

УДК66.081.6
DOI 10.47367/0021-3497_2023_6_266

**ЦЕЛЛЮЛОЗА КАК МОДИФИЦИРУЮЩИЙ СЛОЙ НЕТКАНОГО ПОЛОТНА
НА ОСНОВЕ ПЭТФ ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ ВОДНЫХ СРЕД***

**CELLULOSE AS A MODIFYING LAYER OF PETF-BASED NON-WOVEN FABRIC
FOR FILTRETION AQUEOUS ENVIRONMENTS**

*Е.С. ДМИТРИЕВА, А.П. НЕБЕССКАЯ, Е.А. ГРУШЕВЕНКО, В.Я. МЕЛЕХИНА,
А.В. ВЛАСОВА, Т.С. АНОХИНА, А.В. ВОЛКОВ*

*E.S. DMITRIEVA, A.P. NEBESSKAYA, E.A. GRUSHEVENKO, V.Ya. MELEKHINA,
A.V. VLASOVA, T.S. ANOKHINA, A.V. VOLKOV*

(Институт нефтехимического синтеза РАН им. А.В. Топчиева)

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

E-mail:tsanokhina@ips.ac.ru

***В современном мире большое влияние на состояние окружающей среды
оказывают промышленные, в том числе и текстильные, предприятия.
Большую антропогенную нагрузку при этом испытывают природные водоемы.***

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

В них попадают тысячи загрязнителей, оказывающих влияние на здоровье всего живого мира. В данной работе разработаны мембраны на основе нетканого полиэтилентерефталатного (ПЭТФ) полотна для очистки воды от одних из наиболее опасных растворенных компонентов – антибиотиков. В качестве модификатора ПЭТФ использовали целлюлозу, нанесенную из «зеленого» растворителя: смеси диметилоксида (ДМСО) и ионной жидкости. Большое влияние на фильтрационные свойства оказывает нерастворитель, используемый для осаждения модификатора. Максимальную селективность демонстрируют мембраны, осажденные в метаноле: 83, 68, 54% по Remazol Brilliant Blue R, Orange II и антибиотик-цефтриаксону соответственно.

In the modern world, industrial enterprises, including textile enterprises, have a great impact on the environment. Natural water bodies are under great anthropogenic load. Thousands of pollutants are released into them affecting the health of the entire living world. In this work, membranes based on nonwoven polyethylene terephthalate (PET) fabric were developed to purify water from one of the most dangerous dissolved components. They are antibiotics. Cellulose applied from a "green" solvent: a mixture of dimethyloxide (DMSO) and ionic liquid was used as a modifier of PET. The filtration properties are greatly influenced by the non-solvent used to precipitate the modifier. The maximum selectivity is demonstrated by membranes precipitated in methanol: 83, 68, 54% for Remazol Brilliant Blue R, Orange II and antibiotic ceftriaxone, respectively.

Ключевые слова: полиэтилентерефталат, фильтрующее полотно, нанофильтрация, антибиотики, модификация, инверсия фаз, осадитель, целлюлоза, ионные жидкости.

Keywords: polyethylene terephthalate, fabric filter, nanofiltration, antibiotics, modification, phase inversion, cellulose, ionic liquid.

В настоящее время промышленность в России и за рубежом развивается с повышенной активностью. Ускоренный темп развития, к сожалению, имеет не только положительный эффект для экономики стран и повышения их уровня жизни, но и оказывает негативное влияние на экологическое состояние окружающей среды. Например, при производстве текстильных изделий потребляется много воды, а также образуется значительное количество сточных вод при реализации каждого из технологических процессов (подготовка сырья, крашение, отделка и др.) [1]. На производство каждой тонны текстиля затрачивается 200-350 кубометров воды [2] в зависимости от типа ткани [3]. Это не может не сказываться на состоянии ближайших к предприятию природных водоемов [4]. Таким образом, актуальными являются вопросы очистки вод-

ных стоков от разнообразных растворенных компонентов [5].

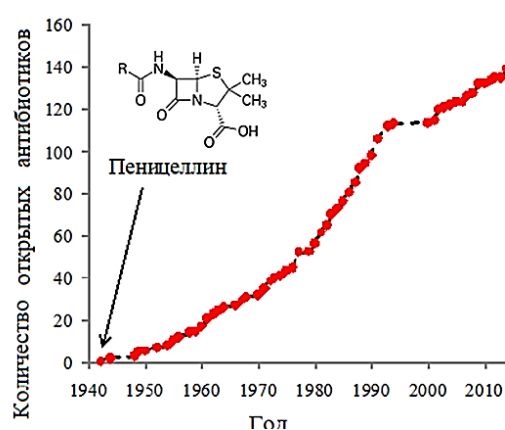


Рис. 1

Одним из наиболее опасных компонентов водных стоков промышленных предприятий являются антибиотики. Они были

открыты в конце XIX века [6]. В настоящее время ассортимент производимых антибиотиков существенно расширился (рис. 1). Объемы их производства увеличиваются с каждым годом. Все это приводит к их постоянному и непрерывному поступлению в природные водоемы.

Впервые присутствие антибиотиков в поверхностных водах обнаружено в 1970-х годах. Их концентрации были незначительны. В связи с этим их присутствие считалось неопасным. Однако использование антибиотиков расширилось по мере развития медицины, роста качества жизни из-за их применения в животноводстве и рыбноводстве (рис. 2). Это привело к большому накоплению антибиотиков в грунтовых и поверхностных водах [7, 8]. Главная опас-

ность накопления антибиотиков заключается в появлении резистентности у микроорганизмов [9].

Проблема загрязнения антибиотиками актуальна для всего мира. Это подтверждают исследования состояния окружающей среды в разных странах и регионах [10-12]. Обзор Rachna Singh [13] акцентирует свое внимание на мировом загрязнении рек и развитии устойчивости к антибиотикам, экологических последствиях массового и неконтролируемого использования антибиотиков. Риски для людей и экосистем подробно описываются в обзорах D.G. Joakim Larsson [14] и Jose Luis Martinez [15]. Авторы приходят к выводу об актуальности вопросов водоочистки.

