

УДК 66.081.63

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧНОСТИ И ВОДОПРОНИЦАЕМОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИОННЫХ МЕМБРАН УАМ-50 И УАМ-100

© 2021 г. С. И. Лазарев^а, И. В. Хорохорина^{а, *}, Д. С. Лазарев^а,
М. И. Михайлин^а, А. А. Арзамасцев^а

^аТамбовский государственный технический университет, Тамбов, 392000 Россия

*e-mail: kotelnikovirina@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.09.2020 г.

После доработки 25.12.2020 г.

Принята к публикации 30.12.2020 г.

Проведены рентгенодифрактометрические, электронно-микроскопические и кинетические исследования поверхностных слоев ультрафильтрационных мембран УАМ-50 и УАМ-100. Рентгенодифрактометрические измерения кристалличности проводились в области больших углов 2θ от 2° до 40° на дифрактометре ДРОН-3 при использовании современных методов компьютерной обработки экспериментальных данных. Сравнительный анализ рентгенодифрактограмм позволил отметить совпадение углов дифракции для рабочего и воздушно сухого образцов ультрафильтрационных мембран, при этом образцы мембран имеют ярко выраженные три максимума, расположенные примерно в диапазоне углов от 17.50° до 25.60° . Кристалличность для воздушно сухих образцов составила у мембран УАМ-50 – 68% и УАМ-100 – 74%, а для рабочих образцов мембран УАМ-50 – 32% и УАМ-100 – 41%. Исследования поверхности дренажных слоев ультрафильтрационных мембран УАМ-50 и УАМ-100 проводили методом растровой электронной микроскопии. Показано, что толщина активного слоя мембраны УАМ-50 составляет 27 нм, а у мембраны УАМ-100 имеет значение 15 нм. На поверхности активного слоя мембраны видны поры разных диаметров. Для мембраны УАМ-50 это поры размером от 2.5 до 40 нм, для мембраны УАМ-100 – от 10 до 40 нм. Кинетические исследования ультрафильтрационных мембран подтвердили, что мембраны имеют асимметричную структуру пор. Небольшие поры задерживают молекулы-загрязнители, в то время как большие поры мембраны позволяют пермеату быстро проникать к более открытому пермеатному носителю, то есть к очищенному раствору. Установлено, что водопроницаемость на рабочей мембране с ростом трансмембранного давления возрастает за счет повышения движущей силы процесса и перестройки кристаллической структуры (уменьшения размеров кристаллов в рабочем образце мембраны) и снижения кристалличности мембран.

Ключевые слова: водопроницаемость, кристалличность, рентгенодифрактометрия, активный слой, поры, ультрафильтрационная мембрана.

DOI: 10.31857/S102809602106011X

ВВЕДЕНИЕ

Водопроницаемость – величина, которая определяет качество мембранного процесса разделения растворов, зависит от структурных и кинетических характеристик мембран, а также их физико-химических свойств. Водопроницаемость является важным параметром для исследования кинетики процесса разделения промышленных растворов и сточных вод и изучения структурных превращений, происходящих в полупроницаемых пленках. Связь кристалличности с проницаемостью веществ приведена в работе [1], авторы которой предполагают, что мембрана состоит из кристаллических и аморфных областей. Причем растворитель (вода) и растворенные ве-

щества проникают через аморфные, а не через кристаллические области. Дальнейшие исследования кристалличности мембран с использованием методов рентгенодифракции, электронной микроскопии и термического анализа были приведены в статье [2]. Результаты исследований выявили, что полупроницаемые мембраны обладают более равномерным распределением пор по размерам, имеют высокую степень кристалличности и лучшую стойкость к температуре по сравнению с монолитными пленками из целлюлозного материала. Исследованию кристалличности наноматериалов посвящена работа [3], где авторы методами рентгенографии, просвечивающей и растровой электронной микроскопии изучали образование нанокристаллов при деформации в

