УДК 66.081.6
DOI 10.47367/0021-3497_2024_6_197

СШИТЫЙ ПО ДВОЙНОМУ МЕХАНИЗМУ АЛЬГИНАТ НАТРИЯ КАК УСТОЙЧИВЫЙ К РАСТВОРЕНИЮ В ВОДЕ МОДИФИКАТОР НЕТКАНОГО ФИЛЬТРУЮЩЕГО ПОЛОТНА *

DOUBLE-CROSS-LINKED SODIUM ALGINATE AS A WATER-RESISTANT MODIFIER OF NON-WOVEN FILTER FABRIC*

Е.С. ДМИТРИЕВА, А.П. НЕБЕССКАЯ, Е.А. ГРУШЕВЕНКО, А.А. ЮШКИН, Т.С. АНОХИНА, А.В. ВОЛКОВ

E.S. DMITRIEVA, A.P. NEBESSKAYA, E.A. GRUSHEVENKO, A.A. YUSHKIN, 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

Разработка способов очистки вод от загрязнителей различного типа является важной задачей современности. Данный вопрос актуален как для бытовых стоков, фармацевтических, так и для всех отраслей промышленности, включая текстильную. Для решения задачи разработаны мембранные фильтры на основе нетканого полотна из полиэтилентерефталата (ПЭТФ). Исследование фильтрационных характеристик велось не только в тупиковом, но и в проточном режиме. С целью повышения селективности ПЭТФ в разделительных процессах исследовано несколько способов модификаций. Основным модификатором стал природный полимер альгинат натрия, который подвергали различной сшивке. Показано, что модификация альгинатом позволяет повысить коэффициенты задерживания мембранных фильтров на основе нетканого полотна с 13 до 99%. Однако применение только ионной сшивки недостаточно для получения устойчивых фильтров. Они оказываются чувствительными к наличию катионов натрия в разделяемой среде, в связи с чем демонстрируют нестабильность свойств при очистке вод от антибиотика цефтриаксона натрия. Применение двойной сшивки (ионной и глутеральдегидом) позволило получить устойчивые мембранные ПЭТФ фильтры со стабильными во времени фильтрационными характеристиками. Наиболее оптимальным по соотношению проницаемости (0,90 кг/(м^2·атм·ч) по воде), коэффициентов задерживания (92 и 95% по цефтриаксону и азитромицину соответственно) и коэффициента восстановления потока (90%) оказался фильтр ПЭТФ-AlgAl+GTA.

.

Developing methods for purifying water from various types of pollutants is an important task of our time. This issue is important for domestic wastewater, pharmaceuticals, and all industries, including textiles. To solve the problem, membrane filters were developed. They are based on non-woven fabric made of polyethylene terephthalate (PET). The study of filtration characteristics was carried out not only in dead-end but also in flow modes. Several modification methods were investigated.

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

Their purpose was to increase the selectivity of PET in separation processes. The main modifier was a natural polymer, sodium alginate. It was subjected to various cross-linking. Modification with alginate allows increasing the rejection coefficients of membrane filters based on non-woven fabric from 13 to 99%. However, the use of ionic cross-linking alone is not enough to obtain stable filters. They are sensitive to the presence of sodium cations in the separated medium. The filters demonstrate instability of properties when purifying water from the antibiotic sodium ceftriaxone. The use of double crosslinking (ionic and gluteraldehyde) made it possible to obtain stable PET membrane filters with filtration characteristics that are stable over time. The most optimal filter in terms of permeability (0,90 kg/(m^2·bar·h) for water), rejection (R) (92 and 95% for ceftriaxone and azithromycin, respectively) and flux recovery ratio (FRR) (90%) was the PET-AlgAl+GTA filter.

Ключевые слова: полиэтилентерефталат, фильтрующее полотно, нанофильтрация, антибиотики, красители, модификация, альгинат натрия, ионная сшивка, глутеральдегид.

Keywords: polyethylene terephthalate, fabric filter, nanofiltration, antibiotics, dyes, modification, alginate sodium, ionic crosslinking, gluteraldehyde.

Загрязнение водной среды является одной из проблем современности. Основной вклад в загрязнения вносит ускорение темпов развития промышленности, в том числе и текстильной [1], а также увеличение количества бытовых стоков с ростом населения. Например, в процессе покраски и отделки тканей образуется примерно 200...350 м^3 сточных вод на 1 тонну продукта [2]. Стоки от разных источников имеют сложный и разнообразный состав, и очень важны разработки методов очистки, которые позволили бы одновременно бороться с загрязнителями различной природы.

В текстильной промышленности одними из наиболее распространенных загрязнителей вод являются красители [3]. В стоках от хлопчатобумажной промышленности они находятся в концентрации 50…60 мг/л [4]. В основном красители появляются после процессов печати и крашения [5]. Данные загрязнители, безусловно, требуют удаления перед сбросом сточных вод в окружающую среду. При этом важно, что данному вопросу, как и в целом экологическому потенциалу предприятий, в последнее время уделяется большое внимание [6].

Хорошие результаты по очистке вод от красителей дает применение мембранной технологии [7]. Это не только эффективный процесс, но еще и ресурсосберегающий. Так, количество потребляемой свежей воды удается снизить на 70%. Кроме этого, мембранная очистка позволяет применять красители повторно в цикле с коэффициентами возврата 80...90% [8]. Более того, данный метод очистки не требует применения повышенных температур, что значительно снижает затраты энергии.

