

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 66.081.63

doi: 10.26907/2542-064X.2024.2.187-209

МЕМБРАНЫ НА ОСНОВЕ ЦЕЛЛОФАНА ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДНЫХ СРЕД ОТ ЗАГРЯЗНИТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ

*А.А. Юшкин, А.П. Небеская, Е.А. Грушевенко, А.О. Малахов,
Т.С. Анохина, А.В. Волков*

*Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук,
г. Москва, 119991, Россия*

Аннотация

В работе исследован процесс нанофильтрационной очистки воды от органических загрязнителей различной природы. В качестве мембраны в работе использована целлофановая пленка – материал на основе дешевого природного сырья. В качестве модельных веществ, от которых очищали воду, рассмотрены красители сафранин О, оранжевый П и ремазол бриллиантовый синий Р, характеризующиеся различной молекулярной массой, химическим составом и зарядом, а также антибиотик цефтриаксон. Показано, что проницаемость целлофана по воде составляет 0.145 ± 0.017 кг/(м²·ч·атм). При этом мембраны из целлофана хорошо задерживают из водных сред растворенные органические вещества анионного типа, содержащие кислотные группы. При выделении из воды анионных красителей оранжевый П и ремазол бриллиантовый синий Р коэффициенты задержания составили 97 ± 2 и $99 \pm 1\%$ соответственно. В случае катионного красителя сафранин О наблюдали отрицательные значения коэффициентов задержания на уровне $-7 \pm 3\%$. В то же время, для антибиотика цефтриаксона коэффициент задержания составил всего $41 \pm 5\%$, что обусловлено его высоким сродством к целлофану и стерическими ограничениями.

Ключевые слова: мембрана, целлофан, антибиотик, цефтриаксон, краситель, фильтрация, фракционирование.

Введение

В настоящее время многие водные ресурсы оказываются в той или иной степени загрязненными компонентами антропогенного происхождения, включая бытовые, сельскохозяйственные и промышленные сточные воды [1], объемы которых постоянно увеличиваются [2]. При этом далеко не всегда системы очистки стоков модернизируются согласно возникающей дополнительной нагрузке. Поэтому в окружающую среду попадает широкий ряд загрязнителей различной природы: соли тяжелых металлов, поверхностно-активные вещества, нефтепродукты, красители, органические растворители и т. д. [3]. Присутствие этих соединений в источниках питьевой воды, таких как реки и грунтовые воды, ухудшает качество воды и создает серьезные проблемы в работе существующих систем очистки воды [4].

Среди большого числа загрязнителей водной среды одни из лидирующих позиций занимают синтетические красители и антибиотики. Высокая устойчивость синтетических красителей к воздействию света, температуры, моющих средств и микробов [5, 6] приводит к их накоплению в окружающей среде и негативному воздействию на состояние экосистемы [7, 8]. Появление в XX в. антибиотиков и их активное применение в медицине, животноводстве и рыбоводстве привело к мировому росту объемов производства, что, в свою очередь, привело к попаданию антибиотиков в окружающую среду и накопление в ней. Присутствие антибиотиков установлено в поверхностных и грунтовых водах, почвах и даже живых организмах [9]. Эта проблема актуальна для всего мира, что подтверждается исследованиями состояния окружающей среды в разных странах и регионах [10–12]. В большинстве случаев накопление антибиотиков приводит к возникновению резистентности у микроорганизмов, что снижает эффективность медикаментозной терапии при лечении различных заболеваний [13].

Таким образом, водоочистка от токсичных органических веществ, в частности синтетических красителей и антибиотиков, является важной задачей настоящего времени. Методы очистки промышленных сточных вод могут различаться в зависимости от их состава, происхождения и конкретного предприятия [4]. Для решения этой задачи применяют сорбцию [14–17], фотодеградацию [18–20], биодеградацию [21–26], коагуляцию и флокуляцию [27–29], ультразвуковое облечение [30, 31] и химическую очистку [32].

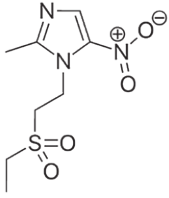
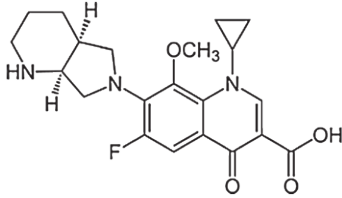
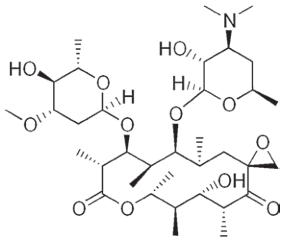
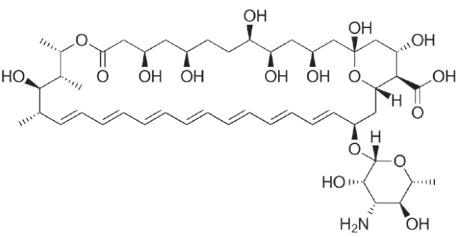
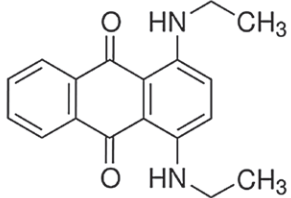
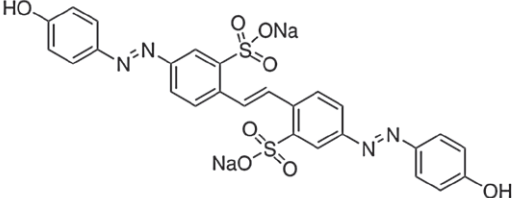
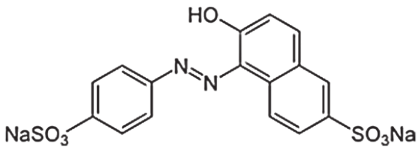
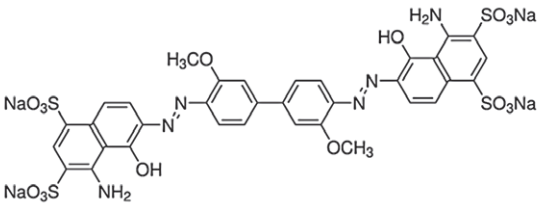
В последнее время большое внимание уделяют энергоэффективным и энергосберегающим технологиям [33]. В этой связи значительный интерес представляют баромембранные методы разделения [34]. Они не требуют реагентов, характеризуются низкими энергетическими затратами, нечувствительны к условиям окружающей среды, отличаются высокой эффективностью, модульностью и экономичностью [21, 35]. Кроме того, широкие возможности масштабирования баромембранных установок позволяют использовать их как на крупных предприятиях, так и на небольших заводах.

В зависимости от размеров загрязнителей, подлежащих удалению, различают следующие баромембранные процессы: микрофльтрация, ультрафльтрация, нанофльтрация и обратный осмос. Исходя из того, что молекулярная масса большинства красителей и антибиотиков находится в диапазоне 250–1000 г/моль (табл. 1), баромембранный процесс их выделения относится к области нанофльтрации. В научной литературе имеется ряд работ, которые свидетельствуют о высокой эффективности процесса нанофльтрации при очистке воды от красителей [36, 37] и антибиотиков [38–40].

В то же время большинство существующих нанофльтрационных мембран изготавливается из синтетических полимеров. Например, в работе [41] были получены нанофльтрационные мембраны из полиимида. Мембраны обладали повышенной устойчивостью к загрязнениям. Для удаления сульфамеризина предложены композиционные мембраны из полиэтиленimina и полиэфирэфиркетона [42]. Однако использование синтетических полимеров само по себе является источником проблем, так как в этом случае возникает проблема накопления и утилизации использованных мембран. С этой точки зрения более экологически безопасным подходом представляется использование мембран на основе природных материалов.

Табл. 1

Структурные формулы и молярные массы некоторых антибиотиков и красителей

Антибиотики	
	
Тинидазол 247 г/моль	Моксифлоксацин 438 г/моль
	
Олеандомицин 688 г/моль	Амфотерицин В 924 г/моль
Красители	
	
Solvent Blue 59 294 г/моль	Бриллиантовый желтый 625 г/моль
	
Желтый «солнечный закат» FCF 452 г/моль	Эванса (голубой) 960 г/моль

Самым распространенным и недорогим природным полимером является целлюлоза. Она хорошо зарекомендовала себя в мембранных разделительных процессах [43–46]. Однако на этапе формовки из нее мембран возникают определенные трудности, связанные со сложностью подбора растворителя для полимера [47–49]. Поэтому интересной альтернативой является использование для изготовления мембран других полимеров, но происходящих из того же природного сырья, к числу которых относятся вискоза и целлофан.

Целлофан (ксантогенат целлюлозы) является важным промышленным полимером, который представляет собой прозрачный, гибкий и прочный листовой материал, содержащий 12–16% глицерина в качестве пластификатора. Целлофан используют в различных отраслях – от упаковки продуктов до медицины и косметологии. В ряде работ [50–53] показано, что целлофан можно применять в качестве мембраны для разделения газов и жидкостей. Этот полимер хорошо изучен в процессе переработки [54, 55]. Показана эффективность целлофана для удаления из воды спиртов [56] и уксусной кислоты [57], а также применимость в диализе [58]. Известно, что целлофан является проницаемым для аминокислот [59, 60].

Цель данной работы заключается в оценке возможности применения целлофановых пленок в качестве нанофильтрационных мембран для очистки водных сред от загрязнителей разной природы, а именно от красителей и антибиотиков. Использование в качестве мембран недорогого промышленного материала – целлофана, производимого из природного сырья, отвечает последним тенденциям в области охраны окружающей среды и снижения нагрузки на нее.

1. Материалы и методы

В качестве мембранного материала в работе использовали промышленную целлофановую пленку толщиной 31 мкм (изготовлена согласно ГОСТ 7730-89, Россия). В качестве растворенных веществ в работе рассмотрены три распространенных красителя – сафранин О, оранжевый II и ремазол бриллиантовый синий Р, а также антибиотик цефтриаксон (6R-[6 α ,7 β (Z)]-7-[[[(2-амино-4-тиазолил)(метоксиимино)ацетил]амино]-8-оксо-3-[[[(1,2,5,6-тетрагидро-2-метил-5,6-диоксо-1,2,4-триазин-3-ил)тио]метил]-5-тиа-1-азабицикло[4.2.0]окт-2-ен-2-карбоновая кислота в виде динатриевой соли). Структурные формулы и некоторые характеристики растворенных веществ, используемых в работе, представлены в табл. 2.