аморфных сплавах на основе алюминия, железа, кобальта. Образованию нанокристаллов способствует наличие большого количества пересекающихся полос сдвига, а также повышение температуры материала в области полосы сдвига при интенсивной пластической деформации. В работе [4] методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) определены различия в микроструктуре поверхности и объеме образцов мембран, возникающие после длительной эксплуатации в электродиализных аппаратах различного типа. Отмечен рост влагосодержания и диффузионной проницаемости на фоне потери обменной емкости и селективности мембран. Авторы статьи [5] методом РЭМ выполнили исследования микрофильтрационных мембран, у которых изучалось влагосодержание, гидравлическое сопротивление, производительность по чистой воде и уплотнение. Проанализировано влияние состава полимера и концентраций добавок на вышеуказанные параметры, проведено сравнение результатов. Авторами [6] методами РЭМ и атомной силовой микроскопии (АСМ) исследована морфология поверхности ионообменных мембран. Установлены различия в структуре поверхности гомогенных и гетерогенных мембран, коммерческих образцов после химического кондиционирования, а также подвергшихся эксплуатации при высокоинтенсивных токовых режимах. Определены микропрофили, размер и доля проводящих участков поверхности гетерогенных мембран.

Исследованию эксплуатационных свойств мембран посвящена работа [7], где авторы исследовали степень набухания первапорационных мембран. Высказано и экспериментально проверено утверждение, что механически напряженное состояние первапорационных мембран в экспериментальных установках зависит от их площади. Это обстоятельство может приводить к различным значениям плотности потоков пермеата (очищенного раствора). В качестве мембран использовали пленки из полиэтилентерефталата, ароматических сульфонатсодержащих полиамидов и хитозана. В статье [8] успешно получены новые двухслойные мембраны. Данные РЭМ мембран показали, что оба слоя являются однородными и хорошо внутренне сросшимися. Слои в структуре “сэндвич” имели одинаковую толщину 3–4 мкм и хорошую водопроницаемость, тогда как толщина каждого исходного затравочного слоя была различной. Затравочный слой был намного тоньше, чем затравочный слой силикалита-1. Методом рентгенографии показано, что оба слоя сосуществуют в двухслойной мембране. В работе [9] готовили мембраны из поли-2,6-диметил-1,4-оксифенилена, используя трихлорметилен как растворитель, при температурах испарения 25°–65°. Мембраны характеризовали электронным спиновым резонансом, атомной

силовой микроскопией и скоростью газопроницаемости. Установлено повышение эффективности газопропускания мембран, изготовленных при повышенных температурах. В работе [10] исследовались водопроницаемость и селективность однородных гибридных мембран. Измерения водопроницаемости показали, что эффективным размером пор можно управлять в диапазоне от 20 до 5 нм. Наблюдаемая селективная проницаемость почти идентична теоретической, получаемой при допущении о преобладании кнудсеновской диффузии). Свойства гибридных мембран исследовались с помощью методов РЭМ, просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), а также методом дифракции рентгеновских лучей.

Подводя итог в анализе работ, хочется остановиться на работе [11], где авторами выполнен большой обзор и рассмотрены последние научные достижения в области исследования структурных и транспортных характеристик, а также моделирования процессов в перфторированных сульфокислотных мембранах (PFSA). В обзоре рассмотрены проблемы, вытекающие из корреляции различных физических (например, механических) и транспортных факторов, свойств с морфологией и структурой мембраны. Здесь же анализируются темы, которые представляют в последнее время интерес, такие как корреляции структуры/транспорта и моделирование.

Хочется отметить, что в качестве объекта исследования необходимо выбирать мембраны, широко используемые в производственной практике, эксплуатирующиеся при низком трансмембранном давлении и имеющие высокую производительность (водопроницаемость) по пермеату. Выполненный анализ работ [1–11] по исследованиям структурных и транспортных характеристик поверхностных слоев мембран позволили оценить зависимость транспортных параметров от структурных характеристик поверхностных слоев мембран.

Целью данной работы является исследование влияния кристалличности на водопроницаемость поверхностных слоев низконапорных и высокопроизводительных по пермеату ультрафильтрационных мембран марки УАМ-50 и УАМ-100 рентгенодифрактометрическим, микроскопическим и кинетическим методами.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Провести рентгенодифрактометрические исследования кристалличности ультрафильтрационных мембран УАМ-50 и УАМ-100. Выполнить сравнительный анализ рентгенограмм воздушно-сухих и рабочих образцов ультрафильтрационных мембран УАМ-50 и УАМ-100 и рассчитать кристалличность и размеры кристаллов.