Одновременно с этим мембранная технология хорошо себя зарекомендовала в борьбе с наиболее опасными загрязнителями бытовых стоков – антибиотиками [9…11]. Главная опасность загрязнения окружающей среды антибиотиками заключается в появлении резистентности у микроорганизмов. Это приводит к снижению эффективности используемых лекарств и росту заболеваний среди населения [12…15].

Таким образом, мембранная технология является перспективным методом для решения проблемы очистки сточных вод от загрязнителей различного типа. Размеры молекул красителей и антибиотиков при этом находятся примерно в одном диапазоне и соответствуют размерам частиц, удаляемых в процессе нанофильтрации (НФ). Так, НФ способна удалять из растворов вещества с ММ менее 1000 г/моль.

Важный вопрос при разработке нанофильтрационного процесса заключается в выборе мембраны. С промышленной точки зрения важно, чтобы она была изготовлена из доступных материалов. Кроме этого, она

должна обладать высокими проницаемостями, селективностью, химической и механической устойчивостью, устойчивостью к загрязнениям. Данным характеристикам вполне удовлетворяют нетканые полотна на основе полиэтилентерефталата (ПЭТФ). При этом важно отметить, что ПЭТФ часто используется вторичным после процесса повторной переработки его отходов [16].

ПЭТФ широко применяется при изготовлении мембран [17]. Его используют для осуществления разнообразных мембранных процессов, например, мембранной дистилляции [18], ультра- [19] и нанофильтрации [20], при очистке воды [21] и воздуха [22].

ПЭТФ в чистом виде обычно отличается крупной пористостью, высокой проницаемостью и, как следствие, низкими селективностями. В связи с этим исследователи прибегают к различного рода модификациям. Одним из наиболее популярных методов является поверхностное покрытие ПЭТФ полимерами или неорганическими частицами [23, 24].

В одной из более ранних работ нами описано применение в качестве модификатора для ПЭТФ альгината натрия [25]. Этот природный полимер является недорогим, производимым на территории России [26]. Он хорошо известен в процессах нанофильтрационного разделения [27…29]. Важное преимущество альгината перед другими возможными модификаторами заключается в его водорастворимости, что позволяет использовать воду в качестве растворителя при получении мембран [30]. Это снижает количество используемых токсичных веществ. Данный факт становится особенно важным в связи с общими тенденциями снижения негативного воздействия на организм сотрудников [31], что способствует повышению производительности труда в отрасли [32].

В предыдущей работе [25] показана перспективность подобной модификации для очистки вод от красителей. Однако ранее не удалось достичь высоких показателей при очистке вод от загрязнителей другого рода, например, антибиотиков. Максимальный коэффициент задерживания составлял 69%. При этом он был достигнут в условиях кратковременной фильтрации (менее 1,5 часов) в тупиковом режиме. В данной работе выполнен поиск альтернативных способов модификации ПЭТФ путем изменения сшивающих агентов для альгината натрия.

Цель данной работы заключается в разработке способа модификации нетканого фильтрующего полотна ПЭТФ, который позволил бы достичь высоких и стабильных результатов при нанофильтрационной очистке вод от загрязнителей различного характера.

Материалы и методы исследования

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

ПЭТФ волокно модифицировали альгинатом натрия (Rhône-Poulenc, Франция). Для первичной сшивки альгината применяли неорганические соли I-III-валентных металлов: $CaCl_2 \cdot 2H_2O$, $AlCl_3 \cdot 6H_2O$, $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (Химмед, РФ), $AgNO_3$. Вторичную сшивку производили глутаровым альдегидом (50% водный раствор, Русхим, РФ) в присутствии соляной кислоты (Химмед, РФ). Отмывку мембран проводили дистиллированной водой и метанолом (Химмед, РФ).

Для исследования разделительных свойств мембранных фильтров применяли модельные красители Remazol Brilliant Blue R (626 г/моль) и Orange II (350 г/моль) производства Sigma Aldrich (Германия), растворенные в дистиллированной воде с концентрацией 100 мг/л. Данные красители моделируют компоненты сточных вод текстильной промышленности. Кроме того, они близки по своей молекулярной массе ко многим антибиотикам. Использовали антибиотики цефтриаксон (555 г/моль) и азитромицин (748 г/моль) производства ОАО «Синтез» (Россия). Цефтриаксон растворяли в дистиллированной воде в концентрации 100 мг/л. Азитромицин в воде нерастворим. В связи с этим его растворение в концентрации 100 мг/л проводили в смеси этанол/вода (50/50 об.).

Модификацию ПЭТФ полотна с использованием ионного вида сшивки проводили

по следующей методике. На первом этапе изготавливали раствор альгината натрия с концентрацией 10% масс. ч. в дистиллированной воде. Растворение проводили в течение одной недели при комнатной температуре и непрерывном перемешивании. После достижения раствором гомогенного состояния проводили нанесение гидрогеля альгината натрия на поверхность нетканого ПЭТФ полотна с использованием ракли с зазором 0,2 мм. Нанесенный на поверхность ПЭТФ гидрогель альгината натрия обрабатывали в водных растворах солей одно-, двух- и трехвалентных металлов с концентрацией сшивающего аниона 0,35…0,50 моль-экв/л в течение 30 минут. Полученную мембрану отмывали в воде в течение 12 часов. Далее мокрую мембрану применяли в фильтрационных испытаниях.

Двойную модификацию ПЭТФ проводили по методике, описанной выше, добавляя к ней сшивку мембран глутаровым альдегидом. После отмывки мембрану помещали в водный раствор, содержащий 10% мас. ч. глутарового альдегида и 0,5% соляной кислоты, на 240 минут. После мембрану отмывали в 50% мас. ч. водном растворе метанола в течение 24 часов. Затем вымачивали в воде 12 часов. Мокрую мембрану применяли в фильтрационных испытаниях.