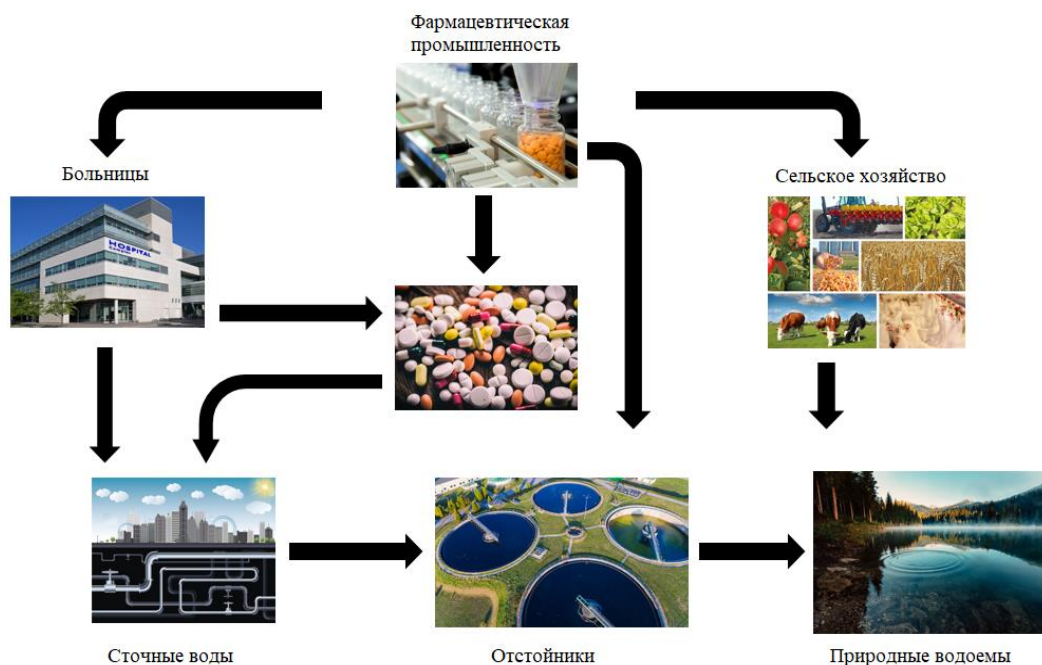


Рис. 2

Основными методами очистки сточных вод являются сорбция [16, 17], фотодegradация [18, 19], биодegradация [20-24], коагуляция-флокуляция [25, 26], ультразвуковое облучение [27], физическая очистка [28]. В последнее время большое внимание уделяют энергоэффективным и энергосберегающим технологиям [29]. В связи с этим на передний план выходят мембранные технологии [30]. Они не требуют реагентов, отличаются низкими энергетическими затратами, нечувствительны к условиям окружающей среды.

Материал для производства мембран должен обеспечивать высокую проницаемость, но задерживать растворенные в воде вещества. Кроме того, он должен быть устойчивым в фильтруемой среде и в идеальном случае недорогим. В связи с перечисленными требованиями обращают на себя внимание крупнотоннажные водонерастворимые полимеры, например полиэтилентерефталат (ПЭТФ) [31]. Важно, что его возможно изготавливать в виде нетканых полотен, что обеспечивает полимеру

высокую пористость и, как следствие, повышенную проницаемость [32].

Полиэтилентерефталат уже известен в процессах очистки воды [33-38] и газов [39, 40]. При изготовлении мембран ПЭТФ может использоваться в чистом и модифицированном виде [41, 42]. К модификациям ПЭТФ обычно прибегают для того, чтобы повысить его селективность в ультра- и нанофильтрационных процессах [43, 44].

В связи с ужесточением экологических требований сегодня большое внимание уделяют «зеленым» технологиям [45], а потому перспективными модификаторами ПЭТФ

могут стать природные полимеры, которые придут на смену традиционным органическим синтетическим модификаторам, например поли(N-изопропилакрил-амиду) [46] или акриловой кислоте [41]. Самым распространенным недорогим природным полимером является целлюлоза. Она уже хорошо зарекомендовала себя в мембранных разделительных процессах [47-51]. Для того чтобы проводить модификацию ПЭТФ с ее помощью, желательно целлюлозу растворить. Однако для целлюлозы есть лишь ограниченное число систем растворителей [52, 53] (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Количество компонентов в системе	Группа веществ	Примеры
Однокомпонентная	Галогениды N-алкилпиридиния	Хлорид N-этилпиридиния
	Оксиды третичных аминов	N-метилморфолин –N-оксид (NMMO); Триэтиламин–N-оксид; N-метилпиперидин –N-оксид (NMPO)
Двухкомпонентная	Растворители, содержащие ДМСО	ДМСО/метиламин; ДМСО/KSCN; ДМСО/CaCl ₂ ; ДМСО/TBAF
	Жидкий аммиак /соли натрия или аммония	NH ₃ /NaI (NH ₄ I); NH ₃ /NaSCN (NH ₄ SCN)
	Полярный апротонный растворитель / LiCl	N-диметилацетамид / LiCl; N-метилпирролидон / LiCl
	Системы, содержащие пиридин или хинолин	Пиридин / резорцин; Хинолина / Ca(SCN) ₂
Трехкомпонентная	NH ₃ или амин / соль / полярный растворитель	NH ₃ / NaCl / ДМСО
	NH ₃ или амин / SO ₂ или SOCl ₂ / полярный растворитель	Диэтиламин / SO ₂ / ДМСО

Многие из растворителей являются токсичными. В качестве безопасной альтернативы возможно использовать ионные жидкости прежде всего на основе имидазольных катионов с ацетат- или хлорид-анионами [54]. Впервые ионные жидкости использованы в качестве органических растворителей при изготовлении плоских и полволоконных мембран в 2010 году [55]. С тех пор установлено, что благоприятное воздействие на растворение целлюлозы оказывает добавление к ионным жидкостям соразтворителя, например ДМСО, ДМФА, СН₃ОН [56]. В качестве метода формовки мембран подобным способом используется метод инверсии фаз [57]. Большое влияние на структуру образующихся мембран и, как следствие, на их фильтрационные свойства оказывают используемые для растворения

ионные жидкости и соразтворители, а также нерастворители в ваннах осаждения (рис. 3).