Таблица 1. Характеристика ультрафильтрационных мембран

Марка мембраны	УАМ-50	УАМ-100
Коэффициент задержания, %	98.5	95
Трансмембранное давление, МПа	0.15	0.15
Мин. удельный выходной поток по воде, мл/см ² · мин	0.002	0.01
Материал активного слоя	Ацетатцеллюлоза	Ацетатцеллюлоза
Дренажный материал мембраны	Нейлон тканый	Нейлон валяльный
Толщина дренажного слоя, нм	110000	80000
Объем пор, см ³ /г (cc/g)	0.037	0.128
Площадь поверхности, мл/г	10.394	19.327
Размер пор, нм	3.169	10.681

2. Методом растровой электронной микроскопии исследовать асимметричную структуру пор и толщины активного слоя для ультрафильтрационных мембран УАМ-50 и УАМ-100.

3. Экспериментально исследовать водопроницаемость ультрафильтрационных мембран УАМ-50 и УАМ-100. Получить зависимости водопроницаемостей от действия трансмембранного давления и проанализировать кривые с позиций влияния кристалличности на проницаемость мембран.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Паспортные характеристики ультрафильтрационных мембран марок УАМ-50 и УАМ-100 представлены в табл. 1 [12]. Для исследования изменений кристалличности были проведены рентгеновские исследования образцов УАМ-50 и УАМ-100 воздушно сухих и рабочих (после эксплуатации). Рентгенограммы регистрировались на модернизированном рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 с медным антикатодом при напряжении 30 кВ и силе тока 20 мА (фильтр Ni). Длина волны рентгеновского излучения $\lambda \approx 0.15$ нм.

Кристалличность (РСК, %) рассчитывалась из соотношения между площадью под кристаллическими рефлексами и общей площадью под всей кривой рентгеновского рассеяния по формуле [13]

$$\text{РСК} = 100\% \times \frac{\sum (S_{\text{кр}1} + S_{\text{кр}2} + S_{\text{кр}3} + S_{\text{кр}4} + S_{\text{кр}5} + S_{\text{кр}6})}{\sum (S_{\text{кр}1} + S_{\text{кр}2} + S_{\text{кр}3} + S_{\text{кр}4} + S_{\text{кр}5} + S_{\text{кр}6} + S_{\text{ам}})} \quad (1)$$

где РСК – кристалличность, S – площадь кристаллических областей.

Размеры кристаллитов определяли по уравнению Селякова–Шеррера [14]:

$$L_{\text{окр}} = \frac{\lambda}{\beta \cos \frac{2\theta}{2}} \quad (2)$$

где $L_{\text{окр}}$ – размеры кристаллов, 2θ – угол дифракции, λ – длина волны рентгеновского излучения, β – полуширина пика.

Подготовка образцов для исследования асимметричной структуры пор и толщины активного слоя мембран УАМ-50 и УАМ-100 методом РЭМ с применением прибора SUPRA 60VP фирмы CarlZeiss проводилась в следующей последовательности. Небольшой кусочек мембраны отрезался и закреплялся на токопроводящем двустороннем скотче, фиксируемом на алюминиевом столике для образцов. При исследовании среза мембраны, образец закреплялся в вертикальные тиски.

Эксперименты по исследованию водопроницаемости ультрафильтрационных мембран проводились на установке и по методике, описанной в работе [15]. Трансмембранное давление над мембраной является движущей силой процесса ультрафильтрационного разделения. Коэффициент водопроницаемости мембраны связан с движущей силой процесса разделения следующим уравнением:

$$\alpha = G/P, \quad (3)$$

где G – удельная производительность, м³/м² · с; P – трансмембранное давление, МПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 и 2 показаны рентгенограммы для ультрафильтрационных мембран УАМ-50 и УАМ-100. Основываясь на рентгенограммах, представленных на рисунках, мы можем предположить, что мембраны имеют ярко выраженные три максимума, расположенные примерно в диапазоне углов от 17.50° до 25.60°, которые характерны для ацетатцеллюлозных композиционных материалов [16, 17]. Особенностью рентгеновских спектров является однотипность положения и существенное перераспределение интенсивности рефлексов для воздушно сухих и рабочих образ-