Для удобства введены условные обозначения фильтрующих полотен в зависимости от наличия модификации и вида сшивки: ПЭТФ, ПЭТФ-AgAlg, ПЭТФ-CaAlg, ПЭТФ-CuAlg, ПЭТФ-AlAlg, ПЭТФ-FeAlg. Образцы, модифицированные только первичной ионной сшивкой, обозначаются ПЭТФ-AlgMe. При наличии двойной сшивки с использованием глутарового альдегида (GTA) в шифрах появляется его обозначение: ПЭТФ-AgAlg+GTA, ПЭТФ-CaAlg+GTA, ПЭТФ-CuAlg+GTA, ПЭТФ-AlAlg+GTA, ПЭТФ-FeAlg+GTA. Общий шифр для образцов, модифицированных двойной сшивкой: ПЭТФ-AlgMe+GTA. Рядом с шифром образца в скобках может быть указана концентрация сшивающего катиона (0,35) или (0,50) в единицах измерения моль-экв/л.

Исследование нанофильтрационных свойств мембранных фильтров проводили в двух режимах. Первичные эксперименты с использованием модельных красителей осуществляли в ячейках тупикового типа. Диаметр мембран составлял 58 мм. Давление 30 атм нагнеталось гелием. Смесь, находящаяся в ячейках, постоянно перемешивалась магнитными мешалками для обеспечения равномерной концентрации веществ в растворах. Данный подход позволил собрать данные для выбора оптимального способа модификации ПЭТФ полотна.

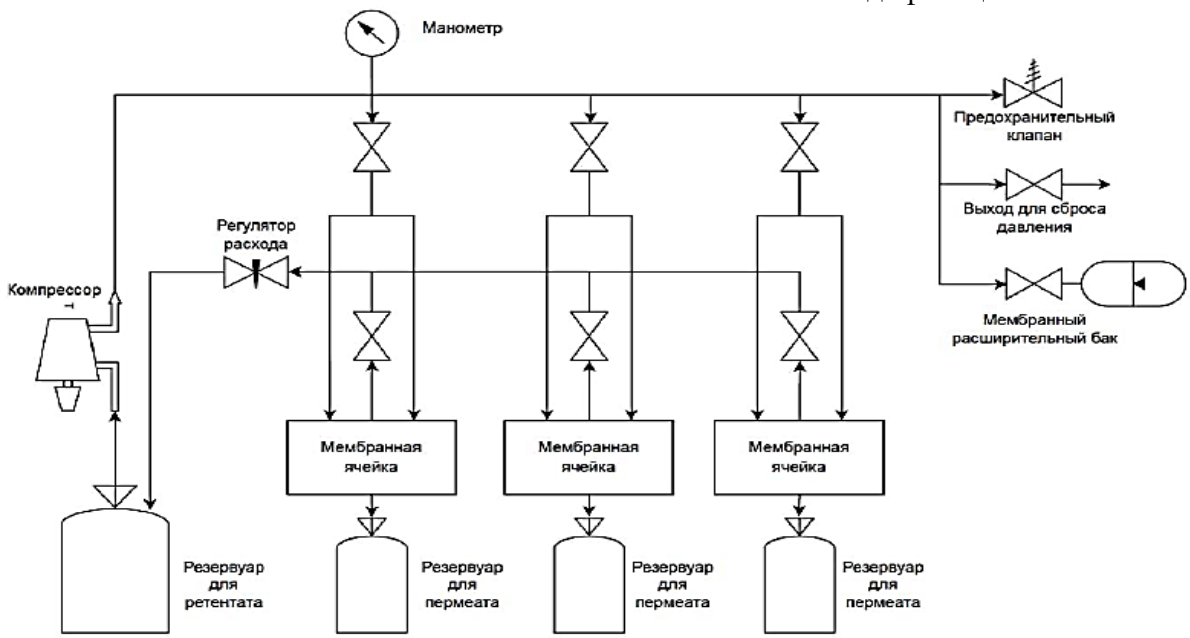


Рис. 1

Основные эксперименты по удалению из вод антибиотиков проводили на лабораторном стенде для исследования фильтрационных свойств плоских мембран в проточном режиме фильтрации (рис. 1).

Установка включает в себя три мембранные ячейки проточного типа, на которых производится разделение. Для осуществления равномерности распределения среды по поверхности мембраны каналы для подачи среды раздвоены и подведены к мембранной ячейке с двух сторон. Выход пермеата осуществлен из нижней части ячейки. Пермеат собирается в специальную емкость. Ретентат удаляется из верхней части ячейки и направляется в цикл. Давление в системе создается при помощи мембранного проточного насоса. Для устранения колебаний давления в гидравлической системе в установку включен мембранный расширительный бак, в который давление воздуха закачивается согласно заданному (30 атмосфер).

Поток пермеата в обоих режимах ведения нанофильтрации 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:

$$P = \frac{m}{S \Delta t \Delta p}, \qquad (1)$$

где m – масса пермеата (кг), прошедшего через мембранный фильтр с площадью S (м^2) за промежуток времени Δt (ч); Δp – перепад давления.

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:

$$R = 1 - \frac{C_{\text{р}}}{C_0} \cdot 100\ \%, \qquad (2)$$

где C_0 и $C_{\text{Р}}$ – концентрация растворенного вещества в питающем потоке и пермеате соответственно.

