

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ
ПОВЕРХНОСТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

УДК 66.081.6

КОНФОРМАЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК МФФК-3 И ПП-190
В ПРОЦЕССЕ ОЧИСТКИ ВОДНО-ОРГАНИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ

© 2022 г. С. И. Лазарев^а, Ю. М. Головин^а, Д. Н. Коновалов^{а,*}, С. И. Котенев^а,
Э. Ю. Яновская^б, С. В. Ковалев^а

^а Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Тамбовский государственный технический университет”, Тамбов, Россия

^б Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования “Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова” Министерства здравоохранения Российской Федерации, Москва, Россия

*e-mail: kdn1979dom@mail.ru

Поступила в редакцию 27.01.2022 г.

После доработки 28.02.2022 г.

Принята к публикации 02.03.2022 г.

Представлены результаты эволюции структуры в полимерных пленках вида МФФК-3 и ПП-190 в процессе очистки водно-органических растворов. Данные рентгеноструктурного анализа показали, что существенные изменения микроструктуры образцов рабочих пленок происходят в межкристаллитной аморфной фазе в результате конформации ламелярных кристаллитов, при этом рентгеновская степень кристалличности для пленки МФФК-3 уменьшилась на 22%, а для ПП-190 – на 9%. Приведены электронно-микроскопические исследования исходных и рабочих образцов микрофильтрационной мембраны МФФК-3 и предварительного фильтра ПП-190 с применением электронного микроскопа JEOL JSM 6510 при увеличении от 140 до 7000. Из исходных и рабочих образцов микрофильтрационной мембраны МФФК-3 и предварительного фильтра ПП-190 отмечается, что на поверхность активного слоя пленок сорбируются органические вещества, находящиеся в разделяемом растворе.

Ключевые слова: пленка, поверхность, структура, конформация, кристалличность, трансмембранное давление, органические вещества

DOI: 10.31857/S0044453722100144

В настоящее время исследования в области науки о материалах являются востребованными и актуальными, что подтверждается современными и многочисленными работами НИИ РАН, НИУ и образовательных организаций высшего образования. Создание новых и исследование уже имеющих материалов находит свое применение в различных отраслях промышленности, а, особенно, в области науки массопереноса в пористых телах. Это создание катализаторов, сорбентов, мембран (полупроницаемых, ионообменных) и т.д. Изучение свойств подобных материалов современными методами исследования (рентгенодифрактометрия, дифференциально-сканирующая калориметрия, ИК-спектроскопия, электронная микроскопия и др.) необходимо для оценки и прогнозирования их применения в различных массопереносных и гидродинамических процессах.

В работе [1] методом рентгеноструктурного анализа исследована надмолекулярная структура

высокомолекулярного крабового хитозана, который является перспективным в качестве исходного сырья для изготовления фильтрационных мембран различного функционального назначения. Установлено, что полимерная матрица такого хитозана включает кристаллические и аморфные области разной степени упорядоченности. Выявлены основные кристаллические рефлексы и аморфные гало, для которых рассчитаны размеры кристаллитов и аморфных структурных образований, а также межплоскостные расстояния. Обнаружено, что основной мотив кристаллических решеток хитозана хорошо сохраняется и в его аморфной части. Это свидетельствует о высокой степени корреляции надмолекулярных структур кристаллической и аморфной частей, а также об отсутствии в высокомолекулярном крабовом хитозане абсолютно неупорядоченных структурных областей.

В источнике [2] комплексно изучены параметры трековых мембран на основе полиэтилентерефталата на различных этапах их формирования. Использование рентгеноструктурного анализа показало изменения структуры полимера при его облучении, УФ-сенсibilизации и травлении.

В литературе [3] исследована возможность интенсификации разделения водомасляных эмульсий на основе масла марки “И-20А” с использованием ультрафильтрационных полисульфонамидных мембран. Методами растекающейся капли, ИК-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа проведены исследования поверхностных и структурных характеристик ультрафильтрационных полисульфонамидных мембран, обработанных в потоке высокочастотной плазмы пониженного давления в среде аргона и азота. Авторами работы [4] сделано предположение, что связанная и капиллярная вода в мембране не явно влияют на перенос воды и растворенного вещества. Молекулы воды сорбируются в кристаллические и аморфные области, образуя слой связанной воды не обладающей растворяющей способностью. Образование прочных водородных связей с поверхностными ионами пор в аморфных областях и дефектах кристаллитов мембраны ведет, в той или иной степени, к нарушению надмолекулярной структуры полимерной мембраны.