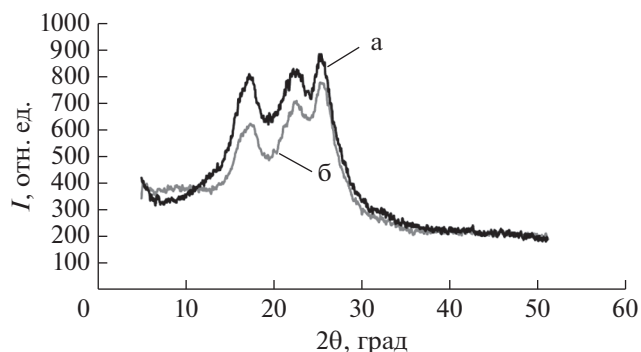


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы образцов ультрафильтрационных мембран УАМ-50: а – воздушно сухого; б – отработанного в растворе анионных ПАВ.

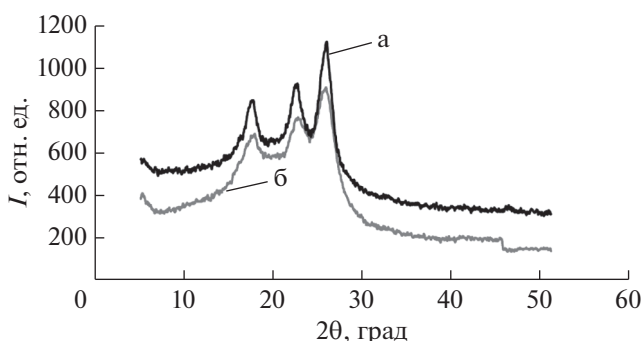


Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы образцов ультрафильтрационных мембран УАМ-100: а – воздушно сухого; б – отработанного в растворе анионных ПАВ.

цов в интервале углов рассеяния 2θ от 7° до 35° и проявление диффузного гало в районе $2\theta = 35^\circ - 55^\circ$ для рабочих образцов. Приведенные на рис. 1 и 2 данные (при их сравнении с литературными) указывают на однотипный набор дифракционных рефлексов при углах $2\theta = 17.50^\circ, 22.30^\circ, 25.60^\circ$

для обоих образцов мембран, что соотносится с кристаллическими рефлексами пленок, сформированных из полиамидных волокон (нейлон) [18].

Значения степени кристалличности при воздействии трансмембранного давления на рабочие образцы ультрафильтрационных мембран приведено в табл. 2. Следует отметить, что с воздействием трансмембранного давления кристалличность снижается практически в два раза, при этом размеры кристаллов для мембраны УАМ-50 уменьшаются с 2.6 до 2.1 нм, для мембраны УАМ-100 – с 2.9 до 2.4 нм в кристаллической решетке мембран. Так, кристалличность для воздушносухих образцов мембран УАМ-50 составляет 68%, для УАМ-100 – 74%, а для рабочих образцов мембран снижается: для УАМ-50 до 32% и для УАМ-100 до 41% (табл. 2). Различия в рентгенограммах, приведенных на рис. 1, 2 для мембран УАМ-50 и УАМ-100, можно связать с толщиной активного слоя (толщина активного слоя равна 27 нм для УАМ-50 и 15 нм для УАМ-100) и технологией изготовления дренажного слоя (основа дренажного слоя у мембраны УАМ-50 тканевая, а у мембраны УАМ-100 – валяльная).

Результаты исследований морфологии мембран методом РЭМ представлены на рис. 3–5. Из РЭМ-изображений следует, что на поверхности мембраны видны поры разных диаметров. Для мембраны УАМ-50 это поры размером от 2.5 до 40 нм, для мембраны УАМ-100 – от 10 до 40 нм. Следует отметить, что толщина активного слоя мембран УАМ-50 и УАМ-100 различна. Так активный слой мембраны УАМ-50 имеет толщину 27 нм, а толщина активного слоя у мембраны УАМ-100 составляет 15 нм.