Концентрацию модельного красителя Remazol Brilliant Blue R определяли при длине волны λ=592 нм, Orange II – λ=483 нм, антибиотика цефтриаксона – λ=370 нм, антибиотика азитромицина – λ=540 нм.

Для определения устойчивости мембран к загрязнениям рассчитывали коэффициент восстановления потока (FRR). Для этого оценивали проницаемость по дистиллированной воде модифицированного ПЭТФ полотна после фильтрации растворов. Мембранные фильтры предварительно промывали дистиллированной водой. Расчет FRR вели по формуле:

$$FRR = \frac{P_{\text{вода.нач}}}{P_{\text{вода.кон}}} \cdot 100\%, \qquad (3)$$

где $P_{\text{вод. нач}}$ – проницаемость по воде до фильтрации растворов красителей/антибиотиков; $P_{\text{вод.кон}}$ – проницаемость по воде после фильтрации растворов.

Результаты и обсуждения

Ранее уже было показано [25], что при модификации ПЭТФ полотна ионно-сшитыми альгинатами между ними не происходит химических взаимодействий, что подтверждено данными ИК-спектрометрии. Полученные мембранные фильтры представляют собой двухслойную систему, соединенную за счет физических взаимодействий. Толщина альгинатного слоя равна примерно 15 мкм.

Фильтрационные исследования в ячейках тупикового типа показывают, что применение модификаторов значительно повышает селективность мембранных фильтров в процессах нанофильтрации (табл. 1). Это связано с крупной пористостью ПЭТФ, обусловленной волокнистой структурой полотна, не способной задерживать низкомолекулярные вещества. При нанесении модификатора верхний селективный слой становится плотным и непористым, что значительно повышает сопротивление, приводя к снижению проницаемостей, но одновременно положительно сказывается на селективных свойствах.

Таблица 1

Мембранный фильтр	Концентрация металла в осадителе, моль-экв/л	$P_{вода}$, кг/(м^2·атм·ч)	$R_{Remazol\ Brilliant\ Blue\ R}$, %	$R_{Orange\ II}$, %
ПЭТФ	-	11	13	7
ПЭТФ-AlgAg	0,35	1,50	83	63
	0,50	2,67	90	68
ПЭТФ-AlgCa	0,35	0,02	91	70
	0,50	0,50	98	75
ПЭТФ-AlgCu	0,35	0,40	19	5
	0,50	1,00	75	45
ПЭТФ-AlgAl	0,35	0,67	45	23
	0,50	1,30	99	56
ПЭТФ-AlgFe	0,35	0,90	88	50
	0,50	1,30	99	55

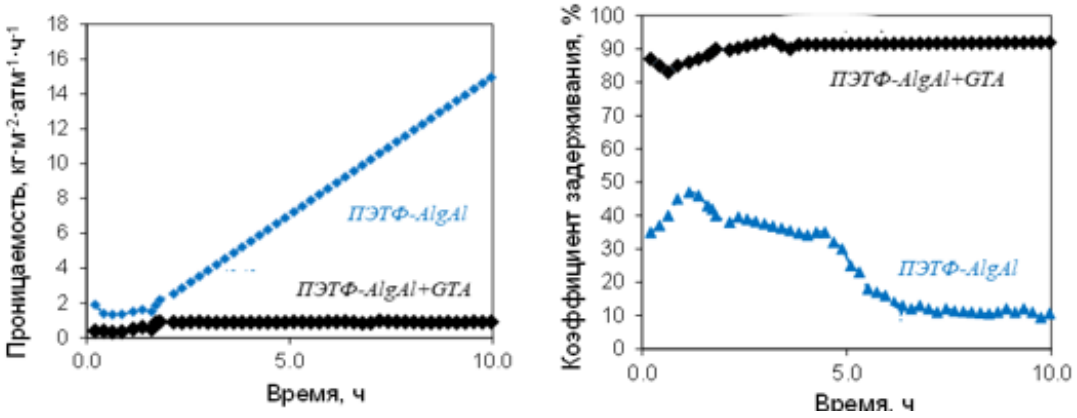
На данном этапе исследования проводили по дистиллированной воде и растворам модельных красителей. Проницаемость ПЭТФ по воде составляет 11 кг/(м^2·атм·ч). Задерживание модельного красителя Remazol Brilliant Blue R для ПЭТФ равно 13%. Проницаемости всех модифицированных образцов ПЭТФ-AlgMe значительно ниже и составляют 0,02…2,67 кг/(м^2·атм·ч). При этом коэффициент задерживания по Remazol Brilliant Blue R во всех случаях, кроме ПЭТФ-AlgCu (0,35), составляет от 45 до 99%.

В целом можно отметить тенденцию зависимости фильтрационных свойств и от сшивающего катиона, и от его концентрации в сшивающем растворе. Увеличение концентрации сшивающего катиона с 0,35 до 0,5 моль-экв/л в осадительной ванне положительно сказывается на величинах проницаемости и коэффициента задерживания модельных красителей. Так, во всех случаях проницаемость возрастает минимум вдвое, коэффициент задерживания по Ремазолу для альгинатов трехвалентных металлов приближается к 100%.

Для дальнейших исследований была выбрана концентрация сшивающего катиона 0,5 моль-экв/л. При изменении сшивающего катиона в ряду Cu-Ag-Ca-Al-Fe коэффициенты задерживания по Remazol Brilliant Blue R растут от 75 до 99%. Стоит отметить, что более проницаемыми оказались мембраны на основе AlgAg, AlgAl и AlgFe. В случае альгината меди наблюдается вымывание сшивающего катиона из мембраны. В этой связи дальнейшие исследования с этим образцом не проводились. Остальные мембраны продемонстрировали стабильные разделительные характеристики при фильтрации воды и водных растворов модельных красителей.

