследование методов очистки сточных вод тек-

стильного производства от красителей // Научный потенциал регионов на службу модернизации. АИ-СИ. 2012, 2. С. 3.

2. Ануфриев В.Н. Очистка сточных вод предприятий текстильной промышленности // Экология. 2015, 1(43). С. 87...96.

3. Абрамов О.В. и др. Очистка сточных вод текстильных предприятий гальванохимическим методом с использованием ультразвукового поля // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2009. № 3 (316). С. 107...110.

4. Алиева С. Обзор методов очистки сточных вод // Проблемы инженерной графики и профессионального образования. 2016, 39 (6). С. 67...70.

5. Palacio D. A. et al. Antibiotics removal using a chitosan-based polyelectrolyte in conjunction with ultrafiltration membranes // Chemosphere. 2020, 258. P. 127416.

6. Haenni M. et al. Environmental contamination in a high-income country (France) by antibiotics, antibiotic-resistant bacteria, and antibiotic resistance genes: Status and possible causes // Environment international. 2022, 159. P. 107047.

7. Berglund B. Environmental dissemination of antibiotic resistance genes and correlation to anthropogenic contamination with antibiotics // Infection ecology & epidemiology. 2015, 5 (1). P. 28564.

8. Zhang Y. et al. Impacts of farmland application of antibiotic-contaminated manures on the occurrence of antibiotic residues and antibiotic resistance genes in soil: A meta-analysis study // Chemosphere. 2022, 300. P. 134529.

9. Sodhi K. K. et al. Perspectives on the antibiotic contamination, resistance, metabolomics, and systemic remediation // SN Applied Sciences. 2021, 3. P. 1...25.

10. Larsson D.G.J. Antibiotics in the environment // Upsala journal of medical sciences. 2014, 119 (2). P. 108...112.

11. Martinez J.L. Environmental pollution by antibiotics and by antibiotic resistance determinants // Environmental pollution. 2009, 157 (11). P. 2893...2902.

12. Anh H. Q. et al. Antibiotics in surface water of East and Southeast Asian countries: A focused review on contamination status, pollution sources, potential risks, and future perspectives // Science of The Total Environment. 2021, 764. P. 142865.

13. Liu X. et al. Antibiotics in the aquatic environments: a review of lakes, China // Science of the Total Environment. 2018, 627. P. 1195...1208.

14. Ana K.M.S., Madriaga J., Espino M.P.  $\beta$ -Lactam antibiotics and antibiotic resistance in Asian lakes and rivers: An overview of contamination, sources and detection methods // Environmental Pollution. 2021, 275. P. 116624.

15. Martinez J.L. Antibiotics and antibiotic resistance genes in natural environments // Science. 2008, 321 (5887). P. 365...367.

16. Laxminarayan R. et al. The Lancet Infectious Diseases Commission on antimicrobial resistance: 6 years later // The Lancet Infectious Diseases. 2020, 20 (4), P. 51...60.

17. Cars O. et al. Resetting the agenda for antibiotic resistance through a health systems perspective // The Lancet Global Health. 2021, 9 (7). P.e1022...e1027.