Схематическое изображение активного слоя мембраны и подложки приведено на рис. 6. Можно отметить, что активный слой ультрафильтрационных мембран имеет ассиметричную структуру пор. Активный слой мембраны можно разделить на две составляющие: селективный слой с

Таблица 2. Структурные микропараметры исходных и рабочих образцов ультрафильтрационных мембран типа УПМ-50, УПМ-100

Тип мембраны	Структурные параметры	Исходный образец		Рабочий образец	
		$2\theta_1$	$2\theta_3$	$2\theta_1$	$2\theta_3$
УАМ-50	2θ , град	17.04	25.19	17.53	25.95
	I , %	11	9	15	31
	$L_{окр}$, нм	2.6	3.2	2.1	2.8
	РСК, %	68		32	
УАМ-100	2θ , град	17.34	25.82	18.35	26.38
	I , %	6	16	3	15
	$L_{окр}$, нм	2.9	4.1	2.4	3.8
	РСК, %	74		41	

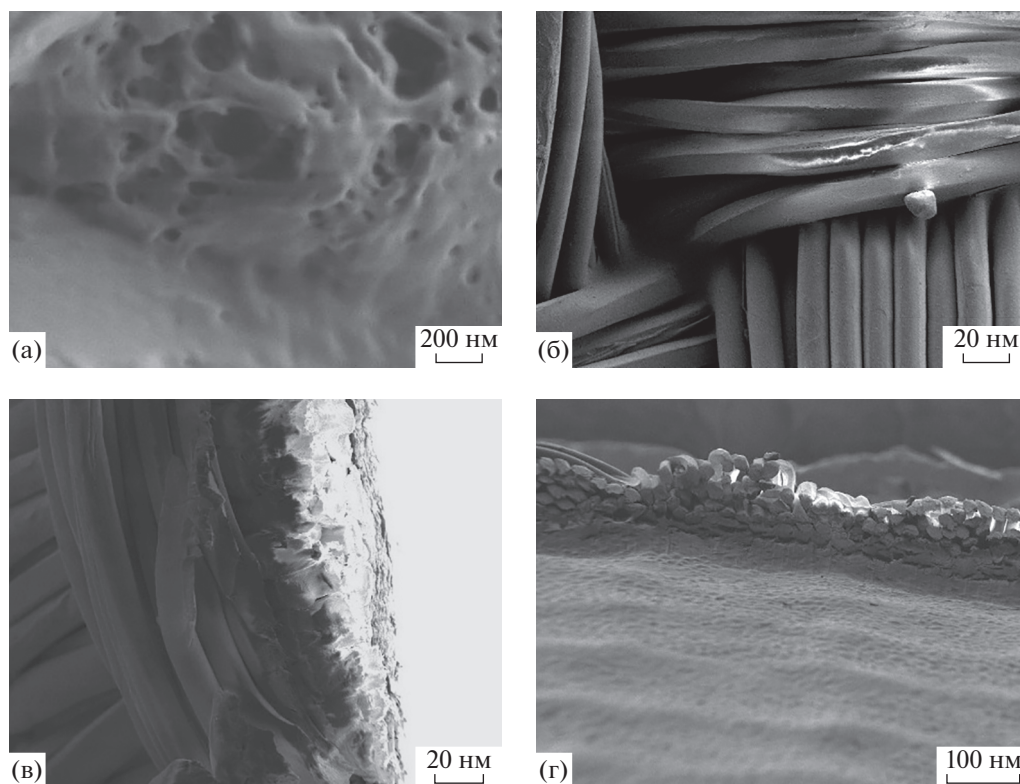


Рис. 3. РЭМ-изображение мембраны УАМ-50: а – поверхность мембраны (ее активный слой); б – поверхность подложки, для данной мембраны – нейлон тканевого типа; в – срез мембраны; г – срез мембраны, где видны границы активного слоя и подложки.