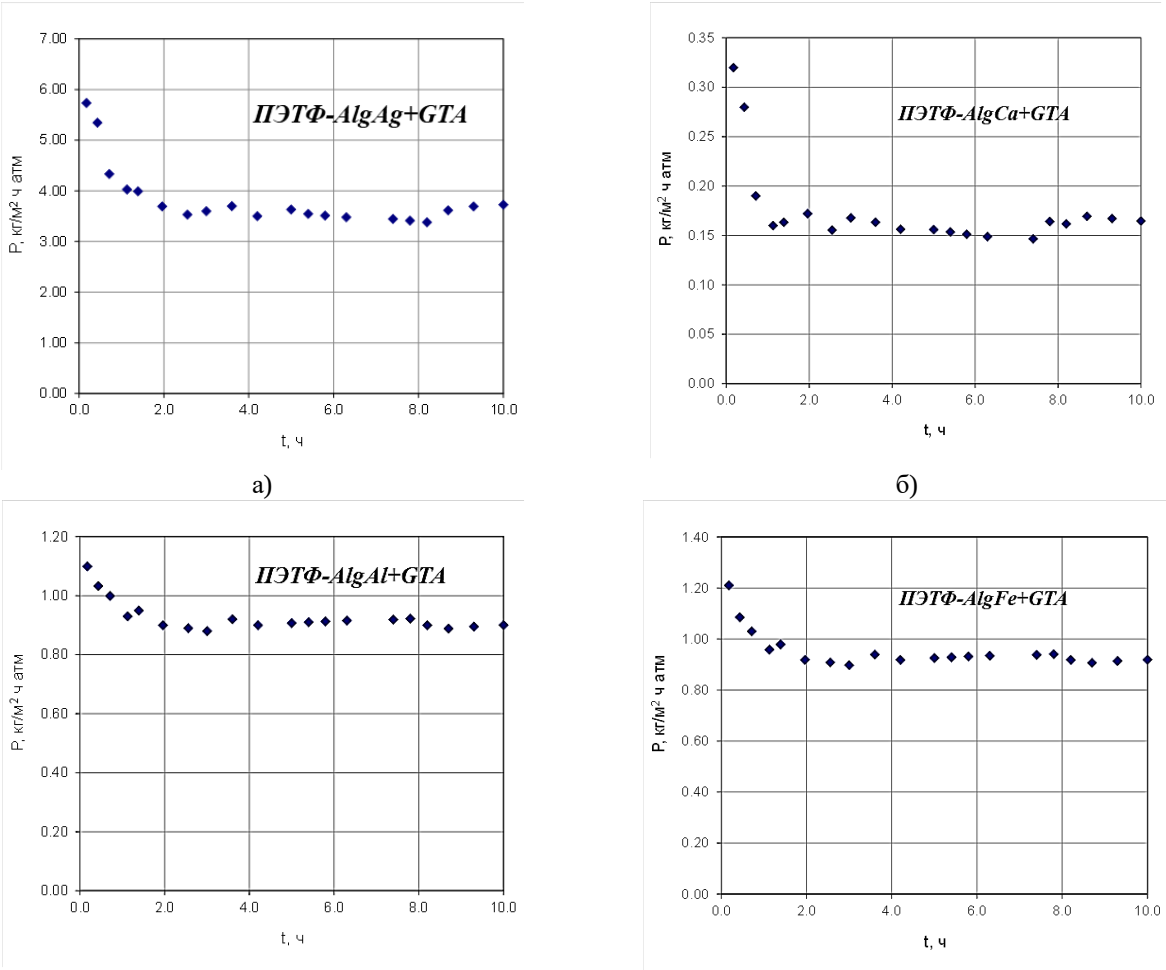
Предварительные испытания по выделению цефтриаксона натрия из водного раствора через мембраны на основе сшитых катионами металлов альгинатов продемонстрировали нестабильность разделительных характеристик, связанную с реакцией замещения натрия на сшивающий катион в матрице альгината при взаимодействии с цефтриаксоном вне зависимости от типа сшивающего катиона. В присутствии ионов натрия в растворе происходит размывание слоя альгината металла на поверхности мембраны, приводящее к увеличению проницаемости мембраны и снижению коэффициентов задерживания до 10…15%, что соответствует величине коэффициента задержания нетканого полотна ПЭТФ. В этой связи исследовано влияние дополнительной сшивки альгината трехвалентного металла глютаровым альдегидом. Как показано в работах [33, 34], применение глутарового альдегида (GTA) позволяет перевести альгиновую кислоту в водонерастворимую форму.

Исследованный метод двойной сшивки слоя модификатора оказался успешным в повышении устойчивости мембранных фильтров на основе ПЭТФ. Фильтрационные испытания в проточном режиме по очистке воды от цефтриаксона натрия продемонстрировали стабильную работу образцов ПЭТФ-AlgMe+GTA, что показано на рис. 2 на примере ПЭТФ, модифицированного сшитым альгинатом алюминия.



а) б)

Рис. 2



а) б)

в) г)

Рис. 3

Дополнительная сшивка альгината алюминия с помощью GTA позволила стабилизировать транспортные и разделительные свойства данного материала при фильтрации раствора цефтриаксона. Несмотря на снижение проницаемости по воде с 1,3 до 0,9 кг/(м^2·атм·ч) наблюдается повышение коэффициента задержания антибиотика цефтриаксона с 40% до 92%. Более того, в течение 10 часов фильтрации проницаемость и коэффициент задерживания остаются стабильными и не показывают тенденции к

увеличению и снижению соответственно. Аналогичные свойства устойчивости характеристик во времени демонстрируют и другие образцы ПЭТФ, модифицированного альгинатом с двойной сшивкой (рис. 3).