В статье [5] авторами отмечена возможность использования сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) для анализа структуры полимерных полупроницаемых нанопористых мембран. Анализ результатов позволил сделать вывод, что метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) полезен для определения конструкции активного слоя и опорного слоя нанопористой полимерной мембраны. В этой работе отмечено, что энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия (EDS, EDX) представляет “усредненные” данные по обоим слоям нанопористой мембраны. Для анализа ультрафильтрационных пористых мембран авторами работы [6] на основе методов сфокусированного ионного пучка и последовательной блочной сканирующей электронной микроскопии предложен новый алгоритм для оценки пористости и среднего размера пор в различных слоях, ортогональных и параллельных поверхности мембраны. Трехмерная реконструкция позволила дополнительно визуализировать взаимосвязь пор в разных частях мембраны. В работе [7] рассмотрены результаты применения нескольких методов микроскопии для получения поверхностных и объемных характеристик плоских мембран из полиэфирсульфона и полого волокна. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) с обнаружением “в линзе” использовалась

для получения информации о размерах пор слоев мембраны в атомном масштабе. Интерферометрия белого света (WLI) и атомно-силовая микроскопия (АСМ) с использованием разных масштабов показали, что шероховатость мембраны заметно увеличивается с увеличением масштаба наблюдения и что существует преемственность между различными размерами сканирования для определения среднеквадратичной шероховатости. Эллипсометрические измерения с высоким угловым разрешением использовались для получения характеристик каждой границы отсечки, и источник рассеяния был идентифицирован как исходящий от объема мембраны. В работе [8] с помощью сканирующей электронной микроскопии получены данные о влиянии различных композиций (поливиниловый спирт и крахмал) на пористую структуру полимерных мембран. В зависимости от содержания крахмала фиксируется образование микропор размером 1–10 мкм в полимерной мембране. В работе [9] предложено использование электронной микроскопии при исследовании морфологии ионных кластеров, образующихся в мембранах и влияющих на транспортные и электрические свойства.

Анализ результатов, представленных в работе [10] по колебательно-спектроскопическим исследованиям показал, что в основе взаимодействия в системе сорбент-сорбат происходит ионообменная сорбция по реакциям протонирования с присоединением протонированного водорода к карбоксильной группе аминокислоты и ионного обмена с вытеснением иона водорода в равновесный раствор. Протекание обменной сорбции за счет дополнительных межчастичных взаимодействий, характерных для ароматической аминокислоты фенилаланина, доказано выявленными эффектами ассоциации сорбата в фазе полимерного материала.

В статье [11] проведены экспериментальные исследования воздушно-сухих и водонасыщенных композиционных пленок вида УАМ-50, УАМ-100 и МГА-95 методом дифференциально-сканирующей калориметрии. Доказано влияние температуры на конформационные изменения структурных и теплофизических характеристик. В образцах УАМ-50, УАМ-100 на границе раздела фаз возникает межфазный слой, указывающий на гидратацию полярных групп ацетатцеллюлозы и полиамида. Установлено, что в водонасыщенных образцах исследуемых мембран происходит снижение кристалличности композиционных пленок. В источнике [12] методом термогравиметрии исследованы ацетатцеллюлозные пористые пленки МГА-80 и МГА-95. Доказано влияние трансмембранного давления и температуры на кинетические характеристики, что связано с процессом деструкции в активном слое и полимерной подложке исследуемых мембран. Исследование аце-

татцеллюлозных пористых пленок МГА-80 и МГА-95 при трансмембранном давлении и температурном воздействии показало, что при повышении температуры до 50°C проницаемость и удельный выходной поток по воде возрастает. Анализ зависимостей удельного выходного потока от температуры выявил, что при начальном росте температуры на 10°C удельный выходной поток по воде увеличивается на ~18%. Это обусловлено структурными изменениями в ацетатцеллюлозном слое.