При помещении целлофановой пленки в воду происходило увеличение ее размеров в результате сорбции воды (набухание). Как было показано ранее [61–63], это приводит к увеличению межцепных расстояний, что положительно сказывается на проницаемости. Набухание материала характеризуется степенью набухания S_D . Для определения степени набухания образцов пленок целлофана в воде вырезали прямоугольные образцы, для которых определяли их начальные геометрические параметры (длину, ширину, толщину). Как было отмечено ранее, обычно в промышленно производимом целлофане содержится 12–16% глицерина, добавляемого в качестве пластификатора. С целью удаления глицерина целлофановые образцы вымачивали в течение ночи в дистиллированной воде, после чего помещали в новую порцию дистиллированной воды еще на 24 ч. После этого снова измеряли геометрические размеры образцов. Степень набухания целлофана в воде рассчитывали по уравнению 1:

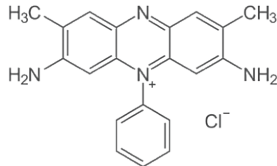
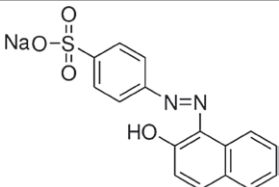
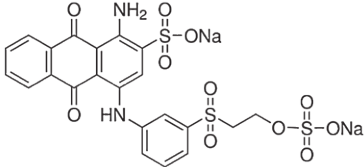
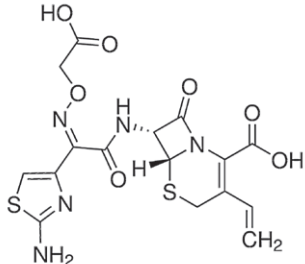
$$S_D = \frac{lbh - l_0b_0h_0}{l_0b_0h_0} \times 100\%, \quad (1)$$

где l , b , h – длина, ширина и толщина исходных (l_0 , b_0 , h_0) и набухших (l , b , h) образцов соответственно.

Толщина использованной в работе целлофановой пленки в сухом состоянии равна 31 ± 1 мкм. Измерения проводились на микрометре Mitutoyo 273 Quick Step (Mitutoyo, Япония).

Табл. 2

Некоторые характеристики органических соединений, используемых в работе

Краситель	Тип	Молекулярная масса, г/моль	λ , нм	Структурная формула
Сафранин О	Катионный	351	530	
Оранжевый II	Анионный	350	483	
Ремазол бриллиантовый синий Р	Анионный	626	592	
Цефтриаксон	Анионный	599	355	

Для количественного описания взаимодействия в системе вода–растворенное вещество–целлофан в работе был использован коэффициент распределения (K) растворенного вещества между водой и мембраной [64, 65], который выражали как отношение равновесных концентраций вещества в растворе ($[\text{Вещество}]_0$) и в целлофане ($[\text{Вещество}]_m$) (уравнение 2):

$$K = \frac{[\text{Вещество}]_m}{[\text{Вещество}]_0} = \frac{m_s / V}{[\text{Вещество}]_0}, \quad (2)$$

где m_s – масса сорбированного вещества, V – объем набухшего образца.

Объем набухшего образца определяли аналогично методике определения степени набухания. Представленные в статье значения коэффициентов распределения представлены как среднее значение из как минимум трех независимых экспериментов с использованием различных образцов.

Для этого предварительно измеряли вес и размеры исходного сухого образца целлофана, после чего помещали его в дистиллированную воду на 24 ч. Затем образец помещали в емкость с определенным объемом исследуемого раствора с концентрацией растворенного вещества 10 мг/л. Емкость герметично запечатывали и оставляли на 24 ч. Для расчета массы сорбированного растворенного вещества определяли его концентрацию в растворе до (c_0) и после (c_1) экспозиции в нем образца. Концентрацию вещества в растворе определяли спектрофотометрически при длине волны, соответствующей максимальному поглощению (данные указаны в табл. 1), на спектрофотометре ПЭ-5400УФ (Экохим, Россия).

Массу сорбированного вещества определяли по уменьшению его концентрации в окружающем растворе согласно уравнению 3:

$$m_s = \frac{c_0 m_0 - c_1 m_1}{\rho}, \quad (3)$$

где m_0 – масса раствора в начале эксперимента, m_1 – масса раствора в конце эксперимента, ρ – плотность раствора.

Процесс фильтрации через целлофан проводили с использованием установки тупикового типа. Ячейки, используемые для исследования процесса фильтрации, были оснащены системой перемешивания с магнитным приводом. Активная площадь мембраны в ячейке составляла 33.2 см². Перед установкой в ячейку пленку целлофана вымачивали в воде в течение 24 ч, после чего из набухшей пленки вырезали образец нужного размера и помещали в ячейку. В процессе вырезания и помещения в ячейку целлофан постоянно смачивали небольшим количеством дистиллированной воды, чтобы предотвратить его высыхание. Объем раствора, помещаемого в фильтрационную ячейку, составлял 900 мл. В качестве разделяемой среды в работе исследовали растворы красителей, указанных в табл. 1, и цефтриаксона с концентрацией 10 мг/л в дистиллированной воде. Фильтрацию проводили при комнатной температуре и трансмембранном давлении до 30 атм. Давление над мембраной создавали подачей в ячейку гелия. Все эксперименты проводили не менее чем на трех образцах целлофановых пленок.

Количество пермеата (жидкость, прошедшая через целлофановую пленку) измеряли весовым методом. Бюкс для сбора пермеата крепили к выходному патрубку ячейки таким образом, чтобы, с одной стороны, минимизировать испарение собираемой жидкости, а с другой – не допустить увеличения давления в подмембранном пространстве. Эффективность мембраны характеризовали ее проницаемостью (P), которую рассчитывали по уравнению 4:

$$P = \frac{m}{S \times \Delta t \times \Delta p}, \quad (4)$$

где m – масса пермеата (кг), прошедшего через мембрану с площадью S (м²) за промежуток времени Δt (ч) и при перепаде давления Δp .

Эффективность разделения характеризовали коэффициентом задержания R (%), который рассчитывали по уравнению 5:

$$R = \left(1 - \frac{c_0}{c_p}\right) \times 100\%, \quad (5)$$

где c_0 и c_p – концентрация растворенного вещества в исходной смеси и пермеате соответственно.

2. Результаты и обсуждение

Согласно результатам измерений геометрических размеров образцов целлофана, степень его набухания в воде составляет $76 \pm 5\%$. Это значение ниже, чем для каучуков в органических растворителях [62], но существенно выше, чем для таких стеклообразных полимеров, как полиакрилонитрил или полиимид, и сопоставимо со значениями для высокопроницаемых стеклообразных полимеров, таких как поли[1-(триметилсилил)-1-пропин] [91]. Такие значения степени набухания позволяют рассчитывать на то, что целлофан может обеспечить неплохую проницаемость материала в процессе фильтрации.

Несмотря на большие значения степени набухания, пленки целлофана сохраняют механические свойства, достаточные для использования в качестве фильтрующего элемента. На первом этапе работы были проведены фильтрационные эксперименты с использованием дистиллированной воды для определения проницаемости. Как можно видеть на рис. 1, наблюдается выполнение закона Дарси, т. е. линейная зависимость изменения потока жидкости от приложенного давления при перепаде давлений на мембране до значений 30 атм. Рассчитанное значение проницаемости по воде составило 0.145 ± 0.017 кг/(м²·ч·атм).

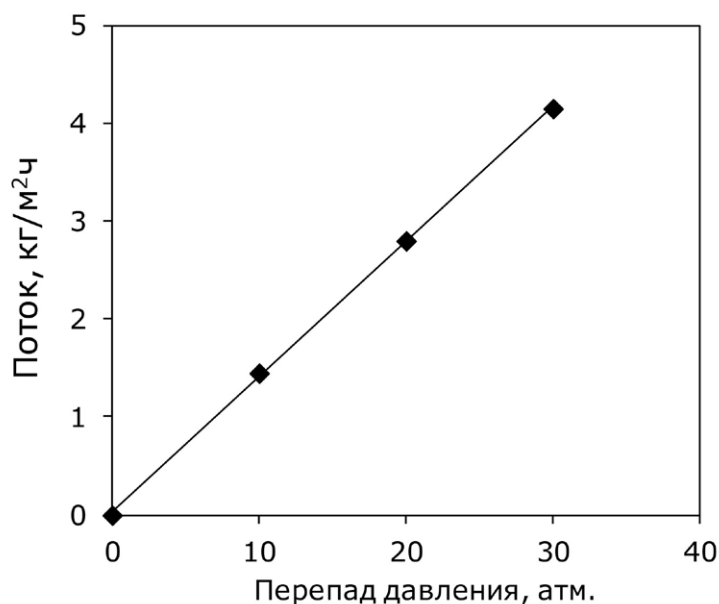


Рис. 1. Зависимость потока дистиллированной воды через пленку из целлофана от приложенного трансмембранного давления

Исследование влияния растворенного вещества на разделительные характеристики мембран на основе коммерческого целлофана проведено на ряде органических соединений катионной или анионной природы с молекулярной массой в диапазоне от 350 до 626 г/моль (табл. 2). Следует отметить, что при переходе от воды к водным растворам, содержащим выбранные растворенные органические вещества, значения проницаемости снижались на 5–12%. Такое снижение не связано с появлением в системе осмотического давления или засорением мембраны, так как использованные в работе концентрации слишком малы для оказания заметного влияния. В ходе проведения фильтрации выбранных соединений

были получены зависимости коэффициентов задержания от времени с момента начала эксперимента (рис. 2).