В целом по образцам ПЭТФ-AlgMe+GTA установлено, что при фильтрации водного раствора, содержащего 100 мг/л цефтриаксона, в течение 10 часов поток воды отклоняется от среднего не более чем на 15% и не имеет выраженной тенденции к снижению и увеличению, что свидетельствует о стабильной работе мембран. Начальное снижение проницаемости мембран связано с релаксацией мембран в воде.

Использование двойной сшивки позволило не только повысить стабильность мембран, но и достичь достаточно высоких значений проницаемости мембранных фильтров и коэффициентов задерживания (табл. 2).

Таблица 2

Мембранный фильтр	P вода, кг/(м^2·атм·ч)	R цефтриаксон, %	R азитромицин, %	FRR, %
ПЭТФ-AlgAg + GTA	3,70	66	82	90
ПЭТФ-AlgCa + GTA	0,16	56	80	95
ПЭТФ-AlgAl + GTA	0,90	92	95	90
ПЭТФ-AlgFe + GTA	0,92	88	95	70

Наиболее проницаемыми оказались мембранные фильтры, сшитые серебром и глутеральдегидом, – ПЭТФ-AlgAg+GTA. Их проницаемость по воде составила 3,7 кг/(м^2·атм·ч). Однако данные фильтры продемонстрировали сниженную селективность при задерживании из раствора цефтриаксона (66%), в связи с чем их нельзя считать оптимальными. Высокими коэффициентами задерживания 88…95% по обоим исследованным антибиотикам обладают ПЭТФ-AlgAl+GTA и ПЭТФ-AlgFe+GTA. Проницаемость данных фильтров по воде является практически одинаковой и составляет 0,90…0,92 кг/(м^2·атм·ч). Главное отличие между ними заключается в устойчивости к загрязнениям. Так, ПЭТФ, модифицированный сшитым альгинатом алюминия, в сравнении с ПЭТФ, модифицированным сшитым альгинатом железа, продемонстрировал более высокий коэффициент восстановления потока – 90% против 70%. Совокупность полученных экспериментальных данных позволяет в качестве оптимального способа модифицирования ПЭТФ выбрать покрытие из альгината, сшитого по двойной методике: последовательно катионами алюминия и глутеральдегидом.

ВЫВОДЫ

Разработанные мембранные фильтры на основе ПЭТФ способны производить очистку воды от растворенных веществ с молекулярными массами 350…738 г/моль. Нанесение альгината, сшитого по ионному механизму, позволило добиться достаточно высоких коэффициентов задерживания модельных красителей (до 99%). Однако данные фильтры не выдержали испытаний по очистке воды от растворенного антибиотика цефтриаксона натрия.

Более оптимальным признано применение двойной сшивки модифицирующего ПЭТФ слоя: катионами металлов и глутеральдегидом. Все полученные образцы демонстрировали стабильную проницаемость в течение 10 часов фильтрации при трансмембранном давлении 30 атм. Однако в зависимости от сшивающего катиона наблюдались разные проницаемости, селективности и коэффициенты восстановления потока. Оптимальным по соотношению всех трех характеристик оказался мембранный фильтр ПЭТФ-AlgAl+GTA. Его проницаемость по воде составила 0,90 кг/(м^2·атм·ч), коэффициенты задерживания по антибиотикам цефтриаксону и азитромицину равны 92 и 95% соответственно. Степень восстановления потока после фильтрации антибиотиков составила 90%, что свидетельствует о хорошей устойчивости фильтра к загрязнителям.

Таким образом, продемонстрирована возможность и перспективность применения модифицированного полотна ПЭТФ

для задачи очистки сточных вод от загрязнителей различной природы, а именно от красителей и антибиотиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абдуганиев Н.Н., Мирзаева Г.С., Тешабоев А.М., Жалилов Л.С.* Влияние текстильной промышленности на экологию // In Conference Zone. 2022. P. 61…65

2. *Умаров Б.Н.У., Нарзуллаева А.М., Норова М.С.* Сорбенты, модифицированные хитозаном для очистки сточных вод текстильных предприятий // Universum: технические науки. 2024, 7(2 (119)). С. 9…14.

3. *Глубокая А.С., Атаманова О.В.* Глинистые сорбционные материалы для очистки сточных вод текстильного предприятия // Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения: сб-к науч. тр. 3-й всерос. науч.-практ. конф. Саратов, 2021. С. 134…137.

4. *Кузнецова К.А.* Анализ методов очистки сточных вод от красителей // Мой вклад в науку. 2022. С. 52.

5. *Юсупов А.А., Алибекова М.* Характеристики и методы очистки сточных вод текстильной, полиграфической и красильной промышленности в городе Андижан // Universum: технические науки. 2024, 1(6 (123)). С. 38…43.

6. *Иващенко Н.С.* Моделирование оценки экологического потенциала как инструмента управления устойчивым развитием организации // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2024. №1(409). С. 173…179.

7. *Moradihamedani P.* Recent advances in dye removal from wastewater by membrane technology: a review // Polymer Bulletin. 2022, 79(4). P. 2603…2631

8. *Горюнов В.С., Ковалевская А.Э.* Отечественные и зарубежные научные достижения в области очистки сточных вод красильно-отделочных фабрик текстильной промышленности // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности. 2023. С. 156…160.