18. Singh R. *et al.* Antibiotic resistance in major rivers in the world: a systematic review on occurrence, emergence, and management strategies // *Journal of Cleaner Production*. 2019, 234. P. 1484...1505.
19. Suarez S., Lema J. M., Omil F. Pre-treatment of hospital wastewater by coagulation–flocculation and flotation // *Bioresource technology*. 2009, 100 (7). P. 2138...2146.
20. Choi K.J., Kim S.G., Kim S.H. Removal of antibiotics by coagulation and granular activated carbon filtration // *Journal of hazardous materials*. 2008, 151 (1), P. 38...43.
21. Di J. *et al.* Novel visible-light-driven CQDs/Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> hybrid materials with enhanced photocatalytic activity toward organic pollutants degradation and mechanism insight // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2015, 168. P. 51...61.
22. Sulbarán Rangel B.C. *et al.* Nanomaterial-esclulósicos para la adsorción de contaminante-semergentes // *Tecnura*. 2019, 23 (62). P. 13...20.
23. Meneau-Hernández R.I. *et al.* Adsorción de ciprofloxacina en materiales zeolíticos // *Revista Cubana de Química*. 2021, 33 (1). P. 167...190.
24. Naddeo V. *et al.* Fate of pharmaceuticals in contaminated urban wastewater effluent under ultrasonic irradiation // *Water research*. 2009, 43 (16). P. 4019...4027.
25. Huang B. *et al.* Treatment of pharmaceutical wastewater containing  $\beta$ -lactams antibiotics by a pilot-scale anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) // *Chemical Engineering Journal*. 2018, 341. P. 238...247.
26. Prado N., Ochoa J., Amrane A. Biodegradation by activated sludge and toxicity of tetracycline into a semi-industrial membrane bioreactor // *Bioresource technology*. 2009, 100 (15). P. 3769...3774.
27. Li B., Zhang T. Biodegradation and adsorption of antibiotics in the activated sludge process // *Environmental science & technology*. 2010, 44 (9). P. 3468...3473.
28. Joss A. *et al.* Removal of pharmaceuticals and fragrances in biological wastewater treatment // *Water research*. 2005, 39 (14). P. 3139...3152.
29. Yang S. F. *et al.* Sorption and biodegradation of sulfonamide antibiotics by activated sludge: experimental assessment using batch data obtained under aerobic conditions // *Water research*. 2011, 45 (11). P. 3389...3397.
30. Абдуова А.А. и др. Анализ современного состояния вопроса исследования промышленного применения напорных гидроциклонов в области очистки сточных вод легкой промышленности // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2016. 3(363). С. 227...231.
31. Нотayoofal M., Mehrnia M.R. Amoxicillin separation from pharmaceutical solution by pH sensitive nanofiltration membranes // *Separation and Purification Technology*. 2014, 130. P. 74...83.
32. Осадчий Ю.П., Блиничев В.Н. Баромембранная очистка сточных вод, содержащих пигменты и кислотные красители // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2007. 5(301). С. 64...66.
33. Bojaran M., Akbari A., Yunessnialehi A. Novel ultrafiltration membranes with the least fouling properties for the treatment of veterinary antibiotics in the pharmaceutical wastewater // *Polymers for Advanced Technologies*. 2019, 30 (7). P. 1716...1723.
34. Ревенок А.О., Николаев А.В., Керсновская А.Ю. Оценка растворимости отходов полиэтилентерефталата в органических растворителях // *Наука – шаг в будущее: тезисы докладов XV студ. науч.-практ. конф. факультета "Технология органических веществ"*, Минск, 1-2 декабря 2021 г. Минск: БГТУ, 2021, С. 20.
35. Barnard E., Arias J.J.R., Thielemans W. Chemolytic depolymerisation of PET: a review // *Green Chemistry*. 2021, 23 (11). P. 3765...3789.
36. Веснин Р.Л., Алапыкин А.А., Вохмянин М.А. Технология утилизации отходов полиэтилентерефталата с получением амида терефталевой кислоты // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2020, 63 (2). С. 99...104.
37. Харичкин А.С., Грехнева Е.В., Чуйкова С.В. Влияние низкомолекулярных спиртов на гидролиз полиэтилентерефталата // *Auditorium*. 2015, 1 (5). С. 13...17.
38. Kamrani H., Nosrati A. Fabrication of nanofiber filtration membranes using polyethylene terephthalate (PET): A review // *J. Membr. Sci. Technol*. 2018, 8. P. 1000183.
39. Xiang J. *et al.* Study on Low Thermal Conductivity of PVDF@ SiAG/PET Membranes for Direct Contact Membrane Distillation Application // *Membranes*. 2023, 13 (9). P. 773.
40. Bonfim D.P.F. *et al.* A sustainable recycling alternative: Electrospun PET-membranes for air nanofiltration // *Polymers*. 2021, 13 (7). P. 1166.
41. Lyu C. *et al.* Electrospinning of nanofibrous membrane and its applications in air filtration: A review // *Nanomaterials*. 2021, 11 (6). P. 1501.
42. Zander N. E., Gillan M., Sweetser D. Recycled PET nanofibers for water filtration applications // *Materials*. 2016, 9 (4). P. 247.
43. Fahimirad S., Fahimirad Z., Sillanpää M. Efficient removal of water bacteria and viruses using electrospun nanofibers // *Science of the Total Environment*. 2021, 751. P. 141673.
44. Korolkov I.V. *et al.* Preparation of hydrophobic PET track-etched membranes for separation of oil-water emulsion // *Membranes*. 2021, 11 (8). P. 637.
45. Xiong Q. *et al.* Waste PET derived Janus fibrous membrane for efficient oil/water emulsions separation // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022, 10 (5). P. 108459.
46. Chen H. *et al.* Waste to treasure: A superwetting fiber membrane from waste PET plastic for water-in-oil emulsion separation // *Journal of Cleaner Production*. 2023, 396. P. 136502.
47. Korolkov I.V. *et al.* Protein fouling of modified microporous PET track-etched membranes // *Radiation Physics and Chemistry*. 2018, 151. P. 141...148.
48. Khashij M. *et al.* Recycled PET/metal oxides nanocomposite membrane for treatment of real industrial effluents: Membrane fabrication, stability, antifouling behavior, and process modeling and optimization // *Journal of Molecular Liquids*. 2022, 364. P. 119966.