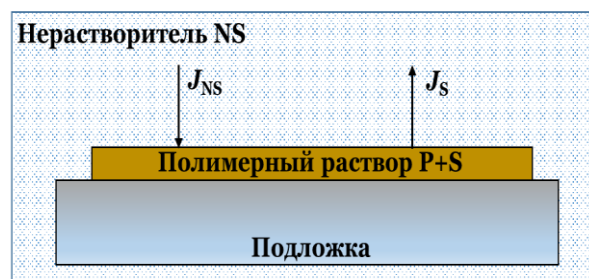


Рис. 3

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

Методы

На первом этапе работы для определения транспортных свойств целлюлозных мембран использовали сплошные коммерческие целлофановые пленки толщиной 31 мкм (ГОСТ 7730-89), СП = 200.

Для создания целлюлозных мембран использовали промышленный образец целлюлозы Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (Россия) со степенью полимеризации 600, содержанием влаги не более 8% (в равновесных условиях), содержанием альфа-целлюлозы 92%. Целлюлоза наносилась на полиэтилентерефталатное нетканое полотно (Crane Technical Materials, США). Плотность нетканого полотна 87 г/м², толщина 90–99 мкм, воздухопроницаемость 16,0–29,6 см³/см²с·кПа.

Для растворения целлюлозы использовали ионные жидкости: 1-этил-3-метилимидазолия ацетат ([Emim]Ac), 1-бутил-3-метилимидазолия ацетат. Подробные методики растворения целлюлозы и получения мембраны приведены в работах [58, 59].

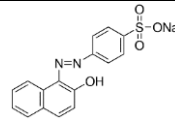
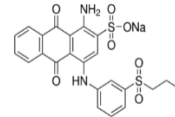
Основная проблема композиционных мембран, полученных из растворов целлюлозы в ионной жидкости, заключалась в отслаивании нанесенного слоя из-за плохой адгезии между подложечным материалом и слоем целлюлозы, а также из-за сильной усадки целлюлозы при сушке. Методика подготовки подложки ПЭТФ для ее модификации слоем целлюлозы представлена в работе [60].

Измерение сорбции (K_s , г/г) проводили путем замачивания образцов мембранных фильтров в растворителях с периодическим контролем их массы до момента ее стабилизации.

Исследование наночистратационных свойств мембранных фильтров проводилось в ячейках тупикового типа в соответствии с методикой, представленной ранее в других работах [61]. Проницаемость (P , кг·м⁻²·час⁻¹·атм⁻¹) была определена весовым методом. Для определения задерживающей способности исследуемых мембран использовали промышленные красители (Sigma-Aldrich) различной молекулярной массы (табл. 2). Данные красители близки по своей молекулярной массе к большинству анти-

биотиков, что позволяет использовать их в качестве модельных веществ. Растворы красителей готовили весовым методом, концентрация красителей составляла 30 мг/л. Кроме того, использовали водные растворы антибиотика цефтриаксон (555 г/моль) производства ОАО "Синтез" (Россия).

Т а б л и ц а 2

Краситель	Тип	Молекулярная масса, г/моль	λ , нм	Структурная формула
Orange II	Анионный	350	483	
Remazol Brilliant Blue R	Анионный	626	592	

Разделительные свойства (R , %) определены путем измерения оптической плотности растворов на спектрофотометре ПЭ 5400УФ (ПромЭкоЛаб). Характерные длины волн для измерения оптической плотности представлены в табл. 2. Формулы для расчета проницаемости и коэффициента задерживания в соответствии с [62].

Дифрактограммы получены с помощью рентгеновского источника с вращающимся медным анодом Rotaflex RU-200 (Rigaku, Япония), режим работы источника 50 кВ-160 мА. Источник был оснащен горизонтальным широкоугольным гониометром Rigaku D/Max-RC, сканирование производилось по схеме Брэгга-Брентано. В качестве детектора дифрагированного рентгеновского излучения выступал сцинтилляционный счетчик, падающее на него излучение монохроматизировалось с помощью вторичного (т.е. стоявшего на отраженном от образца пучке) фокусирующего монохроматора – изогнутого монокристалла графита. Длина волны монохроматизированного излучения составляла 1,542 ангстрем. Диапазон измерения углов дифракции – 5-35 градусов по шкале 2θ , измерение велось в режиме непрерывного сканирования со скоростью 1 град/мин и шагом 0,04 градуса. Образцы пленок закреплялись на алюминии-

ево́й ра́мке, регистра́ция дифрактограмм велась в геометрии «на отражение» (англ. «reflection mode»).

Результаты и обсуждения

Чистое нетканое полотно из ПЭТФ обладает низкой селективностью в нанофильтрационных процессах из-за своей высокой пористости. Установлено, что коэффициенты задерживания для ПЭТФ составляют 14 и 5% по модельному красителю Remazol Brilliant Blue R и антибиотику цефтриаксону соответственно. Такая селективность является крайне низкой и не позволяет использовать ПЭТФ для очистки воды. В связи с этим необходимо прибегать к дополнительным стадиям для его модификации.

Для модификации ПЭТФ в данной работе выбрана целлюлоза. С целью оценки эффективности применения данного модификатора изучены транспортные и разделительные свойства сплошных пленок на основе промышленно производимого целлофана (табл. 3).

Предварительные эксперименты проводились с использованием модельных веществ, красителей, близких по своей молекулярной массе к антибиотикам. Выявлено, что пленки из целлофана обладают почти

100% селективностью по веществам с молекулярными массами 350 и 626 г/моль (табл. 3). Это доказывает перспективность использования целлюлозы в качестве модификатора ПЭТФ мембран.

Таблица 3

Фильтруемый растворитель	S , %	P , кг/м ² ·ч·атм	R_{Orange} , % (350 г/моль)	$R_{Remazol}$, % (626 г/моль)
Вода	78	0,11	97	100

Примечание. S – сорбция, P – проницаемость, R – коэффициент задерживания.

С использованием ламинатора HLCL-1000 изготовлены композиционные ПЭТФ мембраны, представляющие собой двухслойную систему.