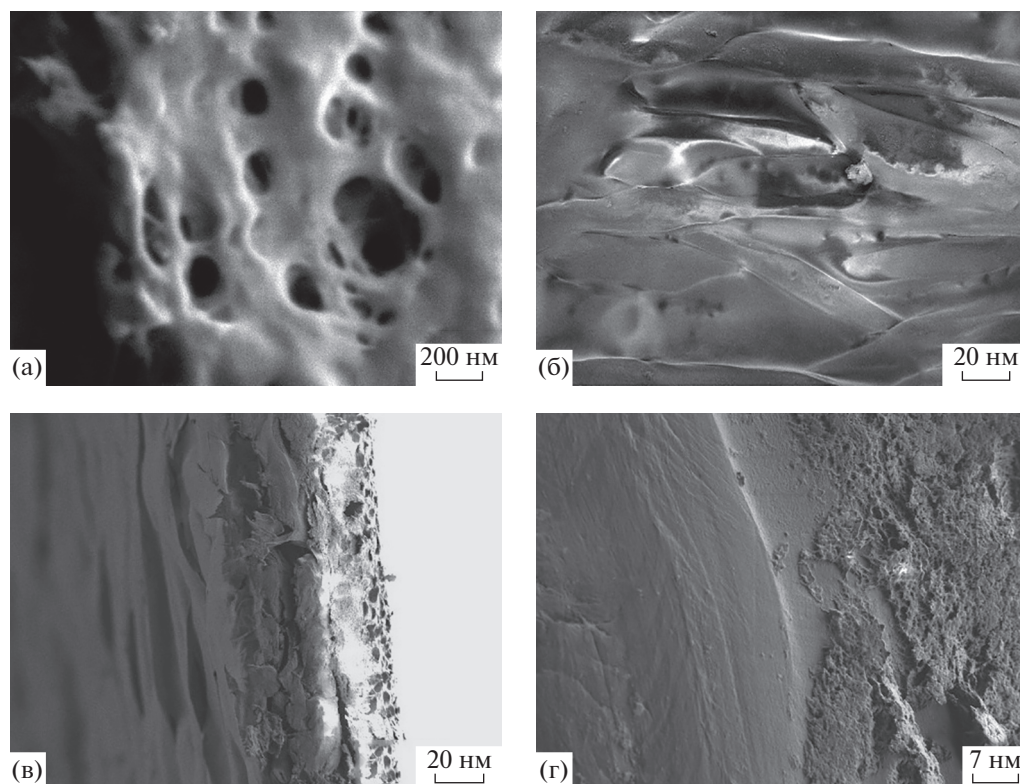


Рис. 4. РЭМ-изображение мембраны УАМ-100: а – поверхность мембраны (ее активный слой); б – поверхность подложки, для данной мембраны – нейлон тканевого типа; в – срез мембраны; г – срез мембраны, где мы видим границы активного слоя и подложки.

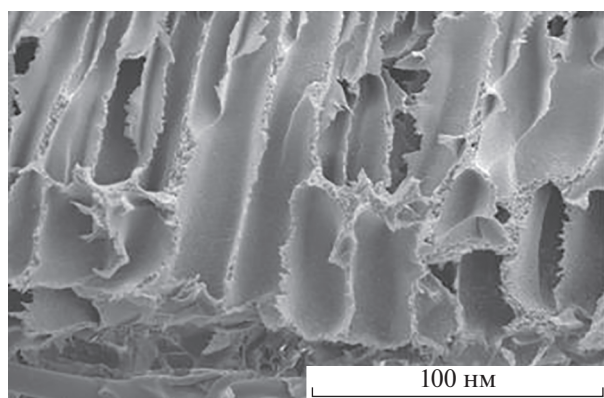


Рис. 5. РЭМ-изображение среза активной мембраны УАМ.

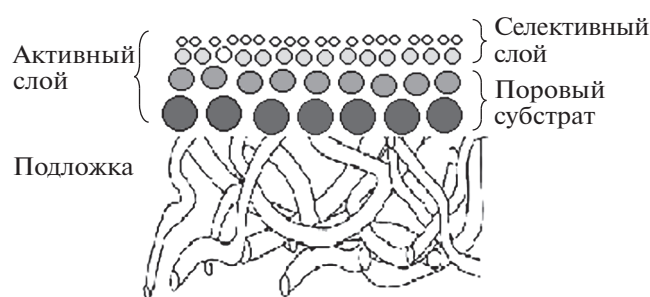


Рис. 6. Схематическое изображение активного слоя ультрафильтрационной ацетатцеллюлозной мембраны.