Как можно видеть на рис. 2, коэффициенты задержания R для двух анионных красителей – оранжевый II ($R = 97 \pm 2\%$) и ремазол бриллиантовый синий Р ($R = 99 \pm 1\%$) – демонстрировали стабильно высокие значения с начала эксперимента. Для антибиотика цефтриаксон требуется чуть больше 2 ч для достижения стационарных значений, а также наблюдается снижение значения коэффициента задержания с 83 до 41%. Максимальное время выхода на стационарные значения получено в случае катионного красителя сафранин О, для которого коэффициент задержания снижался с 84% до отрицательных значений в течение более 10 ч.

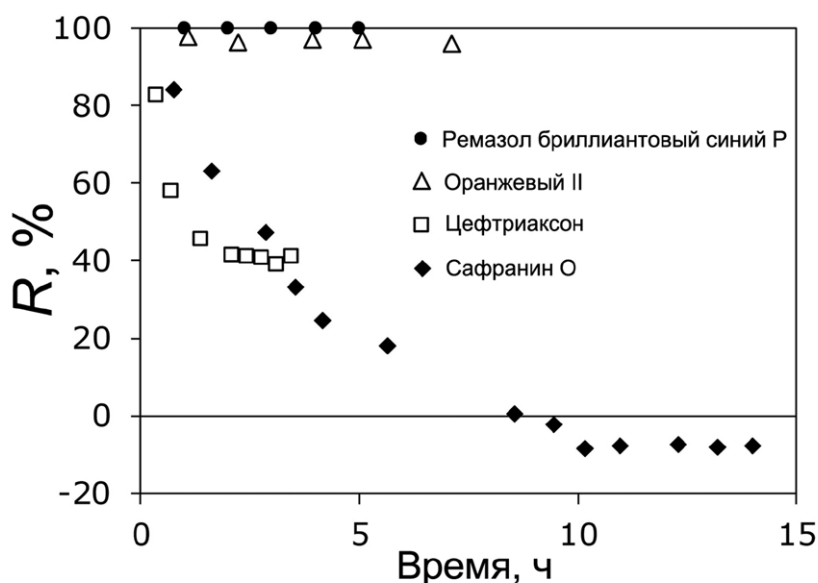


Рис. 2. Изменение коэффициента задержания R во времени (трансмембранное давление 20 атм.)

В случае катионного красителя сафранин О получены коэффициенты задержания на уровне -7% (табл. 3). Другими словами, при фильтрации водного раствора данного красителя через целлофан происходило обогащение водного раствора более крупным растворенным соединением (возрастание концентрации на 7%). Явление «отрицательного задержания» достаточно распространено в процессе нанофильтрации водных и органических сред [64, 66, 67] и может реализоваться в случае, когда растворенное соединение имеет большее сродство к материалу мембраны по сравнению с растворителем. При переходе от катионного красителя сафранин О (351 г/моль) к анионному красителю оранжевый II (350 г/моль), значения коэффициента задержания достигают 97% , т. е. оно практически полностью отсекается целлофаном при прохождении раствора через мембрану.

Табл. 3

Значения коэффициента задержания (R) растворенных веществ с помощью пленки на основе целлофана, коэффициента распределения (K) между водой и целлофаном, а также параметра гидрофобности/гидрофильности соединений ($\log K_{ow}$)

Растворенное вещество	K	$\log K_{ow}$	R , %
Сафранин О	650 ± 50	-1.35	-7 ± 3
Оранжевый II	0.58 ± 0.05	0.56	97 ± 2
Ремазол бриллиантовый синий Р	0.08 ± 0.04	-1.85	99 ± 1
Цефтриаксон	0.42 ± 0.05	0.025	41 ± 5

Как было показано ранее в работе [66], сродство растворенного соединения с материалом мембраны и растворителем может вносить заметный вклад в эффективность его задержания. Для описания взаимодействия растворенного вещества с мембранным материалом в литературе предложено использование коэффициента распределения K . Коэффициент распределения K представляет собой эмпирический параметр, который характеризует взаимодействие между компонентами фильтрационной разделительной смеси.

Значения коэффициентов распределения рассматриваемых красителей в системе вода–целлофан в данном случае хорошо согласуются с рассчитанными величинами коэффициента задержания. Для красителя сафранин О параметр K составил 650 (табл. 3). Это означает, что равновесная концентрация красителя в целлофане в 650 раз выше, чем в окружающем растворе, что свидетельствует о сильном сродстве между данным красителем и целлофаном. С другой стороны, для красителя оранжевый II значение $K < 1$, что свидетельствует о низком сродстве между красителем и целлофаном. Для ремазола бриллиантового синего Р (626 г/моль) значение K было еще ниже. Из этого можно сделать вывод, что целлофан предпочтительно использовать для выделения из водных сред растворенных веществ анионного типа (органические соединения, содержащие кислотные группы).

Действительно, при переходе к более крупному анионному красителю ремазол бриллиантовый синий Р коэффициент задержания увеличивается до $99 \pm 1\%$. Кроме того, при увеличении молекулярной массы растворенного вещества можно говорить об увеличении вклада стерических затруднений при транспорте растворенного вещества через мембрану. В то же время значение коэффициента задержания цефтриаксона составило $41 \pm 5\%$, несмотря на то, что данное соединение содержит карбоксильную группу в виде натриевой соли и обладает близкой молекулярной массой (599 г/моль), а величина коэффициента распределения составила 0.42 ± 0.05 . Исходя из данных табл. 3, сорбция компонентов в целлофан изменяется в следующем ряду: сафранин О $\gg$ оранжевый II $>$ цефтриаксон $>$ ремазол бриллиантовый синий Р. Полученные закономерности хорошо коррелируют с полученными ранее данными по разделению красителей нанопермембранами [64, 66].

Представленные на рис. 2 результаты в случае красителей могут быть интерпретированы с точки зрения различий во взаимодействии растворенных соединений с целлофаном. При более сильном взаимодействии, как в случае сафранина О,

на начальном участке времени происходит сорбция соединения и удержание самим материалом мембраны, что и обеспечивает высокую эффективность мембраны. Снижение числа свободных сорбционных центров в мембране сопровождается уменьшением значений коэффициентов задержания с последующим выходом на стационарную величину при достижении равновесных значений сорбции компонентов в целлофане в режиме фильтрации.

В то же время в случае цефтриаксона параметр K не может объяснить наблюдаемые значения коэффициентов задержания. Еще один параметр, который можно использовать для интерпретации полученных результатов, это параметр гидрофобности/гидрофильности соединения ($\log K_{ow}$), представляющий собой коэффициент распределения соединения в системе вода–октанол. Однако и этот параметр не позволяет в полной мере объяснить наблюдаемые для мембран на основе целлофана значения коэффициентов задержания, исходя из предположения, что более гидрофильное органическое соединение будет иметь большее сродство с водой. Как можно видеть из табл. 3, наиболее гидрофильными органическими соединениями в выбранном ряду являются ремазол бриллиантовый синий Р ($\log K_{ow} = -1.85$) и сафранин О ($\log K_{ow} = -1.35$), которые концентрируются в воде в 71 и 22 раза выше по сравнению с контактирующей органической фазой (n -октанол) соответственно. При этом цефтриаксон практически равномерно распределяется между водной и органической фазами, тогда как оранжевый II будет концентрироваться в n -октаноле.

Помимо экспериментально определяемых коэффициентов распределения для описания сродства также используются параметры растворимости Хансена [68], которые состоят из параметра дисперсии δ_D , параметра полярности δ_p и параметра водородной связи δ_H и вычисляются по уравнениям 6–8 соответственно:

$$\delta_D = \frac{\sum_i n_i F_{D,i}}{V}, \quad (6)$$

$$\delta_p = \frac{\sqrt{\sum_i n_i F_{p,i}^2}}{V}, \quad (7)$$

$$\delta_H = \sqrt{\frac{\sum_i n_i E_{H,i}}{V}}, \quad (8)$$

где $F_{D,i}$ и $F_{p,i}$ – константы молярного притяжения, $E_{H,i}$ – молярная энергия водородной связи; V – молярный объем соединения; n_i – номер каждой структурной единицы (группы) в соединении, V_i – молярный объем группы i .

Общий параметр растворимости вычисляется согласно уравнению 9:

$$\delta_t = (\delta_D^2 + \delta_p^2 + \delta_H^2)^{1/2} \quad (9)$$

При этом сопоставление параметра растворимости δ_t выбранных соединений (табл. 4) с аналогичными значениями для воды ($\delta_t = 47.8 \text{ МПа}^{1/2}$) и целлофана ($\delta_t = 42.1 \text{ МПа}^{1/2}$) также не позволяет в полной мере выявить общую взаимосвязь. Ожидается, что сродство двух компонентов увеличится при уменьшении абсолютной разницы между их параметрами растворимости.

В исследованных системах абсолютная разница в параметрах растворимости целлофана и растворенных веществ уменьшалась в следующем ряду: ремазол бриллиантовый синий Р ($|\Delta\delta| = 17.9 \text{ МПа}^{1/2}$) > оранжевый II ($|\Delta\delta| = 11.5 \text{ МПа}^{1/2}$) > сафранин О ($|\Delta\delta| = 9.3 \text{ МПа}^{1/2}$) > Цефтриаксон ($|\Delta\delta| = 0.9 \text{ МПа}^{1/2}$). Нетрудно заметить, что для слабо задерживаемых соединений (сафранин О и цефтриаксон) разница была меньше. Так как молекулы цефтриаксона имеют больший размер по сравнению с молекулами сафранина О, можно предположить, что в случае антибиотика частичное задержание и низкая сорбция связаны со стерическими затруднениями.