Большое влияние на фильтрационные свойства мембран оказывает концентрация полимера в формовочном растворе. В связи с этим исследованы две концентрации целлюлозы 10 и 14 мас. % для модификации подложек ПЭТФ. Транспортные и разделительные свойства модифицированных целлюлозой подложек ПЭТФ относительно модельных красителей и антибиотиков представлены в табл. 4.

Таблица 4

C целлюлозы, % масс.	$P_{H_2O+Remazol}$	$R_{Remazol}$	$P_{H_2O + Orange II}$	$R_{Orange II}$	$P_{цито}$	$R_{цито}$
10	0,5	75	0,5	38	0,307	39
14	0,3	81	0,3	50	0,275	51,3

Примечание. P – проницаемость, кг/м²·ч·атм; R – коэффициент задерживания, %.

В табл. 4 показано, что увеличение концентрации целлюлозы от 10 до 14% приводит к снижению проницаемости по всем исследуемым растворам, но к одновременному повышению коэффициентов задерживания на 10-30% в зависимости от растворенного вещества. В связи с этим концентрация модификатора, равная 14%, выбрана как наиболее предпочтительная.

В фильтрационных свойствах модифицированных подложек ПЭТФ ключевую роль играет нерастворитель при осаждении модификатора – целлюлозы – на поверхности нетканого ПЭТФ полотна.

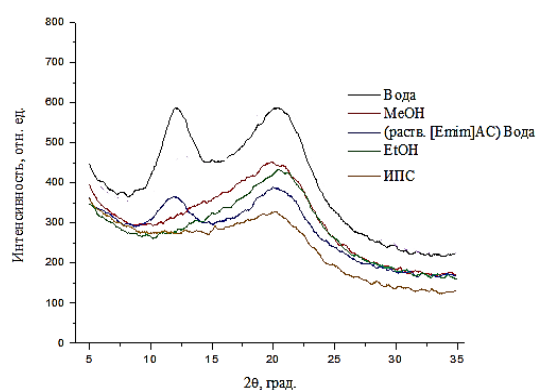


Рис. 4

Дифрактограммы целлюлозного слоя, осажденного в воде, имеют два пика, что

свидетельствует о наличии кристаллических структур (рис. 4). Для сравнения также исследованы мембраны, полученные из растворов целлюлозы в чистой [Emim]Ac и осажденные в воде.

Осаждение в спиртах приводит к образованию аморфного слоя модификатора. Можно предположить, что мембраны, осажденные в воде, будут иметь меньшую проницаемость из-за более плотной структуры. Однако противоположное влияние оказывают эффекты сорбции (табл. 5).

Таблица 5

Нерастворитель	Вода	Метанол	Этанол	Изопропанол
S целлюлозы, %	126,0	19,0	14,5	2,5

Оказалось, что целлюлоза больше всего набухает в воде (126%), в то время как наименьшую степень набухания целлюлоза имеет в изопропанол (2,5%). Вода, взаимодействуя с целлюлозой, образует водородные связи с одним или несколькими блоками ангидроглюкозы, что приводит к сильному набуханию полисахарида [61, 62].

Описанные явления приводят к неоднозначности воздействия нерастворителя в осаждающей ванне на фильтрационные свойства мембран. К тому же на фильтрационные свойства оказывает влияние взаимодействие модифицированного ПЭТФ полотна с растворенными компонентами. В связи с этим установить единую закономерность изменения проницаемости мембран от осаждающего нерастворителя не представляется возможным (рис. 5).

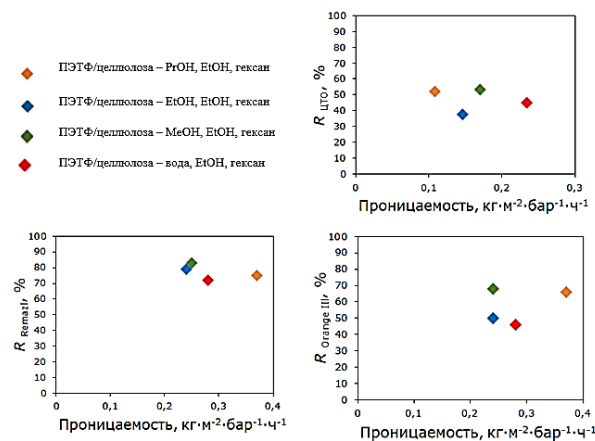


Рис. 5

При фильтрации водных растворов красителей Remazol Brilliant Blue R и Orange II проницаемость мембран уменьшалась в ряду осадителей пропанол – вода – метанол – этанол. Для водного раствора антибиотика порядок изменился. Так, в этом случае наибольшей проницаемостью обладали мембраны, осажденные в воде, а наименьшей – в пропанол. При этом для всех фильтрационных испытаний характерно, что наибольшей селективностью обладала мембрана ПЭТФ/целлюлоза – метанол – этанол – гексан. Она продемонстрировала коэффициенты задерживания по Remazol Brilliant Blue R, Orange II и цефтриаксону 83, 68, 54% соответственно.

Также проведено сравнение показателей выделения красителей и антибиотика из воды на мембранах, разработанных в работе, с литературными данными и другими традиционными методами (табл. 6).

Таблица 6

Метод/мембрана	Вещество	ММ	R, %	Вещество	ММ	R, %	Источник
Мембранная фильтрация							
ПЭТФ/целлюлоза (14%) – вода, этанол, гексан	Orange II	350	46	Цефтриаксон	555	45	н.р.
ПЭТФ/целлюлоза (14%) – метанол, этанол, гексан	Orange II	350	68	Цефтриаксон	555	53	н.р.
ПЭТФ/целлюлоза (14%) – этанол, этанол, гексан	Orange II	350	50	Цефтриаксон	555	38	н.р.