49. *Khorram M., Mousavi A., Mehranbod N.* Chromium removal using adsorptive membranes composed of electrospun plasma-treated functionalized polyethylene terephthalate (PET) with chitosan // *Journal of environmental chemical engineering*. 2017, 5 (3). P. 2366...2377.

50. *Ali B.T.I. et al.* Utilization of polyethylene terephthalate (PET) plastic bottle waste as membrane with several modifications for the removal of chromium ions in wastewater // *Materials Today: Proceedings*. 2023, 74. P. 433...437.

51. *Ehrenhofer A., Wallmersperger T.* Deformation Behavior of Hydrogel-layered PET Membranes // *DEMEASS VIII*. P. 14.

52. *Anokhina T.S. et al.* Cellulose composite membranes for nanofiltration of aprotic solvents // *Petroleum Chemistry*. 2016, 56. P. 1085...1092.

53. *Pawar S.N., Edgar K.J.* Alginate derivatization: A review of chemistry, properties and applications // *Biomaterials*. 2012, 33 (11). P. 3279-3305.

54. *Иванов А.Н., Пестовская Е.А., Занозин С.В.* Исследование сорбции паров воды и токсичных газов волокнистыми целлюлозными хемосорбентами // *Известия вузов. Технология текстильной промышленности*. 2012. №4 (340). С. 162...166.

55. *Kaklamani G. et al.* Mechanical properties of alginate hydrogels manufactured using external gelation // *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. 2014, 36. P. 135...142.

56. *Metecan A., Cihanoğlu A., Altinkaya S.A.* A positively charged loose nanofiltration membrane fabricated through complexing of alginate and polyethyleneimine with metal ions on the polyamideimide support for dye desalination // *Chemical Engineering Journal*. 2021, 416. P. 128946.

57. *Aburabie J.H., Puspasari T., Peinemann K.V.* Alginate-based membranes: Paving the way for green organic solvent nanofiltration // *Journal of Membrane Science*. 2020, 596. P. 117615.

58. *Dmitrieva E. S. et al.* Crosslinked Sodium Alginate as a Material for Nanofiltration Protonic and Aprotic Solvents // *Key Engineering Materials*. 2021, 899, P. 745...751.