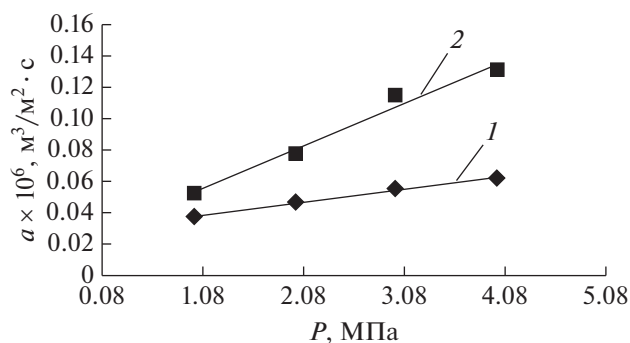


Рис. 7. Зависимость водопроницаемости от трансмембранного давления для ультрафильтрационных ацетатцеллюлозных мембран: 1 – УАМ-50 и 2 – УАМ-100.

малым размером пор и поровый субстрат, в котором поры увеличиваются в диаметре по мере приближения их к подложке [19, 20].

На рис. 7 представлена зависимость водопроницаемости ультрафильтрационных мембран от трансмембранного давления. Исходя из полученных данных видно, что водопроницаемость мембран увеличивается с ростом трансмембранного давления, вероятнее всего происходят структур-

ные превращения, то есть уменьшается кристалличность при повышении движущей силы процесса. Следует отметить, что водопроницаемость на мембране УАМ-100 выше, чем на мембране УАМ-50, так как размер пор мембраны УАМ-100 и общая пористость больше, чем у мембраны УАМ-50.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рентгенодифрактометрическими, электронно-микроскопическими и кинетическими исследованиями установлено, что в результате воздействия трансмембранного давления на рабочие образцы ультрафильтрационных мембран УАМ-50 и УАМ-100 происходят структурные превращения, в результате которых снижается кристалличность в два раза, уменьшаются размеры кристаллов в кристаллической решетке, что по кинетическим зависимостям приводит к увеличению водопроницаемости. Анализ данных электронной микроскопии позволяет сделать вывод, что активный слой ультрафильтрационных мембран имеет ассиметричную структуру пор и его можно разделить на две составляющие: селективный слой с малым размером пор и поровый субстрат, в котором поры увеличиваются в диаметре по мере приближения их к подложке, имеющей для мембраны УАМ-50 тканевую основу, а для мембраны УАМ-100 валяльную основу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sourirajan S. // Pure and Applied Chemistry. 1978. V. 50. P. 593.
2. Корольков И.В., Машенцева А.А., Гювен О., Здоровец М.В. // Мембраны и мембранные технологии. 2017. Т. 7. № 6. С. 414. <https://doi.org/10.1134/S2218117217060062>
3. Абросимова Г.Е., Аронин А.С. // Поверхность. Рентген-, синхротр. и нейтрон. исслед. 2018. № 5. С. 91. <https://doi.org/10.7868/S0207352818050116>
4. Васильева В.И., Акберова Э.М., Голева Е.А., Яцев А.М., Цхай А.А. // Поверхность. Рентген-, синхротр. и нейтрон. исслед. 2017. № 4. С. 49. <https://doi.org/10.7868/S0207352817040199>
5. Latha C.S., Shanthanalakshmi D., Mohan D., Balu K., Kumarasamy M. // J. Appl. Polym. Sci. 2005. V. 97. № 3. P. 1307.
6. Васильева В.И., Битюцкая Л.А., Зайченко Н.А., Гречкина М.В., Ботова Т.С., Агапов Б.Л. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2008. Т. 8. № 2. С. 260.
7. Агеев Е.П., Матушкина Н.Н., Вихорева Г.А., Федотов Ю.А. // Сорбционные и хроматографические процессы. 2006. Т. 6. № 1. С. 55.
8. Zhang X., Liu H., Yeung K.L. // J. Phys. and Chem. Solids. 2005. V. 66. № 6. P. 1034.