ПЭТФ/целлюлоза (14%) – ИПС, этанол, гексан	Orange II	350	66	Цефтриаксон	555	52	н.р.
UF	Норфлоксацин	319	6-34	Окситетрациклин	460	41-52	[64]
PEI 30	Сахара	350	48	Сахара	200	32	[65]
PEI 120			60			35	
NF 270	Сульфаметоксазол	253	17	Триметоприм	290	67	[66]
NL	Сульфаметоксазол	250	22	Триметоприм	290	63	
Традиционные методы							
Химический метод коагуляции (FeCl ₃)	Сульфаметоксазол	253	6	Эритромицин	733	27-51	[67]
Адсорбция активированным углем	Ципрофлоксацин	331	50	Триметоприм	290	2-62	
Биологический метод (активный ил)	Ципрофлоксацин	331	51	Норфлоксацин	319	47	

Из таблицы видно, что показатели фильтрации воды с использованием модифицированного целлюлозой ПЭТФ полотна сопоставимы с показателями, полученными с использованием других мембран, описанных в литературе, а также традиционных методов удаления загрязнителей из воды: химический метод коагуляции (FeCl₃), адсорбция активированным углем, биологический метод (активный ил) (табл. 6) [63-66].

ВЫВОДЫ

Разработаны наночистотные ПЭТФ мембраны путем их модификации целлюлозой. К сожалению, в чистом виде ПЭТФ обладали низкими селективностями по красителям и антибиотику. Полученные мембраны ПЭТФ/целлюлоза продемонстрировали высокую перспективность в наночистотных процессах. Эффективность удаления красителей и антибиотиков из воды составила до 83 и 53% соответственно. При этом большое влияние на фильтративные свойства оказывает нерастворитель, используемый для осаждения модификатора. Максимальную селективность демонстрируют мембраны, осажденные в метаноле: 83, 68, 54% по Remazol Brilliant Blue R, Orange II и цефтриаксону соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Атаманова О.В. и др. Совершенствование методов очистки сточных вод текстильных предприятий // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2022, 1, С. 83.
2. Абрамов О.В. и др. Очистка сточных вод текстильных предприятий гальванохимическим методом с использованием ультразвукового поля // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2009. №3. С. 316.
3. Евлантьев С.С., Войтюк А.А., Сахарова Н.А. Исследование методов очистки сточных вод текстильного производства от красителей // Научный потенциал регионов на службу модернизации. АИСИ. 2012, 2. С. 3.
4. Гуторова Н.В., Седяров О.И. Алгоритм расчета интегрального показателя степени негативного воздействия промышленных сточных вод на водные объекты // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2020. №2. С. 184...188.
5. Карманов А.П., Полина И.Н. Технология очистки сточных вод. М.: Инфра-Инженерия, 2018. 212 с.
6. Бугаевский К.А. Открытие и производство антибиотиков и их создатели, в отражении средств коллекционирования // Актуальные научные исследования в современном мире. 2018, 1-8, С. 53...59.
7. Sokolov A., Kråkström M., Eklund P., Kronberg L., Louhi-Kultanen M. Abatement of amoxicillin and doxycycline in binary and ternary aqueous solutions by gas-phase pulsed corona discharge oxidation // Chemical Engineering Journal. 2018, 334. P. 673...681.
8. Palacio D.A., Becerra Y., Urbano B.F., Rivas B.L. Antibiotics removal using a chitosan-based polyelectrolyte in conjunction with ultrafiltration membranes // Chemosphere. 2020, 258. P. 127416.

9. Панин А.Н. и др. Проблема резистентности к антибиотикам возбудителей болезней, общих для человека и животных // Ветеринария, зоотехния и биотехнология. 2017, 5, С. 18...24.
10. Anh H.Q., Le T.P.Q., Da Le N., Lu X.X., Duong T.T., Garnier J., Nguyen T.A.H. 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.
11. Liu X., Lu S., Guo W., Xi B., Wang W. Antibiotics in the aquatic environments: a review of lakes, China // Science of the Total Environment. 2018, 627, P. 1195...1208.
12. Ana K.M.S., Madriaga J., Espino M.P. β -Lactam antibiotics and antibiotic resistance in Asian lakes and rivers: An overview of contamination, sources and detection methods // Environmental Pollution. 2021, 275, P. 116624.
13. Singh R., Singh A.P., Kumar S., Giri B.S., Kim K.H. 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
14. Larsson D. J. Antibiotics in the environment // Upsala journal of medical sciences. 2014, 119(2), P. 108...112
15. Martinez J.L. Environmental pollution by antibiotics and by antibiotic resistance determinants // Environmental pollution. 2009, 157(11), P. 2893...2902.
16. Sulbarán Rangel B.C. et al. Nanomaterial-escelulósicos para la adsorción de contaminante-semergentes // Tecnura. 2019, 23 (62), P. 13...20.
17. Meneau-Hernández R.I. et al. Adsorción de ciprofloxacina en materiales zeolíticos // Revista Cubana de Química. 2021, 33 (1), P. 167...190.
18. Gothwal R., Shashidhar T. Antibiotic pollution in the environment: a review // Clean-Soil, Air, Water. 2015, 43(4), P. 479...489
19. Di J. et al. Novel visible-light-driven CQDs/Bi₂WO₆ hybrid materials with enhanced photocatalytic activity toward organic pollutants degradation and mechanism insight // Applied Catalysis B: Environmental. 2015, 168, P. 51...61.
20. Huang B. et al. Treatment of pharmaceutical wastewater containing β -lactams antibiotics by a pilot-scale anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) // Chemical Engineering Journal. 2018, 341, P. 238...247.
21. 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.
22. Li B., Zhang T. Biodegradation and adsorption of antibiotics in the activated sludge process // Environmental science & technology. 2010, 44 (9), P. 3468...3473.
23. Joss A. et al. Removal of pharmaceuticals and fragrances in biological wastewater treatment // Water research. 2005, 39 (14), P. 3139...3152.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. Naddeo V. et al. Fate of pharmaceuticals in contaminated urban wastewater effluent under ultrasonic irradiation // Water research. 2009, 43 (16), P. 4019...4027.
28. Абдуова А.А. и др. Анализ современного состояния вопроса исследования промышленного применения напорных гидроциклонов в области очистки сточных вод легкой промышленности // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2016. №3. С. 227...231.
29. Алоян Р.М. и др. Возможности и проблемы энергоэффективных и энергосберегающих технологий в строительстве и текстильной промышленности // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2017. №5. С. 196...198.
30. Осадчий Ю.П., Блиничев В.Н. Баромембранная очистка сточных вод, содержащих пигменты и кислотные красители // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2007, №5(301). P. 64...66.
31. Kamrani H., Nosrati A. Fabrication of nanofiber filtration membranes using polyethylene terephthalate (PET): A review // J. Membr. Sci. Technol. 2018, 8, P. 1000183.
32. Керницкий В.И., Жур Н.А. Отходы полиэтилентерефталата (ПЭТ) и перспективные направления их переработки // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2015. С. 47.
33. 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.
34. Zander N.E., Gillan M., Sweetser D. Recycled PET nanofibers for water filtration applications // Materials. 2016, 9 (4), P. 247.
35. 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.
36. Korolkov I.V. et al. Preparation of hydrophobic PET track-etched membranes for separation of oil-water emulsion // Membranes. 2021, 11 (8), P. 637.
37. 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.