59. *Табакаева О.В., Табакаев А.В.* Биологически активные вещества потенциально промышленных бурых водорослей Дальневосточного региона // *Вопросы питания*. 2016, 85 (3). С. 126...132.

60. *Daemi H., Barikani M.* Synthesis and characterization of calcium alginate nanoparticles, sodium homopolymannuronate salt and its calcium nanoparticles // *Scientia Iranica*. 2012, 19 (6). P. 2023...2028.

61. *Li F. et al.* Flexible, durable, and unconditioned superoleophobic/superhydrophilic surfaces for controllable transport and oil-water separation // *Advanced Functional Materials*. 2018, 28 (20). P. 1706867.

62. *Gao S. J. et al.* Superwetting polymer-decorated SWCNT composite ultrathin films for ultrafast separation of oil-in-water nanoemulsions // *Journal of Materials Chemistry A*. 2015, 3 (6). P. 2895...2902.

63. *Wang Z. et al.* Mussel-inspired hybrid coatings that transform membrane hydrophobicity into high hydrophilicity and underwater superoleophobicity for oil-in-water emulsion separation // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2015, 7 (18). P. 9534...9545.

64. *Апель П.Ю., Велизаров С., Волков А.В., Елисеева Т.В., Никоненко В.В., Паршина А.В., Письменская Н.Д., Попов К.И., Ярославцев А.Б.* Фаулинг и деградация мембран в мембранных процессах // *Мембраны и мембранные технологии*. 2022, 12 (2). С. 81...106.

## REFERENCES

1. *Evlant'ev S.S., Vojtyuk A.A., Saharova N.A.* Issledovanie metodov oчитки stochnyh vod tekstil'nogo proizvodstva ot krasitelej // *Nauchnyj potencial regionov na sluzhbu modernizacii*. AISI. 2012, 2. P. 3.

2. *Anufriev V.N.* Oчитка stochnyh vod predpriyatij tekstil'noj promyshlennosti // *Ekologiya*. 2015, 1(43). P. 87...96

3. *Abramov O.V. i dr.* Oчитка stochnyh vod tekstil'nyh predpriyatij gal'vanohimicheskim metodom s ispol'zovaniem ul'trazvukovogo polya // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2009, 3. P. 316

4. *Alieva S.* Obzor metodov oчитки stochnyh vod // *Problemy inzhenernoj grafiki i professional'nogo obrazovaniya*. 2016, 39 (6). P. 67...70.

5. *Palacio D.A. et al.* Antibiotics removal using a chitosan-based polyelectrolyte in conjunction with ultrafiltration membranes // *Chemosphere*. 2020, 258. P. 127416.

6. *Haenni M. et al.* Environmental contamination in a high-income country (France) by antibiotics, antibiotic-resistant bacteria, and antibiotic resistance genes: Status and possible causes // *Environment international*. 2022, 159. P. 107047.

7. *Berglund B.* Environmental dissemination of antibiotic resistance genes and correlation to anthropogenic contamination with antibiotics // *Infection ecology & epidemiology*. 2015, 5 (1). P. 28564.

8. *Zhang Y. et al.* Impacts of farmland application of antibiotic-contaminated manures on the occurrence of antibiotic residues and antibiotic resistance genes in soil: A meta-analysis study // *Chemosphere*. 2022, 300. P. 134529.

9. *Sodhi K.K. et al.* Perspectives on the antibiotic contamination, resistance, metabolomics, and systemic remediation // *SN Applied Sciences*. 2021, 3. P. 1...25.

10. *Larsson D.G.J.* Antibiotics in the environment // *Upsala journal of medical sciences*. 2014, 119 (2). P. 108...112.

11. *Martinez J.L.* Environmental pollution by antibiotics and by antibiotic resistance determinants // *Environmental pollution*. 2009, 157 (11). P. 2893...2902.