9. *Khulbe K.C., Hamad F., Feng C., Matsuura T., Gumi T., Palet C.* // *Separ. and Purif. Technol.* 2004. V. 36. № 1. P. 53.
10. *Yoo S., Ford D.M., Shantz D.F.* // *Langmuir.* 2006. V. 22. № 4. P. 1839.
11. *Kusoglu A., Weber A.Z.* // *Chem. Rev.* 2017. № 117(3). P. 987.
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00159>
12. Мембраны и фильтрующие элементы. Владипор [Электронный ресурс]. URL: <http://www.vladipor.ru/> Дата обращения: 13.09.2020.
13. *Иоелович М.Я., Веверис Г.П.* // *Химия древесины.* 1987. № 5. С. 75.
14. *Азаров В.И., Буров А.В., Оболенская А.В.* // *Химия древесины и синтетических полимеров. Учебник для вузов.* СПб.: СПбЛТА, 1999. 628 с.
15. *Хорохорина И.В., Лазарев С.И., Головин Ю.М., Ковалев С.В., Кузнецов М.А.* // *Вестник технологическо-*
го университета. 2019. Т. 22. № 4. С. 95.
<https://doi.org/10.6060/ivkkt.20206307.6117>
16. *Стовбун С.В., Скоблин А.А.* // *Вестник МГУ.* 2012. Т. 3. № 4. С. 3.
17. *Lazarev S.I., Golovina Yu.M., Levina A.A.* // *Russian J. Physical Chemistry A.* 2019. V. 93. № 6. P. 985.
18. *Gregorio R.* // *J. Appl. Polym. Sci.* 2006. V. 100. P. 3272.
19. *Choi Y.-J., Park J.-M., Yeon K.-H., Moon S.-H.* // *J. Membr. Sci.* 2005. V. 250. № 1–2. P. 295.
20. *Лазарев С.И., Ковалева О.А., Головин Ю.М., Рыжук В.Ю.* // *Сорбционные и хроматографические процессы.* 2018. Т. 18. № 1. С. 83.
21. *Брык М.Т., Цапюк Е.А.* *Ультрафильтрация.* Киев: Наукова думка, 1989. 288 с.
22. *Lazarev S.I., Golovin Yu.M., Khorokhorina I.V., Lazarev D.S.* // *Russian J. Physical Chemistry A.* 2020. V. 94. № 9. P. 1914.

Research of Crystallinity and Waterproof of Surface Ultrafilter Layers Membranes UAM-50 and UAM-100

S. I. Lazarev¹, I. V. Khorokhorina^{1,*}, D. S. Lazarev¹, M. I. Mikhailin¹, A. A. Arzamastsev¹

¹*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Tambov State Technical University", Tambov, 392000 Russia*

**e-mail: kotelnikovirina@yandex.ru*

X-ray diffractometric, microscopic and kinetic studies of the surface layers of UAM-50 and UAM-100 ultrafiltration membranes were carried out. X-ray diffractometric measurements of crystallinity were carried out in the region of large angles 2θ from 2° to 40° on a DRON-3 diffractometer, using modern methods of computer processing of experimental data. Comparative analysis of X-ray diffraction patterns made it possible to note the coincidence of the diffraction angles for the studied samples of air-dry and working samples of ultrafiltration membranes, as well as that the membrane samples have pronounced three maxima located approximately in the range of angles from 17.50° to 25.60° . Crystallinity for air-dry samples was 68% for UAM-50 and UAM-100 – 74%, and for working samples of UAM-50 – 32% and UAM-100 – 41%, respectively. The surface of the drainage layers of the UAM-50 and UAM-100 ultrafiltration membranes was studied using a SUPRA 60VP scanning electron microscope (CarlZeiss) and an AUTOSORB – iQ-C. Studies have shown that the thickness of the active layer of the UAM-50 membrane is 27 nm, while that of the UAM-100 membrane is 15 nm. On the surface of the active layer of the membrane, pores of different diameters are visible. For the UAM-50 membrane, these are pores ranging in size from 2.5 to 40 nm, for the UAM-100 membrane, from 10 to 40 nm. Kinetic studies of ultrafiltration membranes have confirmed that the membranes are likely to have an asymmetric pore structure. Small pores trap contaminant molecules, while large pores in the membrane allow the permeate to quickly permeate into a more open permeate carrier, i.e. a purified solution. It was found that the water permeability on the working membrane increases with an increase in the transmembrane pressure due to an increase in the driving force of the process and restructuring of the crystal structure (a decrease in the size of crystals in the working sample of the membrane) and a decrease in the crystallinity of the membranes.

Keywords: water permeability, crystallinity, X-ray diffractometry, active layer, pores, ultrafiltration membrane.