Табл. 4

Параметры растворимости Хансена для исследуемых соединений

Растворенное вещество	Функциональные группы	Параметры растворимости Хансена, $\text{МПа}^{1/2}$			
		δ_D	δ_p	δ_H	δ_t
Сафранин О	$-\text{CH}_3-(2), =\text{CH}-(4), =\text{C}<(8),$ Фенил, $-\text{NH}_2-(2), -\text{N}<^*, -\text{N}=\text{}$	19.4	25.1	8.3	32.8
Оранжевый II	$=\text{CH}-(6), =\text{C}<(4),$ Фенилен, $-\text{O}-, -\text{OH}, -\text{N}=(2), -\text{SO}_2-$	12.9	26.8	7.0	30.6
Ремазол бриллиантовый синий Р	$-\text{CH}_2-(2), =\text{CH}-(5), =\text{C}<(9),$ Фенилен, $-\text{O}-^*(2), -\text{O}-(3),$ $-\text{NH}_2-, -\text{NH}-, -\text{SO}_2-(3)$	19.1	9.3	11.6	24.2
Цефтриаксон	$-\text{CH}_3-(2), -\text{CH}_2-(2), -\text{CH}<(2),$ $=\text{CH}-, =\text{C}<(10), -\text{CO}_2-, -\text{O}-^*(3),$ $-\text{O}-(2), -\text{NH}_2-, -\text{NH}-, -\text{N}<, -\text{N}=\text{},$ $-\text{S}-$	37.6	15.5	13.9	43.0

Интересно отметить, что такое принципиальное отличие в значениях коэффициентов задержания двух соединений схожей молекулярной массы 350 г/моль может быть использовано для фракционирования этих соединений из одного раствора, как было показано на примере нейтрального и анионных красителей в процессе нанофильтрации органических сред с применением мембран на основе поли[1-(триметилсилил)-1-пропина] [64]. В нашем случае водный раствор, содержащий два органических соединения, при прохождении через целлофан будет обогащаться сафранином О (351 г/моль), тогда как оранжевый II будет задерживаться целлофаном и, следовательно, концентрироваться в водном растворе над мембраной. Если предположить сохранение значений коэффициентов задержания сафранина О ($R = -7 \pm 3\%$) и оранжевого II ($R = 97 \pm 2\%$) в широком диапазоне концентраций данных веществ в воде, то, как можно видеть на рис. 3 (раствор над мембраной), весовое соотношение оранжевого II к сафранину О может быть увеличено от 1:1 до 11:1 при степени отбора раствора 0.9 (90% раствора профильтровано через мембрану). В случае пермеата (раствор под мембраной) максимальное соотношение сафранина О и оранжевого II при малых степенях отбора будет на уровне 36:1. В дальнейшем это соотношение будет уменьшаться до 14:1 (степень отбора 0.9), так как коэффициент задержания оранжевого II меньше 100%.

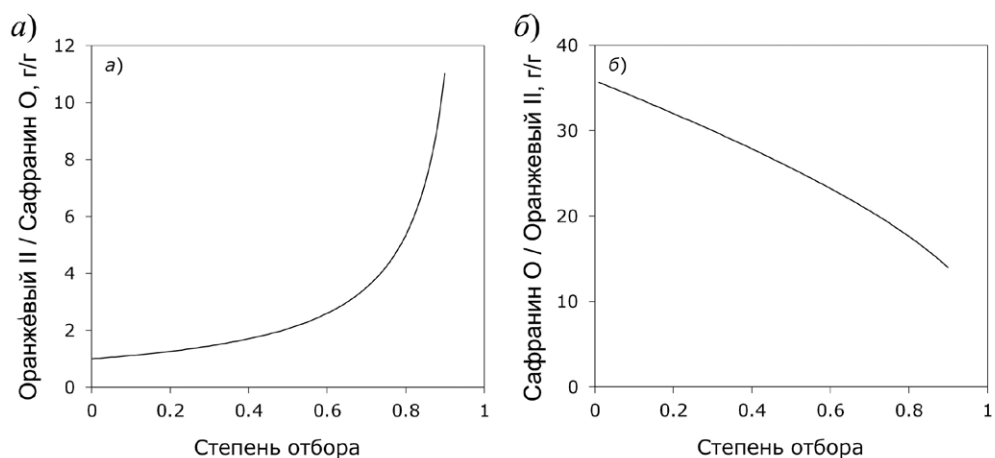


Рис. 3. Эффективность фракционирования пары сафранин О/оранжевый II при фильтрации общего водного раствора через целлофан в зависимости от степени отбора раствора через мембрану: а) соотношение оранжевый II/сафранин О в растворе над мембраной; б) соотношение сафранин О/оранжевый II в растворе под мембраной

Полученные фильтрационные характеристики мембран на основе целлофана по проницаемости несколько уступают промышленным синтетическим нанофильтрационным мембранам, таким как, например, мембрана ОПМН-П фирмы Владипор [69, 70]. Это связано в первую очередь с тем, что использовали сплошные целлофановые пленки толщиной 31 мкм, в то время как промышленные синтетические мембраны, как правило, имеют асимметричную структуру. С другой стороны, в рамках данной работы основной акцент сделан на использовании полимера из недорогого природного сырья. Сравнение полученных значений коэффициента задержания с аналогичными показателями для мембран на основе природных полимеров, представленных в литературе, показывает, что целлофан превосходит другие полимеры при выделении красителей (табл. 5).

Табл. 5

Нанофильтрационные характеристики некоторых мембран на основе природных полимеров

Полимер	Задерживаемое вещество (молярная масса, г/моль)	R, %	Источник
Целлофан	Оранжевый II (350)	97	Данная работа
	Ремазол бриллиантовый синий Р (626)	99	
	Цефтриаксон (599)	41	
Альгинат + поливиниловый спирт	Полиэтиленгликоль (600)	80	[71]
Хитозан + поливиниловый спирт		98	
Альгинат серебра	Оранжевый II (350)	80	[72]
Альгинат алюминия		80	
Альгинат кальция		60	
Полисахарид из мантии асцидий	Полиэтиленгликоль (600)	>90	[73]
Ацетат целлюлозы	Поллюанты сточных вод	62	[74]
Целлокон	Полиэтиленгликоль (600)	>90	[75]

Заключение

В работе исследован процесс выделения красителей и антибиотиков с молекулярными массами 350–600 г/моль из водных растворов с использованием мембран из целлофана как дешевого материала. На примере красителей оранжевый II и ремазол бриллиантовый синий R показано, что мембраны из целлофана хорошо задерживают из водных сред растворенные вещества анионного типа, в то время как для катионного красителя сафранин О наблюдаются отрицательные значения коэффициентов задержания. Данный эффект может быть использован для фракционирования растворенных веществ с близкой молекулярной массой, но отличающихся зарядом. Наблюдаемые разделительные свойства показывают, что полученные нанофильтрационные мембраны на основе целлофана выдерживают конкуренцию с другими мембранами на основе природных полимеров.

Благодарности. Результаты получены при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Проект 13.2251.21.0166 (идентификатор проекта RF----2251.61322X0044). Соглашение МНТС БРИКС 075-15-2022-1218.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. *Dhote J., Ingole S., Chavhan A.* Review on wastewater treatment technologies // *Int. J. Eng. Res. Technol.* 2012. V. 1, No 5. P. 1–10.
2. *Ezugbe E.O., Rathilal S.* Membrane technologies in wastewater treatment: A review // *Membranes*. 2020. V. 10, No 5. Art. 89. <https://doi.org/10.3390/membranes10050089>.
3. *Rathi B.S., Kumar P.S., Vo D.-V.N.* Critical review on hazardous pollutants in water environment: Occurrence, monitoring, fate, removal technologies and risk assessment // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 797. Art. 149134. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149134>.
4. *Viktoryová N., Szarka A., Hrouzková S.* Recent developments and emerging trends in paint industry wastewater treatment methods // *Appl. Sci.* 2022. V. 12, No 20. Art. 10678. <https://doi.org/10.3390/app122010678>.
5. *Gül Ü.D.* A green approach for the treatment of dye and surfactant contaminated industrial wastewater // *Braz. J. Biol.* 2019. V. 80, No 3. P. 615–620. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.218064>.
6. *Rodríguez Couto S.* Dye removal by immobilized fungi // *Biotechnol. Adv.* 2009. V. 27, No 3. P. 227–235. <https://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.12.001>.
7. *Nair K S., Manu B., Azhoni A.* Sustainable treatment of paint industry wastewater: Current techniques and challenges // *J. Environ. Manage.* 2021, V. 296. Art. 113105. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113105>.
8. *Aniyikaiye T.E., Oluseyi T., Odiyo J.O., Edokpayi J.N.* Physico-chemical analysis of wastewater discharge from selected paint industries in Lagos, Nigeria // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2019. V 16, No 7. Art. 1235. <https://doi.org/10.3390/ijerph16071235>.
9. *Martínez J.L.* Antibiotics and antibiotic resistance genes in natural environments // *Science*. 2008. V. 321, No 5887. P. 365–367. <https://doi.org/10.1126/science.1159483>.
10. *Anh H.Q., Le T.P.Q., Da Le N., Lu X.X., Duong T.T., Garnier J., Rochelle-Newall E., Zhang S., Oh N.-H., Oeurng C., Ekkawatpanit C., Nguyen T.D., Nguyen Q.T., Nguyen T.D., Nguyen T.N., Tran T.L., Kunisue T., Tanoue R., Takahashi S., Minh T.B., Le H.T.,*