12. *Anh H. Q. et al.* Antibiotics in surface water of East and Southeast Asian countries: A focused review on contamination status, pollution sources, potential risks, and future perspectives // *Science of The Total Environment*. 2021, 764. P. 142865.

13. *Liu X. et al.* Antibiotics in the aquatic environments: a review of lakes, China // *Science of the Total Environment*. 2018, 627. P. 1195...1208.

14. *Ana K.M.S., Madriaga J., Espino M.P.*  $\beta$ -Lactam antibiotics and antibiotic resistance in Asian lakes and rivers: An overview of contamination,

sources and detection methods // *Environmental Pollution*. 2021, 275. P. 116624.

15. *Martínez J.L.* Antibiotics and antibiotic resistance genes in natural environments // *Science*. 2008, 321 (5887). P. 365...367.

16. *Laxminarayan R. et al.* The Lancet Infectious Diseases Commission on antimicrobial resistance: 6 years later // *The Lancet Infectious Diseases*. 2020, 20 (4), P. 51...60.

17. *Cars O. et al.* Resetting the agenda for antibiotic resistance through a health systems perspective // *The Lancet Global Health*. 2021, 9 (7). P. e1022...e1027.

18. *Singh R. et al.* Antibiotic resistance in major rivers in the world: a systematic review on occurrence, emergence, and management strategies // *Journal of Cleaner Production*. 2019, 234. P. 1484...1505.

19. *Suarez S., Lema J. M., Omil F.* Pre-treatment of hospital wastewater by coagulation–flocculation and flotation // *Bioresource technology*. 2009, 100 (7). P. 2138...2146.

20. *Choi K.J., Kim S.G., Kim S.H.* Removal of antibiotics by coagulation and granular activated carbon filtration // *Journal of hazardous materials*. 2008, 151 (1). P. 38...43.

21. *Di J. et al.* Novel visible-light-driven CQDs/Bi<sub>2</sub>WO<sub>6</sub> hybrid materials with enhanced photocatalytic activity toward organic pollutants degradation and mechanism insight // *Applied Catalysis B: Environmental*. 2015, 168. P. 51...61.

22. *Sulbarán Rangel B.C. et al.* Nanomaterial-escelulósicos para la adsorción de contaminantes-emergentes // *Tecnura*. 2019, 23 (62). P. 13...20.

23. *Meneau-Hernández R.I. et al.* Adsorción de ciprofloxacina en materiales zeolíticos // *Revista Cubana de Química*. 2021, 33 (1). P. 167...190.

24. *Naddeo V. et al.* Fate of pharmaceuticals in contaminated urban wastewater effluent under ultrasonic irradiation // *Water research*. 2009, 43 (16). P. 4019...4027.

25. *Huang B. et al.* Treatment of pharmaceutical wastewater containing  $\beta$ -lactams antibiotics by a pilot-scale anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) // *Chemical Engineering Journal*. 2018, 341. P. 238...247.

26. *Prado N., Ochoa J., Amrane A.* Biodegradation by activated sludge and toxicity of tetracycline into a semi-industrial membrane bioreactor // *Bioresource technology*. 2009, 100 (15). P. 3769...3774.

27. *Li B., Zhang T.* Biodegradation and adsorption of antibiotics in the activated sludge process // *Environmental science & technology*. 2010, 44 (9). P. 3468...3473.

28. *Joss A. et al.* Removal of pharmaceuticals and fragrances in biological wastewater treatment // *Water research*. 2005, 39 (14). P. 3139...3152.

29. *Yang S. F. et al.* Sorption and biodegradation of sulfonamide antibiotics by activated sludge: experimental assessment using batch data obtained under aerobic conditions // *Water research*. 2011, 45 (11). P. 3389...3397.

30. *Abduova A.A. et al.* Analysis of current state of research questions pressure hydrocyclones industrial applications in wastewater treatment of light industry // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya*

*Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2016, 3, P. 227...231.