9. *Yang L., Xia C., Jiang J. etc.* Removal of antibiotics and estrogens by nanofiltration and reverse osmosis membranes /// Journal of Hazardous Materials. 2024, 461. P. 132628.

10. *Guo X., Zhao B., Wang L. etc.* High flux nanofiltration membrane via surface modification using spirocyclic quaternary ammonium diamine for efficient antibiotics/salt separation // Separation and Purification Technology. 2023, 325. P. 124736.

11. *Liu Z., Wen H., Jiang S. etc.* A comparative study of antibiotic treatment by different charged nanofiltration membranes // Desalination. 2024. P. 118316.

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

13. *Laxminarayan R. et al.* The Lancet Infectious Diseases Commission on antimicrobial resistance: 6 years later // The Lancet Infectious Diseases. 2020, 20 (4). P. e51…e60.

14. *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.

15. *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.

16. *Kirshanov K., Toms R., Aliev G. etc.* Recent developments and perspectives of recycled poly (ethylene terephthalate)-based membranes: A Review // Membranes. 2022, 12(11). P. 1105.

17. *Ling T.S., Abidin M.N.Z., Ma'amor A. etc.* Polyethylene terephthalate membrane: A review of fabrication techniques, separation processes, and modifications // Separation and Purification Technology. 2024. P. 129343.

18. *Shakayeva A.K., Yeszhanov A.B., Zhumazhanova A.T. etc.* Fabrication of Hydrophobic PET Track-Etched Membranes using 2, 2, 3, 3, 4, 4, 4-Heptafluorobutyl Methacrylate for Water Desalination by Membrane Distillation // Eurasian journal of chemistry. 2024.

19. *Hut N.A., Goh P.S., Ahmad N.A., etc.* Surface decoration of polyethylene terephthalate (PET) waste bottle-derived ultrafiltration membrane for enhanced lead ion removal and antifouling properties // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2024, 12(1). P. 111766.

20. *Kiani S., Mousavi S.M., Bidaki A.* Preparation of polyethylene terephthalate/xanthan nanofiltration membranes using recycled bottles for removal of diltiazem from aqueous solution // Journal of Cleaner Production. 2021, 314. P. 128082.

21. *Khashij M., Mokhtari M., Dalvand A. etc.* 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.

22. *Bonfim D.P., Cruz F.G., Bretas R.E. etc.* A sustainable recycling alternative: Electrospun PET-membranes for air nanofiltration // Polymers. 2021, 13(7). P. 1166

23. *Shengming M.A., Liang Z., Xingfan W.A.N.G. etc.* Fabrication of Organic-inorganic Composite Nanofiltration Membrane Based on PET Ion Track Membrane // Nuclear Physics Review. 2023, 40(1). P.92…98.

24. *Hut N.A., Goh P.S., Ahmad N.A. etc.* Surface decoration of polyethylene terephthalate (PET) waste bottle-derived ultrafiltration membrane for enhanced lead ion removal and antifouling properties // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2024,12(1). P. 111766.

25. *Дмитриева Е.С., Небесская А.П., Грушевенко Е.А. и др.* Модифицированное нетканое фильтрующее полотно на основе ПЭТФ для очистки

воды // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2023. № 6(408). С. 163…175.

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

27. *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.

28. *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.

29. *Dmitrieva E.S. et al.* Crosslinked Sodium Alginate as a Material for Nanolfiltration Protonic and Aprotonic Solvents // Key Engineering Materials. 2021, 899, P. 745…751.

30. *Smidsrød O.* Solution properties of alginate // Carbohydrate research. 1970, 13(3). P. 359…372.

31. *Римшин В.И., Калайдо А.В., Семенова М.Н. и др.* Радиационные риски на предприятиях текстильной промышленности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2023. № 4 (406). С. 185…191.

32. *Король Е.А., Кустикова Ю.О., Смирнов Д.А.* Анализ производственных факторов, влияющих на микроклимат в зданиях текстильной промышленности // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2023. № 4 (406). С. 191…199.

33. *Yeom C.K., Lee K.H.* Characterization of sodium alginate membrane crosslinked with glutaraldehyde in pervaporation separation // Journal of applied polymer science. 1998, 67(2). P. 209… 219.

34. *Kulkarni A.R., Soppimath K.S., Aralaguppi M.I. et al.* Preparation of cross-linked sodium alginate microparticles using glutaraldehyde in methanol // Drug development and industrial pharmacy. 2000, 26(10). P. 1121…1124.

R E F E R E N C E S

1. *Abduganiev N.N., Mirzaeva G.S., Teshaboev A.M., ZHalilov L.S.* Vliyanie Tekstil'noj Promyshlennosti Na Ekologiyu // In Conference Zone. 2022. P. 61…65.

2. *Umarov B.N.U., Narzullaeva A.M., Norova M.S.* Sorbenty, modificirovannye hitozanom dlya ochistki stochnyh vod tekstil'nyh predpriyatij // Universum: tekhnicheskie nauki. 2024, 7(2 (119)). P. 9…14.

3. *Glubokaya A.S., Atamanova O.V.* Glinistye sorbcionnye materialy dlya ochistki stochnyh vod tekstil'nogo predpriyatiya // Ekologicheskiy monitoring opasnykh promyshlennykh ob"yektov: sovremennyye dostizheniya, perspektivy i obespecheniye ekologicheskoy bezopasnosti naseleniya. Saratov, 2021, P. 134…137.

4. *Kuznecova K.A.* Analiz metodov ochistki stochnyh vod ot krasitelej // Moj vklad v nauku. 2022. P. 52.