- Pham T.N.M., 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 // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 764. Art. 142865. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142865>.
11. *Liu X., Lu S., Guo W., Xi B., Wang W.* Antibiotics in the aquatic environments: A review of lakes, China // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 627. P. 1195–1208. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.271>.
 12. *Sta Ana K.M., Madriaga J., Espino M.P.* β -Lactam antibiotics and antibiotic resistance in Asian lakes and rivers: An overview of contamination, sources and detection methods // *Environ. Pollut.* 2021. V. 275. Art. 116624. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116624>.
 13. *Косенко И.М.* Резистентность бактерий к антибиотикам – старая проблема. Есть ли решения? // *Лечение и профилактика.* 2019. Т. 9, № 4. С. 56–62.
 14. *Sulbarán Rangel B.C., Madrigal Oliveira A.E., Romero Arellano V.H., Guzmán González C.A.* Nanomateriales celulósicos para la adsorción de contaminantes emergentes // *Tecnura.* 2019. V. 23, No 62. P. 13–20. <https://doi.org/10.14483/22487638.15451>.
 15. *Meneau-Hernández R.I., Millán-Arrieta J.A., Borrego-Morales K., Alba-Carranza M.D., Fariás-Piñeira T.* Adsorción de ciprofloxacina en materiales zeolíticos // *Rev. Cubana Quim.* 2021. V. 33, No 1. P. 167–190.
 16. *Афонина А.П., Бурыкина О.В.* Изучение кинетики сорбции промышленного красителя катионного розового 2С глинистым материалом // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66, Вып. 9. С. 123–128. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20236609.6775>.
 17. *Казначеева А.А., Ставропольцева А.С., Меньшова И.И.* Сорбенты на основе нетканых материалов в очистке промышленных стоков // *Успехи в химии и химической технологии.* 2023. Т. 37, Вып. 4 (266). С. 123–125.
 18. *Gothwal R., Shashidhar T.* Antibiotic pollution in the environment: A review // *Clean: Soil, Air, Water.* 2015. V. 43, No 4. P. 479–489. <https://doi.org/10.1002/clen.201300989>.
 19. *Di J., Xia J., Ge Y., Li H., Ji H., Xu H., Zhang Q., Li H., Li M.* Novel visible-light-driven CQDs/Bi₂WO₆ hybrid materials with enhanced photocatalytic activity toward organic pollutants degradation and mechanism insight // *Appl. Catal., B: Environ.* 2015. V. 168–169. P. 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.11.057>.
 20. *Царенко А.Д., Яценко А.Н., Ульяновкина А.А.* Оптимизация технологических параметров фотодegradации красителя метиленового синего в присутствии наноразмерного оксида цинка // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* 2022. № 4. С. 90–95. <http://dx.doi.org/10.17213/1560-3644-2022-4-90-95>.
 21. *Huang B., Wang H.-C., Cui D., Zhang B., Chen Z.-B., Wang A.-J.* Treatment of pharmaceutical wastewater containing β -lactams antibiotics by a pilot-scale anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) // *Chem. Eng. J.* 2018. V. 341. P. 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.149>.
 22. *Prado N., Ochoa J., Amrara A.* Biodegradation by activated sludge and toxicity of tetracycline into a semi-industrial membrane bioreactor // *Bioresour. Technol.* 2009. V. 100, No 15. P. 3769–3774. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.039>.
 23. *Li B., Zhang T.* Biodegradation and adsorption of antibiotics in the activated sludge process // *Environ. Sci. Technol.* 2010. V. 44, No 9. P. 3468–3473. <https://doi.org/10.1021/es903490h>.
 24. *Joss A., Keller E., Alder A.C., Göbel A., McArdell, C.S., Ternes T., Siegrist H.* Removal of pharmaceuticals and fragrances in biological wastewater treatment // *Water Res.* 2005. V. 39, No 14. P. 3139–3152. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.05.031>.

25. Yang S.-F., Lin C.-F., Lin A.-Y.C., Hong P.-K.A. Sorption and biodegradation of sulfonamide antibiotics by activated sludge: Experimental assessment using batch data obtained under aerobic conditions // *Water Res.* 2011. V. 45, No 11. P. 3389–3397. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.03.052>.
26. Джубари М.Л., Алексеева Н.В., Базияни Г.И., Таха В.С. Методы удаления пигментов из сточных вод // *Известия ТПУ. Инжиниринг георесурсов.* 2021, Т. 332, № 7. С. 54–64. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/7/3263>.
27. Suarez S., Lema J.M., Omil F. Pre-treatment of hospital wastewater by coagulation–flocculation and flotation // *Bioresour. Technol.* 2009. V. 100, No 7. P. 2138–2146. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.015>.
28. Choi K.-J., Kim S.-G., Kim S.-H. Removal of antibiotics by coagulation and granular activated carbon filtration // *J. Hazard. Mater.* 2008. V. 151, No 1. P. 38–43. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.059>.
29. Ульрих Е.В., Баркова А.С. Использование флокулянтов для очистки сточных вод // *Трансформация экосистем.* 2023. Т. 6, № 1. С. 168–187.
30. Naddeo V., Meriç S., Kassinos D., Belgiorio V., Guida M. Fate of pharmaceuticals in contaminated urban wastewater effluent under ultrasonic irradiation // *Water Res.* 2009. V. 43, No 16. P. 4019–4027. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.05.027>.
31. Lu X., Qiu W., Peng J., Xu H., Wang D., Cao Y., Zhang W., Ma J. A review on additives-assisted ultrasound for organic pollutants degradation // *J. Hazard. Mater.* 2021. V. 403. Art. 123915. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123915>.
32. Srivastava V. Grand challenges in chemical treatment of hazardous pollutants // *Front. Environ. Chem.* 2021. V. 2. Art. 792814. <https://doi.org/10.3389/fenvc.2021.792814>.
33. Алоян Р.М., Федосеев В.Н., Виноградова Н.В., Зайцева И.А. Возможности и проблемы энергоэффективных и энергосберегающих технологий в строительстве и текстильной промышленности // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности.* 2017. № 5 (371). С. 196–198.
34. Осадчий Ю.П., Блиничев В.Н. Баромембранная очистка сточных вод, содержащих пигменты и кислотные красители // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности.* 2007. № 5 (301). С. 64–66.
35. Апель П.Ю., Бобрешова О.В., Волков А.В., Волков В.В., Никоненко В.В., Стенина И.А., Филиппов А.Н., Ямпольский Ю.П., Ярославцев А.Б. Перспективы развития мембранной науки // *Мембраны и мембранные технологии.* 2019. Т. 9, № 2. С. 59–80. <https://doi.org/10.1134/S2218117219020020>.
36. Feng X., Peng D., Zhu J., Wang Y., Zhang Y. Recent advances of loose nanofiltration membranes for dye/salt separation // *Sep. Purif. Technol.* 2022. V. 285. Art. 120228. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120228>.
37. Chauhan P., Sharma M., Nehra S., Sharma R., Kumar D. Dye removal from industrial water using nanofiltration membrane // Ahmad A., Alshammari M.B. (Eds.) *Nanofiltration Membrane for Water Purification. Ser.: Sustainable Materials and Technology.* Singapore: Springer, 2023. P. 83–117. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5315-6_6.
38. Yang L., Xia C., Jiang J., Chen X., Zhou Y., Yuan C., Bai L., Meng S., Cao G. Removal of antibiotics and estrogens by nanofiltration and reverse osmosis membranes // *J. Hazard. Mater.* 2024. V. 461. Art. 132628. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132628>.
39. Zheng F., Wang Y. Removal of antibiotics and antibiotic resistance genes by self-assembled nanofiltration membranes with tailored selectivity // *J. Membr. Sci.* 2022. V. 659. Art. 120836. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.120836>.
40. Guo X., Zhao B., Wang L., Zhang Z., Li J., Gao Z. High flux nanofiltration membrane via surface modification using spirocyclic quaternary ammonium diamine for ef-

- ficient antibiotics/salt separation // *Sep. Purif. Technol.* 2023. V. 325. Art. 124736. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124736>.
41. *Cheng X.Q., Liu Y., Guo Z., Shao L.* Nanofiltration membrane achieving dual resistance to fouling and chlorine for “green” separation of antibiotics // *J. Membr. Sci.* 2015. V. 493. P. 156–166. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.06.048>.
 42. *Zhao S., Yao Y., Ba C., Zheng W., Economy J., Wang P.* Enhancing the performance of poly-ethylenimine modified nanofiltration membrane by coating a layer of sulfonated poly(ether ether ketone) for removing sulfamerazine // *J. Membr. Sci.* 2015. V. 492. P. 620–629. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.03.017>.
 43. *Thakur V.K., Voicu S.I.* Recent advances in cellulose and chitosan-based membranes for water purification: A concise review // *Carbohydr. Polym.* 2016. V. 146. P. 148–165. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.03.030>.
 44. *Fan J., Zhang S., Li F., Yang Y., Du M.* Recent advances in cellulose-based membranes for their sensing applications // *Cellulose*. 2020. V. 27, No 16. P. 9157–9179. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03445-7>.
 45. *Rana A.K., Gupta V.K., Saini A.K., Voicu S.I., Abdellattifaand M.H., Thakur V.K.* Water desalination using nanocelluloses/cellulose derivatives-based membranes for sustainable future // *Desalination*. 2021. V. 520. Art. 115359. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115359>.
 46. *Тепляков В.В., Шалыгин М.Г., Козлова А.А., Чистяков А.В., Цодиков М.В., Непрусов А.И.* Мембранные технологии в биопереработке лигноцеллюлозы в компоненты моторных топлив // *Мембраны и мембранные технологии*. 2017. Т. 7, № 4. С. 228–246. <https://doi.org/10.1134/S2218117217040083>.
 47. *Medronho B., Lindman B.* Competing forces during cellulose dissolution: From solvents to mechanisms // *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.* 2014. V. 19, No 1. P. 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2013.12.001>.
 48. *Medronho B., Lindman B.* Brief overview on cellulose dissolution/regeneration interactions and mechanisms // *Adv. Colloid Interface Sci.* 2015. V. 222. P. 502–508. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.05.004>.
 49. *Acharya S., Liyanage S., Parajuli P., Rumi S.S., Shamshina J.L., Abidi N.* Utilization of cellulose to its full potential: A review on cellulose dissolution, regeneration, and applications // *Polymers*. 2021. V. 13, No 24. Art. 4344. <https://doi.org/10.3390/polym13244344>.
 50. *Lofthsson T., Masson M., Sigurdsson H.H.* Cyclodextrins and drug permeability through semi-permeable cellophane membranes // *Int. J. Pharm.* 2002. V. 232, No 1–2. P. 35–43. [https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(01\)00895-X](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(01)00895-X).
 51. *Tomé L.C., Gonçalves C.M.B., Boaventura M., Brandão L., Mendes A.M., Silvestre A.J.D., Neto C.P., Gandini A., Freire C.S.R., Marrucho I.M.* Preparation and evaluation of the barrier properties of cellophane membranes modified with fatty acids // *Carbohydr. Polym.* 2011. V. 83, No 2. P. 836–842. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.08.060>.
 52. *Craddock P.R., Fehr J., Dalmaso A.P., Brighan K.L., Jacob H.S.* Hemodialysis leukopenia. Pulmonary vascular leukostasis resulting from complement activation by dialyzer cellophane membranes // *J. Clin. Invest.* 1977. V. 59, No 5. P. 879–888. <https://doi.org/10.1172/JCI108710>.
 53. *Wu J., Yuan Q.* Gas permeability of a novel cellulose membrane // *J. Membr. Sci.* 2002. V. 204, No 1–2. P. 185–194. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(02\)00037-6](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(02)00037-6).
 54. *Кокоулина Е.В., Лихтендалер Р.Н.* Сорбционные свойства органических растворителей в непористых полимерных мембранах // *Вестник СПбГУ. Сер. 4*. 2007. № 2. С. 114–120.
 55. *Кузнецов В.М., Тойкка А.М., Кузнецов Ю.П.* Зависимость селективности пермембранации от давления и сорбционные свойства пленочной полимерной мембраны // *Журн. прикл. хим.* 2007. Т. 80, № 6. С. 928–931.