38. *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.
39. *Bonfim D.P.F. et al.* A sustainable recycling alternative: Electrospun PET-membranes for air nanofiltration // *Polymers*. 2021, 13 (7), P. 1166.
40. *Lyu C. et al.* Electrospinning of nanofibrous membrane and its applications in air filtration: A review // *Nanomaterials*. – 2021, 11 (6), P. 1501.
41. *Korolkov I.V. et al.* Protein fouling of modified microporous PET track-etched membranes // *Radiation Physics and Chemistry*. 2018, 151, P. 141...148.
42. *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.
43. *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.
44. *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.
45. *Anokhina T.S. et al.* Cellulose composite membranes for nanofiltration of aprotic solvents // *Petroleum Chemistry*. 2016, 56, P. 1085...1092.
46. *Ehrenhofer A., Wallmersperger T.* Deformation Behavior of Hydrogel-layered PET Membranes // *DEMEASS VIII*. P. 14.
47. *Huang R.Y.M.* Separation of liquid mixtures by using polymer membranes. II. Permeation of aqueous alcohol solutions through cellophane and poly(vinyl alcohol) // *Journal of Applied Polymer Science*. 1970, 14(9), P. 2341...2356.
48. *Nagy E., Borlai O., Ujhidy A.* Membrane permeation of water-alcohol binary mixtures // *Journal of Membrane Science*. 1980, 7(1), P. 109...118.
49. *Ghosh I.* Pervaporation of methanol-ethylene glycol with cellophane membrane: some mechanistic aspects // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 1988, 27(10), P. 1895...1900.
50. *Teplyakov V.V., Shalygin M.G., Kozlova A.A. et al.* Membrane technology in bioconversion of lignocellulose to motor fuel components // *Petroleum Chemistry*. 2017, 57(9), P. 747...762.
51. *Loftsson T., Måsson M., Sigurdsson H.H.* Cyclodextrins and drug permeability through semi-permeable cellophane membranes // *International Journal of Pharmaceutics*. 2002, 232(1-2), P. 35...43.
52. *Burger J., Kettenbach G., Klüfers P.* Coordination equilibria in transition metal based cellulose solvents // *Macromol. Symp.* 1995, 99, P. 113...126.
53. *Heinze Th., Liebert T.* Organic solvents and sophisticated derivatives of cellulose-promising tools in cellulose chemistry // *Cellul. Chem. Technol.* 1998, 32, P. 3...18.
54. *Swatloski R.P., Spear S.K., Holbrey J.D., Rogers R.D.* Dissolution of Cellulose with Ionic Liquids // *Journal of the American Chemical Society*. 2002, 124(18), P. 4974...4975.
55. *Xing D.Y., Peng N., Chung T.S.* Formation of cellulose acetate membranes via phase inversion using ionic liquid [BMIM]SCN, as the solvent // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2010, 49(18), P. 8761...8769
56. *Zhao Y.L., Liu X.M., Wang J.J., Zhang S.J.* Insight into the cosolvent effect of cellulose dissolution in imidazolium-based ionic liquid systems // *J. Phys. Chem. B*. 2013, 117, P. 9042...9049.
57. *Xing D.Y., Peng N., Chung T.S.* Investigation of unique interactions between cellulose acetate and ionic liquid [EMIM]SCN, and their influences on hollow fiber ultrafiltration membranes // *Journal of Membrane Science*. 2011, 380(1), P. 87... 97.
58. *Anokhina T.S., Pleshivtseva T.S., Ignatenko V.Ya., Antonov S.V., Volkov A.V.* Fabrication of Composite Nanofiltration Membranes from Cellulose Solutions in an [Emim]OAc–DMSO Mixture // *Petroleum Chemistry*. 2017, 57(6), P. 477...482.
59. *Anokhina T.S., Ignatenko V.Y., Kostyuk A.V., Ilyin S.O., Volkov A.V., Antonov S.V.* Effect of coagulant nature on nanofiltration properties of cellulose membranes formed from solutions in ionic liquid // *Membranes and Membrane Technologies*. 2020, 2(3), P. 149...158.
60. *Anokhina T., Ignatenko V., Ilyin S., Antonov S., Volkov A.* Fabrication of cellulose-based composite membranes for organic solvent nanofiltration // *Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2018, 1099, P. 012039.
61. *Fidale L.C., Ruiz N., Heinze T., Seoud O.A.E.* Cellulose Swelling by Aprotic and Protic Solvents: What are the Similarities and Differences // *Macromol. Chem. Phys.* 2008, 209, P.1240...1254.
62. *Mantanis G.I., Young R.A., Rowell R.M.* Swelling of compressed cellulose fiber webs in organic liquids // *Cellulose*. 1995, 2(1), P. 1...22.
63. *Akhil D., Lakshmi D., Senthil Kumar P., Vo D.V.N., Kartik A.* Occurrence and removal of antibiotics from industrial wastewater // *Environmental chemistry letters*. 2021, 19, P. 1477...1507.
64. *Zhao S., Yao Y., Ba C., Zheng W., Economy J., Wang P.* Enhancing the performance of polyethylenimine modified nanofiltration membrane by coating a layer of sulfonated poly (ether ether ketone) for removing sulfamerazine // *Journal of Membrane Science*. 2015, 492, P. 620...629.
65. *Dolar D., Vuković A., Ašperger D., Košutić K.* Efficiency of RO/NF membranes at the removal of veterinary antibiotics // *Water Science and Technology*. 2012, 65 (2), P. 317...323.
66. *de Ilurdoz M.S., Sadhwani J.J., Reboso J.V.* Antibiotic removal processes from water & wastewater for the protection of the aquatic environment-a review // *Journal of water process engineering*. 2022, 45, P. 102474.