31. *Homayoonfal M., Mehrnia M.R.* Amoxicillin separation from pharmaceutical solution by pH sensitive nanofiltration membranes // *Separation and Purification Technology*. 2014, 130. P. 74...83.

32. *Osadchij YU.P., Blinichev V.N.* Baromembranaya ochistka stochnykh vod, soderzhashchih pigmenty i kislotnye krasiteli // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2007, 5(301). P. 64...66.

33. *Bojaran M., Akbari A., Yunessnialehi A.* Novel ultrafiltration membranes with the least fouling properties for the treatment of veterinary antibiotics in the pharmaceutical wastewater // *Polymers for Advanced Technologies*. 2019, 30 (7), P. 1716...1723.

34. *Revenok A.O., Nikolaev A.V., Kersnovskaya A.YU.* Ocenka rastvorimosti othodov poli-etilentereftalata v organicheskikh rastvoritelyah // *Nauka – shag v budushchee: tezisy dokladov XV studentcheskoj nauchno-prakticheskoy konferencii fakul'teta "Tekhnologiya organicheskikh veshchestv"*, Minsk, 1-2 dekabrya 2021 g. Minsk: BGTU, 2021. P. 20.

35. *Barnard E., Arias J.J.R., Thielemans W.* Chemolytic depolymerisation of PET: a review // *Green Chemistry*. 2021, 23 (11). P. 3765...3789.

36. *Vesnin R.L., Alalykin A.A., Vohmyanin M.A.* Tekhnologiy autilizacii othodov polietilen-tereftalata s polucheniem amida tereftalevoj kisloty // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Himiya i Himicheskaya Tekhnologiya*. 2020, 63 (2). P. 99...104.

37. *Harichkin A.S., Grekhnyova E.V., CHujkova S.V.* Vliyanie nizkomolekulyarnykh spirtov na gidroliz polietilentereftalata // *Auditorium*. 2015, 1 (5). P. 13...17.

38. *Kamrani H., Nosrati A.* Fabrication of nanofiber filtration membranes using polyethylene terephthalate (PET): A review // *J. Membr. Sci. Technol.* 2018, 8. P. 1000183.

39. *Xiang J. et al.* Study on Low Thermal-Conductivity of PVDF@ SiAG/PET Membranes for Direct Contact Membrane Distillation Application // *Membranes*. 2023, 13 (9). P. 773.

40. *Bonfim D.P.F. et al.* A sustainable recycling alternative: Electrospun PET-membranes for air nanofiltration // *Polymers*. 2021, 13 (7). P. 1166.

41. *Lyu C. et al.* Electrospinning of nanofibrous membrane and its applications in air filtration: A review // *Nanomaterials*. 2021, 11 (6). P. 1501.

42. *Zander N. E., Gillan M., Sweetser D.* Recycled PET nanofibers for water filtration applications // *Materials*. 2016, 9 (4). P. 247.

43. *Fahimirad S., Fahimirad Z., Sillanpää M.* Efficient removal of water bacteria and viruses using electrospun nanofibers // *Science of the Total Environment*. 2021, 751. P. 141673.

44. *Korolkov I.V. et al.* Preparation of hydrophobic PET track-etched membranes for separation of oil-water emulsion // *Membranes*. 2021, 11 (8). P. 637.

45. *Xiong Q. et al.* Waste PET derived Janus fibrous membrane for efficient oil/water emulsions separation // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022, 10 (5). P. 108459.