56. Кузнецов В.М., Кокоулина Е.В., Тойка А.М. Влияние давления пермеата на селективность первапорационного разделения водно-этанольных смесей с использованием пленочной целлофановой мембраны // Вестник СПбГУ. Сер. 4. 2005. № 3. С. 68–71.
57. Кузнецов В.М., Тойка А.М., Кокоулина Е.В. Фазовые переходы в процессе испарения через непористую полимерную мембрану // Вестник СПбГУ. Сер. 4. 2004. № 3. С. 52–59.
58. Левенкова И.О. Мембраны в практике программного диализа // Медицинская сестра. 2008. № 2. С. 11–12.
59. Рыбакова А.И., Саутина Н.В., Головешкина Д.Ю., Галяметдинов Ю.Г. Кинетика массопереноса аминокислот различной структуры в обратных микроэмульсиях // Вестник Технологического университета. 2020. Т. 23, № 4. С. 38–43.
60. Eliseeva T., Kharina A. Desalination of neutral amino acid solutions in an electromembrane system // Membranes. 2022. V. 12, No 7. Art. 665. <https://doi.org/10.3390/membranes12070665>.
61. Liu J., Xu Q., Jiang J. A molecular simulation protocol for swelling and organic solvent nanofiltration of polymer membranes // J. Membr. Sci. 2019. V. 573. P. 639–646. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.12.035>.
62. Soltane H.B., Roizard D., Favre E. Effect of pressure on the swelling and fluxes of dense PDMS membranes in nanofiltration: An experimental study // J. Membr. Sci. 2013. V. 435. P. 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.01.053>.
63. Volkov A., Yushkin A., Grekhov A., Shutova A., Bazhenov S., Tsarkov S., Khotimsky V., Vlugt T.J.H., Volkov V. Liquid permeation through PTMSP: One polymer for two different membrane applications // J. Membr. Sci. 2013. V. 440. P. 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.03.067>.
64. Volkov A., Yushkin A., Kachula Y., Khotimsky V., Volkov V. Application of negative retention in organic solvent nanofiltration for solutes fractionation // Sep. Purif. Technol. 2014. V. 124. P. 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.12.044>.
65. Gevers L.E., Meyen G., de Smet K., van de Velde P., Du Prez F., Vankelecom I.F., Jacobs P.A. Physico-chemical interpretation of the SRNF transport mechanism for solutes through dense silicone membranes // J. Membr. Sci. 2006. V. 274, No 1–2. P. 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.08.009>.
66. Tsarkov S., Khotimskiy V., Budd P.M., Volkov V., Kukushkina J., Volkov A. Solvent nanofiltration through high permeability glassy polymers: effect of polymer and solute nature // J. Membr. Sci. 2012. V. 423–424. P. 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.07.026>.
67. Schlackl K., Bischof R.H., Samhaber W. Negative retention by the nanofiltration of aqueous biomass hydrolysates derived from wood pulping // Sep. Purif. Technol. 2020. V. 242. Art. 116773. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116773>.
68. Hansen C.M. Hansen Solubility Parameters: A User's Handbook. 2 ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2007. 544 p. <https://doi.org/10.1201/9781420006834>.
69. Владипор. Мембраны из Полиамида марки ОПМН-П. URL: <https://vladipor.ru/katalog/laboratornaja-filtracija/membrany-iz-poliamida-marki-opmn-p/>
70. Мирончук В.Г., Грушевская И.О., Кучерук Д.Д., Змиевский Ю.Г. Экспериментальное исследование влияния высокого давления на эффективность процесса нанофильтрации молочной сыворотки при использовании мембран ОПМН-П // Мембраны и мембранные технологии. 2013. Т. 3, № 1. С. 3–6. <https://doi.org/10.1134/S2218117212040062>.
71. Jegal J., Lee K.-H. Nanofiltration membranes based on poly (vinyl alcohol) and ionic polymers // J. Appl. Polym. Sci. 1999. V. 72, No 13. P. 1755–1762. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19990624\)72:13<1755::AID-APP11>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19990624)72:13<1755::AID-APP11>3.0.CO;2-R).

72. *Anokhina T., Dmitrieva E., Volkov A.* Recovery of model pharmaceutical compounds from water and organic solutions with alginate-based composite membranes // *Membranes*. 2022. V. 12, No 2. Art. 235. <https://doi.org/10.3390/membranes12020235>.
73. *Кононова С.В., Хрипунов А.К.* Мембрана для нанофильтрации в водных, спиртовых и водно-спиртовых средах. Патент РФ на изобретение № 2650670. 2018. Бюл. ФИПС № 11.
74. *Фазуллин Д.Д., Маврин Г.В.* Селективность и задерживающая способность композиционных мембран при нанофильтрации сильно загрязненных сточных вод // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2022. Т. 22, № 1. С. 69–78. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9026>.
75. *Сапегин Д.А., Кононова С.В., Хрипунов А.К., Потокин И.Л.* Нанофильтрационная мембрана целлокон. Селективно-транспортные свойства // *Междисциплинарный молодежный научный форум «Новые материалы. Дни науки. Санкт-Петербург 2015»* (Санкт-Петербург, 20–22 октября 2015 г.). СПб.: Буки Веди, 2015. С. 112–114.

Поступила в редакцию 13.12.2023

Принята к публикации 30.03.2024

Юшкин Алексей Александрович, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории полимерных мембран

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

Ленинский просп., д. 29, ГСП-1, г. Москва, 119991, Россия

E-mail: Halex@ips.ac.ru

Небесская Александра Павловна, младший научный сотрудник лаборатории полимерных мембран

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

Ленинский просп., д. 29, ГСП-1, г. Москва, 119991, Россия

E-mail: nebesskaya@ips.ac.ru

Грушевенко Евгения Александровна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории полимерных мембран

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

Ленинский просп., д. 29, ГСП-1, г. Москва, 119991, Россия

E-mail: evgrushevenko@ips.ac.ru

Малахов Александр Олегович, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории полимерных мембран

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

Ленинский просп., д. 29, ГСП-1, г. Москва, 119991, Россия

E-mail: malakhov@ips.ac.ru

Анохина Татьяна Сергеевна, кандидат химических наук, и.о. заведующего лабораторией полимерных мембран

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

Ленинский просп., д. 29, ГСП-1, г. Москва, 119991, Россия

E-mail: tsanokhina@ips.ac.ru

Волков Алексей Владимирович, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории полимерных мембран, советник директора

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева Российской академии наук

Ленинский просп., д. 29, ГСП-1, г. Москва, 119991, Россия

E-mail: avolkov@ips.ac.ru

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2024.2.187-209

**Cellophane-Based Membranes for Purification
of Aqueous Media from Various Pollutants***A.A. Yushkin **, *A.P. Nebesskaya ***, *E.A. Grushevenko ****, *A.O. Malakhov *****,*T.S. Anokhina ******, *A.V. Volkov *******A.V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis,
Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*E-mail: **Hallex@ips.ac.ru*, ***nebesskaya@ips.ac.ru*, ****evgrushevenko@ips.ac.ru*, *****malakhov@ips.ac.ru*, ******tsanokhina@ips.ac.ru*, ******avolkov@ips.ac.ru*

Received December 13, 2023; Accepted March 30, 2024

Abstract

The process of nanofiltration purification of water from various organic pollutants was examined. Cellophane film made from cheap natural raw materials was used as a membrane. The model substances targeted for removal were dyes (Safranin O, Orange II, and Remazol Brilliant Blue R, each differing in molecular weight, chemical composition, and charge) and ceftriaxone. The obtained cellophane permeability to water was 0.145 kg/(m²·h·atm). Cellophane membranes were found to be effective in retaining dissolved anionic substances containing acid groups. When Orange II and Remazol Brilliant Blue R were removed from the water, the retention coefficients were 97 ± 2 and $99 \pm 1\%$, respectively. For the cationic dye Safranin O, the retention coefficient values were negative, $-7 \pm 3\%$. At the same time, ceftriaxone had the retention coefficient of only $41 \pm 5\%$, which can be attributed to a combination of factors, such as its high affinity for cellophane and steric restrictions.

Keywords: membrane, cellophane, antibiotic, ceftriaxone, dye, filtration, fractionation**Acknowledgements.** This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project 13.2251.21.0166, project ID RF---2251.61322X0044; agreement ISTC BRICS 075-15-2022-1218).**Conflicts of Interest.** The authors declare no conflicts of interest.**Figure Captions**

Fig. 1. Dependence of the distilled water flux through a cellophane film on the applied transmembrane pressure.

Fig. 2. Changes in the retention coefficient R over time (transmembrane pressure 20 bar).Fig. 3. Effectiveness of Safranin O/Orange II fractionation during the filtration of the common water solution through the cellophane depending on the degree of permeate selection: *a*) Orange II/Safranin O ratio in the solution above the membrane; *b*) Safranin O/Orange II ratio in the solution under the membrane.**References**

1. Dhote J., Ingole S., Chavhan A. Review on wastewater treatment technologies. *Int. J. Eng. Res. Technol.*, 2012, vol. 1, no. 5, pp. 1–10.
2. Ezugbe E.O., Rathilal S. Membrane technologies in wastewater treatment: A review. *Membranes*, 2020, vol. 10, no. 5, art. 89. <https://doi.org/10.3390/membranes10050089>.