5. *Yusupov A.A., Alibekova M.* Harakteristiki i metody ochistki stochnyh vod tekstil'noj poligraficheskoj i krasil'noj promyshlennosti v gorode Andizhan // Universum: tekhnicheskie nauki. 2024, 1(6(123)). P. 38…43.

6. *Ivashchenko N.S.* Modeling the assessment of environmental potential as a tool for managing the sustainable development of an organization // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2024, (1). P. 173…179.

7. *Moradihamedani P.* Recent advances in dye removal from wastewater by membrane technology: a review // Polymer Bulletin. 2022, 79(4). P. 2603…2631.

8. *Goryunov V.S., Kovalevskaya A.E.* Otechestvennye i zarubezhnye nauchnye dostizheniya v oblasti ochistki stochnyh vod krasil'no-otdelochnyh fabrik tekstil'noj promyshlennosti // Aktual'nye problemy stroitel'stva, ZHKKH i tekhnosfernoj bezopasnosti. 2023. P. 156…160.

9. *Yang L., Xia C., Jiang J. et al.* Removal of antibiotics and estrogens by nanofiltration and reverse osmosis membranes /// Journal of Hazardous Materials. 2024, 461. P. 132628.

10. *Guo X., Zhao B., Wang L. et al.* High flux nanofiltration membrane via surface modification using spirocyclic quaternary ammonium diamine for efficient antibiotics/salt separation // Separation and Purification Technology. 2023, 325. P. 124736.

11. *Liu Z., Wen H., Jiang S. et al.* A comparative study of antibiotic treatment by different charged nanofiltration membranes // Desalination. 2024. P. 118316.

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

13. *Laxminarayan R. et al.* The Lancet Infectious Diseases Commission on antimicrobial resistance: 6 years later // The Lancet Infectious Diseases. 2020, 20 (4). P. e51…e60.

14. *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.

15. *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.

16. *Kirshanov K., Toms R., Aliev G. et al.* Recent developments and perspectives of recycled poly (ethylene terephthalate)-based membranes: A Review // Membranes. 2022, 12(11). P. 1105.

17. *Ling T.S., Abidin M.N.Z., Ma'amor A. et al.* Polyethylene terephthalate membrane: A review of fabrication techniques, separation processes, and modifications // Separation and Purification Technology. 2024, P. 129343.

18. *Shakayeva A.K., Yeszhanov A.B., Zhumazhanova A.T. et al.* Fabrication of Hydrophobic PET Track-Etched Membranes using 2, 2, 3, 3, 4, 4, 4-Heptafluorobutyl Methacrylate for Water Desalination by

Membrane Distillation // Eurasian journal of chemistry. 2024.

19. *Hut N.A., Goh P.S., Ahmad N.A. et al.* Surface decoration of polyethylene terephthalate (PET) waste bottle-derived ultrafiltration membrane for enhanced lead ion removal and antifouling properties // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2024, 12(1). P. 111766.

20. *Kiani S., Mousavi S.M., Bidaki A.* Preparation of polyethylene terephthalate/xanthan nanofiltration membranes using recycled bottles for removal of diltiazem from aqueous solution // Journal of Cleaner Production. 2021, 314. P. 128082.

21. *Khashij M., Mokhtari M., Dalvand A. 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.

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

23. *Shengming M.A., Liang Z., Xingfan W.A.N.G. et al.* Fabrication of Organic-inorganic Composite Nanofiltration Membrane Based on PET Ion Track Membrane // Nuclear Physics Review. 2023, 40(1). P. 92…98

24. *Hut N.A., Goh P.S., Ahmad N.A. et al.* Surface decoration of polyethylene terephthalate (PET) waste bottle-derived ultrafiltration membrane for enhanced lead ion removal and antifouling properties // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2024,12(1). P. 111766.

25. *Dmitrieva E.S., Nebesskaya A.P., Grushevenko E.A. et al.* Modified non-woven filter fabric based on pet for water purification // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2023, 6. P.163…175.

26. *Tabakaeva O.V., Tabakaev A.V.* Biologicheski aktivnye veshchestva potencial'no promyslovyh buryh vodoroslej Dal'nevostochnogo regiona // Voprosy pitaniya. 2016, 85 (3). P. 126…132.

27. *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.

28. *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.

29. *Dmitrieva E.S. et al.* Crosslinked Sodium Alginate as a Material for Nanolfiltration Protonic and Aprotonic Solvents // Key Engineering Materials. 2021, 899, P. 745…751.

30. *Smidsrød O.* Solution properties of alginate // Carbohydrate research. 1970, 13(3). P. 359…372.

31. *Rimshin V.I., Kalajdo A.V, Semenova M.N. et al.* Radiation risks in the textile industry // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2023, № 4 (406). P. 185...191.

32. *Korol E.A., Kustikova YU.O., Smirnov D.A.* Analysis of production factors affecting the microclimate in textile industry buildings // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2023. № 4 (406). P. 191…199.

33. *Yeom C.K., Lee K.H.* Characterization of sodium alginate membrane crosslinked with glutaraldehyde in pervaporation separation // Journal of applied polymer science. 1998, 67(2). P. 209… 219.

34. *Kulkarni A.R., Soppimath K.S., Aralaguppi M.I. et al.* Preparation of cross-linked sodium alginate microparticles using glutaraldehyde in methanol // Drug development and industrial pharmacy. 2000, 26(10). P. 1121…1124.

Рекомендована лабораторией №18 полимерных мембран Института нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН. Поступила 02.12.24.