REFERENCES

1. *Atamanova O.V. i dr.* Sovershenstvovanie metodov ochistki stochnyh vod tekstil'nyh pred-priyatij // Voprosy sovremennoj nauki i praktiki. Universitet im. V.I. Vernadskogo. 2022, 1, P. 83.
2. *Abramov O.V. i dr.* Ochistka stochnyh vod tekstil'nyh predpriyatij gal'vanohimicheskimi metodami s ispol'zovaniem ul'trazvukovogo polya // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2009, 3, P. 316.
3. *Evlant'ev S.S., Vojtyuk A.A., Saharova N.A.* Issledovanie metodov ochistki stochnyh vod tekstil'nogo proizvodstva ot krasitelej // Nauchnyj potencial regionov na sluzhbu modernizacii. AISI. 2012, 2, P. 3.
4. *Gutorova N.V., Sedlyarov O.I.* Algorithm for calculating of the integral indicator adverse impact of the industrial waste-water on water bodies // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti. 2020, 2, P. 184...188.
5. *Karmanov A.P., Polina I.N.* Tekhnologiya ochistki stochnyh vod. Moscow: Infra-Engineering, 2018.
6. *Bugaevskij K.A.* Otkrytie i proizvodstvo antibiotikov i ih sozdateli, v otrazhenii sredstv kollekcii irovanija // Aktual'nye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire. 2018, 1-8, P. 53...59.
7. *Sokolov A., Kråkström M., Eklund P., etc.* Abatement of amoxicillin and doxycycline in binary and ternary aqueous solutions by gas-phase pulsed corona discharge oxidation // Chemical Engineering Journal. 2018, 334, P. 673...681.
8. *Palacio D.A., Becerra Y., Urbano B.F., Rivas B.L.* Antibiotics removal using a chitosan-based polyelectrolyte in conjunction with ultrafiltration membranes // Chemosphere. 2020, 258, P. 127416.
9. *Panin A.N. etc.* Problema rezistentnosti k antibiotikam vzbuditelej boleznej, obshchih dlya cheloveka i zhivotnyh // Veterinariya, zootekhnika i biotekhnologiya. 2017, 5, S. 18...24.
10. *Anh H.Q., Le T.P.Q., Da Le N., etc.* 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.
11. *Liu X., Lu S., Guo W., Xi B., Wang W.* Antibiotics in the aquatic environments: a review of lakes, China // Science of the Total Environment. 2018, 627, P. 1195...1208.
12. *Ana K.M.S., Madriaga J., Espino M.P.* β -Lactam antibiotics and antibiotic resistance in Asian lakes and rivers: An overview of contamination, sources and detection methods // Environmental Pollution. 2021, 275, P. 116624.
13. *Singh R., Singh A.P., Kumar S., Giri B.S., Kim K.H.* 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.
14. *Larsson D.J.* Antibiotics in the environment // Upsala journal of medical sciences. 2014, 119(2), P. 108...112.
15. *Martinez, J.L.* Environmental pollution by antibiotics and by antibiotic resistance determinants // Environmental pollution. 2009, 157(11), P. 2893..2902.
16. *Sulbarán Rangel B.C. et al.* Nanomaterial-escelulósicos para la adsorción de contaminantes-emergentes // Tecnura. 2019, 23 (62), P. 13...20.
17. *Meneau-Hernández R.I. et al.* Adsorción de ciprofloxacina en materiales zeolíticos // Revista Cubana de Química. 2021, 33 (1), P. 167...190.
18. *Gothwal R., Shashidhar T.* Antibiotic pollution in the environment: a review // Clean–Soil, Air, Water. 2015, 43(4), P. 479..489
19. *Di J. et al.* Novel visible-light-driven CQDs/Bi₂WO₆ hybrid materials with enhanced photocatalytic activity toward organic pollutants degradation and mechanism insight // Applied Catalysis B: Environmental. 2015, 168, P. 51...61.
20. *Huang B. et al.* Treatment of pharmaceutical wastewater containing β -lactams antibiotics by a pilot-scale anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) // Chemical Engineering Journal. 2018, 341, P. 238...247.
21. *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.
22. *Li B., Zhang T.* Biodegradation and adsorption of antibiotics in the activated sludge process // Environmental science & technology. 2010, 44 (9), P. 3468...3473.
23. *Joss A. et al.* Removal of pharmaceuticals and fragrances in biological wastewater treatment // Water research. 2005, 39 (14), P. 3139...3152.
24. *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.
25. *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.
26. *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.
27. *Naddeo V. et al.* Fate of pharmaceuticals in contaminated urban wastewater effluent under ultrasonic irradiation // Water research. 2009, 43 (16), P. 4019...4027.
28. *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 Zavedenij. Tekhnologiya Tekstil'noj Promyshlennosti. 2016, 3, P. 227...231.
29. *Aloyan R.M. et al.* Opportunities and challenges of energy efficient and energy saving technologies in the construction and textile industry // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Tekhnologiya Tekstil'noj Promyshlennosti. 2017, 5, S. 196...198.