3. Rath B.S., Kumar P.S., Vo D.-V.N. Critical review on hazardous pollutants in water environment: Occurrence, monitoring, fate, removal technologies and risk assessment. *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 797, art. 149134. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149134>.
4. Viktoriyová N., Szarka A., Hrouzková S. Recent developments and emerging trends in paint industry wastewater treatment methods. *Appl. Sci.*, 2022, vol. 12, no. 20, art. 10678. <https://doi.org/10.3390/app122010678>.
5. Gül Ü.D. A green approach for the treatment of dye and surfactant contaminated industrial wastewater. *Braz. J. Biol.*, 2019, vol. 80, no. 3, pp. 615–620. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.218064>.
6. Rodríguez Couto S. Dye removal by immobilized fungi. *Biotechnol. Adv.*, 2009, vol. 27, no. 3, pp. 227–235. <https://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.12.001>.
7. Nair K. S., Manu B., Azhoni A. Sustainable treatment of paint industry wastewater: Current techniques and challenges. *J. Environ. Manage.*, 2021, vol. 296, art. 113105. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113105>.
8. Aniyikaiye T.E., Oluseyi T., Odiyo J.O., Edokpayi J.N. Physico-chemical analysis of wastewater discharge from selected paint industries in Lagos, Nigeria. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2019, vol. 16, no. 7, art. 1235. <https://doi.org/10.3390/ijerph16071235>.
9. Martínez J.L. Antibiotics and antibiotic resistance genes in natural environments. *Science*, 2008, vol. 321, no. 5887, pp. 365–367. <https://doi.org/10.1126/science.1159483>.
10. Anh H.Q., Le T.P.Q., Da Le N., Lu X.X., Duong T.T., Garnier J., Rochelle-Newall E., Zhang S., Oh N.-H., Oeurng C., Ekkawatpanit C., Nguyen T.D., Nguyen Q.T., Nguyen T.D., Nguyen T.N., Tran T.L., Kunisue T., Tanoue R., Takahashi S., Minh T.B., Le H.T., Pham T.N.M., 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. *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 764, art. 142865. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142865>.
11. Liu X., Lu S., Guo W., Xi B., Wang W. Antibiotics in the aquatic environments: A review of lakes, China. *Sci. Total Environ.*, 2018, vol. 627, pp. 1195–1208. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.271>.
12. Sta Ana K.M., Madriaga J., Espino M.P. β -Lactam antibiotics and antibiotic resistance in Asian lakes and rivers: An overview of contamination, sources and detection methods. *Environ. Pollut.*, 2021, vol. 275, art. 116624. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116624>.
13. Kosenko I.M. Antibiotic resistance of bacteria is an old problem. Is there a solution? *Lech. Profil.*, 2019, vol. 9, no. 4, pp. 56–62. (In Russian)
14. Sulbarán Rangel B.C., Madrigal Oliveira A.E., Romero Arellano V.H., Guzmán González C.A. Nanomateriales celulósicos para la adsorción de contaminantes emergentes. *Tecnura*, 2019, vol. 23, no. 62, pp. 13–20. <https://doi.org/10.14483/22487638.15451>. (In Spanish)
15. Meneau-Hernández R.I., Millán-Arrieta J.A., Borrego-Morales K., Alba-Carranza M.D., Fariás-Piñeira T. Adsorción de ciprofloxacina en materiales zeolíticos. *Rev. Cubana Quím.*, 2021, vol. 33, no. 1, pp. 167–190. (In Spanish)
16. Afonina A.P., Burykina O.V. Study of the kinetics of sorption of industrial dye cationic pink 2C by clay material. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Khim. Khim. Tekhnol.*, 2023, vol. 66, no. 9, pp. 123–128. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20236609.6775>. (In Russian)
17. Stavropol'tseva A.S., Kaznacheeva A.A., Menshova I.I. Nonwoven-based sorbents in industrial wastewater treatment. *Usp. Khim. Khim. Tekhnol.*, 2023, vol. 37, no. 4 (266), pp. 123–125. (In Russian)
18. Gothwal R., Shashidhar T. Antibiotic pollution in the environment: A review. *Clean: Soil, Air, Water*, 2015, vol. 43, no. 4, pp. 479–489. <https://doi.org/10.1002/clen.201300989>.
19. Di J., Xia J., Ge Y., Li H., Ji H., Xu H., Zhang Q., Li H., Li M. Novel visible-light-driven CQDs/Bi₂WO₆ hybrid materials with enhanced photocatalytic activity toward organic pollutants degradation and mechanism insight. *Appl. Catal., B: Environ.*, 2015, vols. 168–169, pp. 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.11.057>.
20. Tsarenko A.D., Yatsenko A.N., Ulyankina A.A. Optimization of operating parameters for methylene blue photodegradation using nanosized zinc oxide. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Sev.-Kavk. Reg., Tekh. Nauki*, 2022, no. 4, pp. 90–95. <http://dx.doi.org/10.17213/1560-3644-2022-4-90-95>. (In Russian)
21. Huang B., Wang H.-C., Cui D., Zhang B., Chen Z.-B., Wang A.-J. Treatment of pharmaceutical wastewater containing β -lactams antibiotics by a pilot-scale anaerobic membrane bioreactor (AnMBR). *Chem. Eng. J.*, 2018, vol. 341, pp. 238–247. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.01.149>.
22. Prado N., Ochoa J., Amrane A. Biodegradation by activated sludge and toxicity of tetracycline into a semi-industrial membrane bioreactor. *Bioresour. Technol.*, 2009, vol. 100, no. 15, pp. 3769–3774. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.039>.

23. Li B., Zhang T. Biodegradation and adsorption of antibiotics in the activated sludge process. *Environ. Sci. Technol.*, 2010, vol. 44, no. 9, pp. 3468–3473. <https://doi.org/10.1021/es903490h>.
24. Joss A., Keller E., Alder A.C., Göbel A., McArdell, C.S., Ternes T., Siegrist H. Removal of pharmaceuticals and fragrances in biological wastewater treatment. *Water Res.*, 2005, vol. 39, no. 14, pp. 3139–3152. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.05.031>.
25. Yang S.-F., Lin C.-F., Lin A.-Y.C., Hong P.-K.A. Sorption and biodegradation of sulfonamide antibiotics by activated sludge: Experimental assessment using batch data obtained under aerobic conditions. *Water Res.*, 2011, vol. 45, no. 11, pp. 3389–3397. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.03.052>.
26. Gubari M.Q., Alekseeva N.V., Baziyan G.I., Taha B.S. Methods for removing pigments from waste water. *Izv. TGPU. Inzh. Resur.*, 2021, vol. 332, no. 7, pp. 54–64. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/7/3263>. (In Russian)
27. Suarez S., Lema J.M., Omil F. Pre-treatment of hospital wastewater by coagulation–flocculation and flotation. *Bioresour. Technol.*, 2009, vol. 100, no. 7, pp. 2138–2146. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.015>.
28. Choi K.-J., Kim S.-G., Kim S.-H. Removal of antibiotics by coagulation and granular activated carbon filtration. *J. Hazard. Mater.*, 2008, vol. 151, no. 1, pp. 38–43. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.05.059>.
29. Ulrich E.V., Barkova A.S. Use of flocculants for wastewater treatment. *Transform. Ekosist.*, 2023, vol. 6, no. 1, pp. 168–187. (In Russian)
30. Naddeo V., Merić S., Kassinos D., Belgiorio V., Guida M. Fate of pharmaceuticals in contaminated urban wastewater effluent under ultrasonic irradiation. *Water Res.*, 2009, vol. 43, no. 16, pp. 4019–4027. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.05.027>.
31. Lu X., Qiu W., Peng J., Xu H., Wang D., Cao Y., Zhang W., Ma J. A review on additives-assisted ultrasound for organic pollutants degradation. *J. Hazard. Mater.*, 2021, vol. 403, art. 123915. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123915>.
32. Srivastava V. Grand challenges in chemical treatment of hazardous pollutants. *Front. Environ. Chem.*, 2021, vol. 2, art. 792814. <https://doi.org/10.3389/fenvc.2021.792814>.
33. Aloyan R.M., Fedoseev V.N., Vinogradova N.V., Zaytseva I.A. Opportunities and challenges of energy efficient and energy saving technologies in the construction and textile industry. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Tekhnol. Tekstil'noi Prom-sti.*, 2017, no. 5 (371), pp. 196–198. (In Russian)
34. Osadchy Yu.P., Blinichev V.N. Baromembrane purification of wastewater containing pigments and acid dyes. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Tekhnol. Tekstil'noi Prom-sti.*, 2007, no. 5 (301), pp. 64–66. (In Russian)
35. Apel P.Yu., Bobreshova O.V., Volkov A.V., Volkov V.V., Nikonenko V.V., Stenina I.A., Filippov A.N., Yampolskii Yu.P., Yaroslavtsev A.B. Prospects of membrane science development. *Membr. Technol.*, 2019, vol. 1, no. 2, pp. 45–63. <https://doi.org/10.1134/S2517751619020021>.
36. Feng X., Peng D., Zhu J., Wang Y., Zhang Y. Recent advances of loose nanofiltration membranes for dye/salt separation. *Sep. Purif. Technol.*, 2022, vol. 285, art. 120228. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120228>.
37. Chauhan P., Sharma M., Nehra S., Sharma R., Kumar D. Dye removal from industrial water using nanofiltration membrane. In: Ahmad A., Alshammari M.B. (Eds.) *Nanofiltration Membrane for Water Purification*. Ser.: Sustainable Materials and Technology. Singapore, Springer, 2023, pp. 83–117. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5315-6_6.
38. Yang L., Xia C., Jiang J., Chen X., Zhou Y., Yuan C., Bai L., Meng S., Cao G. Removal of antibiotics and estrogens by nanofiltration and reverse osmosis membranes. *J. Hazard. Mater.*, 2024, vol. 461, art. 132628. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132628>.
39. Zheng F., Wang Y. Removal of antibiotics and antibiotic resistance genes by self-assembled nanofiltration membranes with tailored selectivity. *J. Membr. Sci.*, 2022, vol. 659, art. 120836. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.120836>.
40. Guo X., Zhao B., Wang L., Zhang Z., Li J., Gao Z. High flux nanofiltration membrane via surface modification using spirocyclic quaternary ammonium diamine for efficient antibiotics/salt separation. *Sep. Purif. Technol.*, 2023, vol. 325, art. 124736. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124736>.
41. Cheng X.Q., Liu Y., Guo Z., Shao L. Nanofiltration membrane achieving dual resistance to fouling and chlorine for “green” separation of antibiotics. *J. Membr. Sci.*, 2015, vol. 493, pp. 156–166. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.06.048>.