46. *Chen H. et al.* Waste to treasure: A superwetting fiber membrane from waste PET plastic for water-in-oil emulsion separation // *Journal of Cleaner Production*. 2023, 396. P. 136502.
47. *Korolkov I.V. et al.* Protein fouling of modified microporous PET track-etched membranes // *Radiation Physics and Chemistry*. 2018, 151. P. 141...148.
48. *Khashij M. et al.* Recycled PET/metal oxides nanocomposite membrane for treatment of real industrial effluents: Membrane fabrication, stability, anti-fouling behavior, and process modeling and optimization // *Journal of Molecular Liquids*. 2022, 364. P. 119966.
49. *Khorram M., Mousavi A., Mehranbod N.* Chromium removal using adsorptive membranes composed of electrospun plasma-treated functionalized polyethylene terephthalate (PET) with chitosan // *Journal of environmental chemical engineering*. 2017, 5 (3). P. 2366...2377.
50. *Ali B.T.I. et al.* Utilization of polyethylene terephthalate (PET) plastic bottle waste as membrane with several modifications for the removal of chromium ions in wastewater // *Materials Today: Proceedings*. 2023, 74, P. 433...437.
51. *Ehrenhofer A., Wallmersperger T.* Deformation Behavior of Hydrogel-layered PET Membranes // *DEMEASS VIII*. P. 14.
52. *Anokhina T. S. et al.* Cellulose composite membranes for nanofiltration of aprotic solvents // *Petroleum Chemistry*. 2016, 56. P. 1085...1092.
53. *Pawar S.N., Edgar K J.* Alginate derivatization: A review of chemistry, properties and applications // *Biomaterials*. 2012, 33 (11). P. 3279...3305.
54. *Ivanov A.N., Pestovskaya E.A., Zanozin S.V.* Research of sorption of water vapour and toxic gases by fibrous cellulose chemisorbents // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2012, 4 (340). P. 162...166
55. *Kaklamani G. et al.* Mechanical properties of alginate hydrogels manufactured using external gelation // *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*. 2014, 36. P. 135...142.
56. *Metecan A., Cihanoğlu A., Altinkaya S.A.* A positively charged loose nanofiltration membrane fabricated through complexing of alginate and polyethyleneimine with metal ions on the polyamideimide support for dye desalination // *Chemical Engineering Journal*. 2021, 416. P. 128946.
57. *Aburabie J.H., Puspasari T., Peinemann K.V.* Alginate-based membranes: Paving the way for green organic solvent nanofiltration // *Journal of Membrane Science*. 2020, 596. P. 117615.
58. *Dmitrieva E. S. et al.* Crosslinked Sodium Alginate as a Material for Nanofiltration Protonic and Aprotic Solvents // *Key Engineering Materials*. 2021, 899. P. 745...751.
59. *Tabakaeva O.V., Tabakaev A.V.* Biologicheski aktivnye veshchestva potencial'no promyslovykh buryh vodoroslej Dal'nevostochnogo regiona // *Voprosy pitaniya*. 2016, 85 (3). P. 126...132.
60. *Daemi H., Barikani M.* Synthesis and characterization of calcium alginate nanoparticles, sodium homopolymannuronate salt and its calcium nanoparticles // *Scientia Iranica*. 2012, 19 (6). P. 2023...2028.
61. *Li F. et al.* Flexible, durable, and unconditioned superoleophobic/superhydrophilic surfaces for controllable transport and oil-water separation // *Advanced Functional Materials*. 2018, 28 (20). P. 1706867.
62. *Gao S. J. et al.* Superwetting polymer-decorated SWCNT composite ultrathin films for ultrafast separation of oil-in-water nanoemulsions // *Journal of Materials Chemistry A*. 2015, 3 (6). P. 2895...2902.
63. *Wang Z. et al.* Mussel-inspired hybrid coatings that transform membrane hydrophobicity into high hydrophilicity and underwater superoleophobicity for oil-in-water emulsion separation // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2015, 7 (18). P. 9534...9545.
64. *Apel' P.YU., Velizarov S., Volkov A.V., Eliseeva T.V., Nikonenko V.V., Parshina A.V., Pis'menskaya N.D., Popov K.I., YAroslavcev A.B.* Fouling i degradaciya membran v membrannykh processah // *Membrany i membrannye tekhnologii*. 2022, 12 (2). P. 81...106.

Рекомендована лабораторией №18 полимерных мембран Института нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН. Поступила 20.11.23.