30. *Osadchij YU.P., Blinichev V.N.* Baromembrannaya ochistka stochnyh vod, soderzhashchih pigmenty i kislotnye krasiteli // *Izvestiya Vysshih Uchebnyh Zavedenij. Tekhnologiya Tekstil'noj Promyshlennosti.* 2007, 5(301), P. 64...66.
31. *Kamrani H., Nosrati A.* Fabrication of nanofiber filtration membranes using polyethylene terephthalate (PET): A review // *J. Membr. Sci. Technol.* 2018, 8, P. 1000183.
32. *Kernickij V.I., ZHir N.A.* Othody polietilen-terefalata (PET) i perspektivnye napravleniya ih pererabotki // *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta.* 2015, P. 47.
33. *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.
34. *Zander N.E., Gillan M., Sweetser D.* Recycled PET nanofibers for water filtration applications // *Materials.* 2016, 9 (4), P. 247.
35. *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.
36. *Korolkov I.V. et al.* Preparation of hydrophobic PET track-etched membranes for separation of oil-water emulsion // *Membranes.* 2021, 11 (8), P. 637.
37. *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.
38. *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.
39. *Bonfim D.P.F. et al.* A sustainable recycling alternative: Electrospun PET-membranes for air nanofiltration // *Polymers.* 2021, 13 (7), P. 1166.
40. *Lyu C. et al.* Electrospinning of nanofibrous membrane and its applications in air filtration: A review // *Nanomaterials.* 2021, 11 (6), P. 1501.
41. *Korolkov I.V. et al.* Protein fouling of modified microporous PET track-etched membranes // *Radiation Physics and Chemistry.* 2018, 151, P. 141...148.
42. *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.
43. *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.
44. *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.
45. *Anokhina T.S. et al.* Cellulose composite membranes for nanofiltration of aprotic solvents // *Petroleum Chemistry.* 2016, 56, P. 1085...1092.
46. *Ehrenhofer A., Wallmersperger T.* Deformation Behavior of Hydrogel-layered PET Membranes // *DEMEASS VIII.* P. 14.
47. *Huang R.Y.M.* Separation of liquid mixtures by using polymer membranes. II. Permeation of aqueous alcohol solutions through cellophane and poly(vinyl alcohol) // *Journal of Applied Polymer Science.* 1970, 14(9), P. 2341...2356.
48. *Nagy E., Borlai O., Ujhidy A.* Membrane permeation of water-alcohol binary mixtures // *Journal of Membrane Science.* 1980, 7(1), P. 109...118.
49. *Ghosh I.* Pervaporation of methanol-ethylene glycol with cellophane membrane: some mechanistic aspects // *Industrial & Engineering Chemistry Research.* 1988, 27(10), P. 1895...1900.
50. *Tepliyakov V.V., Shalygin M.G., Kozlova A.A. et al.* Membrane technology in bioconversion of lignocellulose to motor fuel components // *Petroleum Chemistry.* 2017, 57(9), P. 747...762.
51. *Lofsson T., Másson M., Sigurdsson H.H.* Cyclodextrins and drug permeability through semi-permeable cellophane membranes // *International Journal of Pharmaceutics.* 2002, 232(1-2), P. 35...43.
52. *Burger J., Kettenbach G., Klüfers P.* Coordination equilibria in transition metal based cellulose solvents // *Macromol. Symp.* 1995, 99, P. 113...126.
53. *Heinze Th., Liebert T.* Organic solvents and sophisticated derivatives of cellulose-promising tools in cellulose chemistry // *Cellul. Chem. Technol.* 1998, 32, P. 3...18.
54. *Swatloski R.P., Spear S.K., Holbrey J.D., Rogers R.D.* Dissolution of Cellulose with Ionic Liquids // *Journal of the American Chemical Society.* 2002, 124(18), P. 4974...4975.
55. *Xing D.Y., Peng N., Chung T.S.* Formation of cellulose acetate membranes via phase inversion using ionic liquid [BMIM]SCN, as the solvent // *Industrial & Engineering Chemistry Research.* 2010, 49(18), P. 8761...8769.
56. *Zhao Y.L., Liu X.M., Wang J.J., Zhang S.J.* Insight into the cosolvent effect of cellulose dissolution in imidazolium-based ionic liquid systems // *J. Phys. Chem. B.* 2013, 117, P. 9042...9049.
57. *Xing D. Y., Peng N., Chung T.S.* Investigation of unique interactions between cellulose acetate and ionic liquid [EMIM]SCN, and their influences on hollow fiber ultrafiltration membranes // *Journal of Membrane Science.* 2011, 380(1), P. 87... 97.
58. *Anokhina T.S., Pleshivtseva T.S., Ignatenko V.Ya., et al.* Fabrication of Composite Nanofiltration Membranes from Cellulose Solutions in an [Emim]OAc-DMSO Mixture // *Petroleum Chemistry.* 2017, 57(6), P. 477...482.
59. *Anokhina T.S., Ignatenko V.Y., Kostyuk A.V., et al.* Effect of coagulant nature on nanofiltration properties of cellulose membranes formed from solutions in

ionic liquid // Membranes and Membrane Technologies. 2020, 2(3), P. 149...158.

60. *Anokhina T., Ignatenko V., Ilyin S., Antonov S., Volkov A.* Fabrication of cellulose-based composite membranes for organic solvent nanofiltration // Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2018, 1099, P. 012039.

61. *Fidale L.C., Ruiz N., Heinze T., Seoud O.A.E.* Cellulose Swelling by Aprotic and Protic Solvents: What are the Similarities and Differences // Macromol. Chem. Phys. 2008, 209, P. 1240...1254.

62. *Mantanis G.I., Young R.A., Rowell R.M.* Swelling of compressed cellulose fiber webs in organic liquids // Cellulose. 1995, 2(1), P. 1...22.

63. *Akhil D., Lakshmi D., Senthil Kumar P., Vo D.V.N., Kartik A.* Occurrence and removal of antibiotics from industrial wastewater // Environmental chemistry letters. 2021, 19, P. 1477...1507.

64. *Zhao S., Yao Y., Ba C., Zheng W., Economy J., Wang P.* Enhancing the performance of polyethyleneimine modified nanofiltration membrane by coating a layer of sulfonated poly (ether ether ketone) for removing sulfamerazine // Journal of Membrane Science. 2015, 492, P. 620...629.

65. *Dolar D., Vuković A., Ašperger D., Košutić K.* Efficiency of RO/NF membranes at the removal of veterinary antibiotics // Water Science and Technology. 2012, 65 (2), P. 317...323.

66. *de Ilurdoz M.S., Sadhwani J.J., Reboso J.V.* Antibiotic removal processes from water & wastewater for the protection of the aquatic environment-a review // Journal of water process engineering. 2022, 45, P. 102474.

Рекомендована лабораторией №18 полимерных мембран Института нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН. Поступила 04.12.2023.