42. 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. *J. Membr. Sci.*, 2015, vol. 492, pp. 620–629. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.03.017>.
43. Thakur V.K., Voicu S.I. Recent advances in cellulose and chitosan based membranes for water purification: A concise review. *Carbohydr. Polym.*, 2016, vol. 146, pp. 148–165. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.03.030>.
44. Fan J., Zhang S., Li F., Yang Y., Du M. Recent advances in cellulose-based membranes for their sensing applications. *Cellulose*, 2020, vol. 27, no. 16, pp. 9157–9179. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03445-7>.
45. Rana A.K., Gupta V.K., Saini A.K., Voicu S.I., Abdellattifaand M.H., Thakur V.K. Water desalination using nanocelluloses/cellulose derivatives based membranes for sustainable future. *Desalination*, 2021, vol. 520, art. 115359. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115359>.
46. Teplyakov V.V., Shalygin M.G., Kozlova A.A., Chistyakov A.V., Tsodikov M.V., Netrusov A.I. Membrane technology in bioconversion of lignocellulose to motor fuel components. *Pet. Chem.*, 2017, vol. 57, no. 9, pp. 747–762. <https://doi.org/10.1134/S0965544117090080>.
47. Medronho B., Lindman B. Competing forces during cellulose dissolution: From solvents to mechanisms. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, 2014, vol. 19, no. 1, pp. 32–40. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2013.12.001>.
48. Medronho B., Lindman B. Brief overview on cellulose dissolution/regeneration interactions and mechanisms. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 2015, vol. 222, pp. 502–508. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.05.004>.
49. Acharya S., Liyanage S., Parajuli P., Rumi S.S., Shamshina J.L., Abidi N. Utilization of cellulose to its full potential: A review on cellulose dissolution, regeneration, and applications. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 24, art. 4344. <https://doi.org/10.3390/polym13244344>.
50. Loftsson T., Masson M., Sigurdsson H.H. Cyclodextrins and drug permeability through semi-permeable cellophane membranes. *Int. J. Pharm.*, 2002, vol. 232, nos. 1–2, pp. 35–43. [https://doi.org/10.1016/S0378-5173\(01\)00895-X](https://doi.org/10.1016/S0378-5173(01)00895-X).
51. Tomé L.C., Gonçalves C.M.B., Boaventura M., Brandão L., Mendes A.M., Silvestre A.J.D., Neto C.P., Gandini A., Freire C.S.R., Marrucho I.M. Preparation and evaluation of the barrier properties of cellophane membranes modified with fatty acids. *Carbohydr. Polym.*, 2011, vol. 83, no. 2, pp. 836–842. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.08.060>.
52. Craddock P.R., Fehr J., Dalmasso A.P., Brighan K.L., Jacob H.S. Hemodialysis leukopenia. Pulmonary vascular leukostasis resulting from complement activation by dialyzer cellophane membranes. *J. Clin. Invest.*, 1977, vol. 59, no. 5, pp. 879–888. <https://doi.org/10.1172/JCI108710>.
53. Wu J., Yuan Q. Gas permeability of a novel cellulose membrane. *J. Membr. Sci.*, 2002, vol. 204, nos. 1–2, pp. 185–194. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(02\)00037-6](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(02)00037-6).
54. Kokoulina E.V., Lichtenthaler R.N. Sorption properties of organic solvents in nonporous polymeric membranes. *Vestn. SPbGU. Ser. 4*, 2007, no. 2, pp. 114–120. (In Russian)
55. Kuznetsov V.M., Toikka A.M., Kuznetsov Yu.P. Pervaporation selectivity as a function of pressure and sorption properties of a polymeric film membrane. *Russ. J. Appl. Chem.*, 2007, vol. 80, no. 6, pp. 904–908. <https://doi.org/10.1134/S1070427207060109>.
56. Kuznetsov V.M., Kokoulina E.V., Toikka A.M. The influence of permeate pressure on the selectivity of pervaporation of ethanol–water mixtures using cellophane film membrane. *Vestn. SPbGU. Ser. 4*, 2005, no. 3, pp. 68–71. (In Russian)
57. Kuznetsov V.M., Toikka A.M., Kokoulina E.V. Phase transitions in the process of evaporation through nonporous polymer membrane. *Vestn. SPbGU. Ser. 4*, 2004, no. 3, pp. 52–59. (In Russian)
58. Levenkova I.O. Membranes in the practice of program dialysis. *Med. Sestra*, 2008, no. 2, pp. 11–12. (In Russian)
59. Rybakova A.I., Sautina N.V., Goloveshkina D.Yu., Galyametdinov Yu.G. Kinetics of the mass transfer of amino acids with varying structures in reverse microemulsions. *Vestn. Tekhnol. Univ.*, 2020, vol. 23, no. 4, pp. 38–43. (In Russian)
60. Eliseeva T., Kharina A. Desalination of neutral amino acid solutions in an electromembrane system. *Membranes*, 2022, vol. 12, no. 7, art. 665. <https://doi.org/10.3390/membranes12070665>.
61. Liu J., Xu Q., Jiang J. A molecular simulation protocol for swelling and organic solvent nanofiltration of polymer membranes. *J. Membr. Sci.*, 2019, vol. 573, pp. 639–646. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.12.035>.

62. Soltane H.B., Roizard D., Favre E. Effect of pressure on the swelling and fluxes of dense PDMS membranes in nanofiltration: An experimental study. *J. Membr. Sci.*, 2013, vol. 435, pp. 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.01.053>.
63. Volkov A., Yushkin A., Grekhov A., Shutova A., Bazhenov S., Tsarkov S., Khotimsky V., Vlugt T.J.H., Volkov V. Liquid permeation through PTMSP: One polymer for two different membrane applications. *J. Membr. Sci.*, 2013, vol. 440, pp. 98–107. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.03.067>.
64. Volkov A., Yushkin A., Kachula Y., Khotimsky V., Volkov V. Application of negative retention in organic solvent nanofiltration for solutes fractionation. *Sep. Purif. Technol.*, 2014, vol. 124, pp. 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.12.044>.
65. Gevers L.E., Meyen G., de Smet K., van de Velde P., Du Prez F., Vankelecom I.F., Jacobs P.A. Physico-chemical interpretation of the SRNF transport mechanism for solutes through dense silicone membranes. *J. Membr. Sci.*, 2006, vol. 274, nos. 1–2, pp. 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2005.08.009>.
66. Tsarkov S., Khotimskiy V., Budd P.M., Volkov V., Kukushkina J., Volkov A. Solvent nanofiltration through high permeability glassy polymers: Effect of polymer and solute nature. *J. Membr. Sci.*, 2012, vols. 423–424, pp. 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.07.026>.
67. Schlackl K., Bischof R.H., Samhaber W. Negative retention by the nanofiltration of aqueous biomass hydrolysates derived from wood pulping. *Sep. Purif. Technol.*, 2020, vol. 242, art. 116773. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116773>.
68. Hansen C.M. *Hansen Solubility Parameters: A User's Handbook*. 2 ed. Boca Raton, FL, CRC Press, 2007, 544 p. <https://doi.org/10.1201/9781420006834>.
69. Vladipor. OPMN-P polyamid membranes. URL: <https://vladipor.ru/katalog/laboratornaja-filtracija/membrany-iz-poliamida-marki-opmn-p/>. (In Russian)
70. Myronchuk V.G., Grushevskaya I.O., Kucheruk D.D., Zmievskii Yu.G. Experimental study of the effect of high pressure on the efficiency of whey nanofiltration process using an OPMN-P membrane. *Pet. Chem.*, 2013, vol. 53, no. 7, pp. 439–443. <https://doi.org/10.1134/S0965544113070116>.
71. Jegal J., Lee K.-H. Nanofiltration membranes based on poly (vinyl alcohol) and ionic polymers. *J. Appl. Polym. Sci.*, 1999, vol. 72, no. 13, pp. 1755–1762. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19990624\)72:13<1755::AID-APP11>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19990624)72:13<1755::AID-APP11>3.0.CO;2-R).
72. Anokhina T., Dmitrieva E., Volkov A. Recovery of model pharmaceutical compounds from water and organic solutions with alginate-based composite membranes. *Membranes*, 2022, vol. 12, no. 2, art. 235. <https://doi.org/10.3390/membranes12020235>.
73. Kononova S.V., Khripunov A.K. Membrane for nanofiltration in water, alcohol, and water–alcohol media. Patent RF no. 2650670. *Byull. FIPS*, 2018, no. 11. (In Russian)
74. Fazullin D.D., Mavrin G.V. Selectivity and retention capacity of composite membranes for nanofiltration of heavily polluted wastewater. *Sorbts. Khromatogr. Protessy*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 69–78. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2022.22/9026>. (In Russian)
75. Sapegin D.A., Kononova S.V., Khripunov A.K., Potokin I.L. Cellocon nanofiltration membrane. Selective transport properties. *Mezhdistsiplinarnyi molodezhnyi nauchnyi forum "Novye materialy. Dni nauki. Sankt-Peterburg 2015"* (Sankt-Peterburg, 20–22 oktyabrya 2015 g.) [Proc. Interdiscip. Youth Sci. Forum "New Materials. Science Days. Saint Petersburg 2015" (St. Petersburg, Oct. 20–22, 2015)]. St. Petersburg, Buki Vedi, 2015, pp. 112–114. (In Russian)

⟨ **Для цитирования:** Юшкин А.А., Небеская А.П., Грушевенко Е.А., Малахов А.О., Анохина Т.С., Волков А.В. Мембраны на основе целлофана для очистки водных сред от загрязнителей различной природы // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2024. Т. 166, кн. 2. С. 187–209. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.2.187-209>. ⟩

⟨ **For citation:** Yushkin A.A., Nebesskaya A.P., Grushevenko E.A., Malakhov A.O., Anokhina T.S., Volkov A.V. Cellophane-based membranes for purification of aqueous media from various pollutants. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2024, vol. 166, no. 2, pp. 187–209. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.2.187-209>. (In Russian) ⟩