Анализ литературных данных [1–12] показывает необходимость исследования влияния трансмембранного давления и водных растворов, содержащих органические вещества, на структурные превращения в пористых пленках наиболее информативными физическими методами, такими как рентгеновское рассеивание и электронная микроскопия. Это позволит объяснить и спрогнозировать механизм массопереноса веществ в поверхностном слое и поровом пространстве полимерных пористых пленок. Поэтому, целью данной работы являются рентгеноструктурные и электронно-микроскопические исследования влияния конформационных превращений на структурные характеристики пористых пленок МФФК-3 и ПП-190 в процессе очистки водно-органических растворов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования являются исходные и рабочие образцы коммерческих пористых пленок МФФК-3 и ПП-190 (производства ООО НПП “Технофильтр”) г. Владимир [13], а также смесь в равной пропорции метилового эфира растительного масла (Э-фаза) и воды (водно-органический раствор).

Характеристики композитной пленки МФФК-3 состоящей из ПЭТФ (лавсана-дренажный слой) с поверхностным активным слоем из ПВДФ (поливинилиденфторит-фторопласт-2): средний диаметр пор – 0.45 мкм; производительность по этиловому спирту, при $P = 0.05$ МПа – не менее 7500 дм³/(м² ч); точка пузырька по этанолу – 56; рабочее давление – не менее 0.56 кгс/см²; максимальная температура – 353 К; диапазон рН – 1–13.

Характеристики ПП-190 гомогенной пленки, состоящей из изотактического полипропилена (в работе в основном использовали полипропилен марки РРG 1035-08) “Ставролен” (обозначается ПП), в котором содержатся термостабилизатор и стабилизатор процесса (антиоксиданты), а также антикоррозионная добавка: эффективность удержания частиц, не менее 98% – 3 мкм, не менее 95% – 2 мкм; начальная производительность по дистиллированной воде, при $P =$

$= 0.05$ МПа – не менее 400 см³/(см² мин); максимальный перепад давления – 0.5 МПа при 293 К, 0.2 МПа при 353 К; максимальная температура – 363К; диапазон рН – 2–13.

Для эксперимента вырезались сухие исходные и рабочие образцы из микрофльтрационной мембраны МФФК-3 и предварительного фильтра ПП-190. Рабочие образцы пленок МФФК-3 и ПП-190 получены при микрофльтрационной очистке водно-органического раствора, содержащего эфирные масла, при комнатной температуре и транс-мембранном давлении от 0.15 до 0.5 МПа в течение 6 ч 45 мин (24300 с) [14].

Рассеяние рентгеновских лучей образцами анализировали на дифрактометре D2 Phaser (Bruker AXS, Германия) по методу на “отражение”, используя CuK_α -излучение с длиной волны $\lambda = 0.1542$ нм в интервале $2\theta = 5\text{--}45^\circ$.

Электронно-микроскопические исследования проводились с помощью электронного микроскопа JEOL JSM 6510. Используемое оборудование было представлено центром коллективного пользования научным оборудованием “ТГУ им. Г.Р. Державина”.

На рис. 1, 2 представлены выборки электронных изображений исходных образцов микрофльтрационной мембраны МФФК-3 и подложки, предварительного фильтра ПП-190 (подложка отсутствует) при различном увеличении и многократной повторяемости эксперимента.

Рентгеновскую степень кристалличности ($X_{\text{рск}}$) определяли способом Аггарвала–Тилля [15], сущность которого заключается в том, что на дифрактограмме полимерного материала разделяют отражения, связанные с кристаллической и аморфной фазами, а расчет производится по соотношению:

$$X_{\text{рск}} = \frac{S_{\text{кр}}}{S_{\text{кр}} + S_{\text{ам}}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $S_{\text{кр}}$ – площадь кристаллических пиков, имп/(с град); $S_{\text{ам}}$ – площадь под кривой аморфной фазы, имп/(с град) (определяются по дифракционной кривой).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Дифрактограммы пленок исходного и рабочего образцов мембраны МФФК-3 представлены на рис. 3а. Присутствие интенсивных рефлексов на рентгенограммах первого порядка при $2\theta = 17.7, 19.1, 22.7, 26.1^\circ$ указывает на наличие кристаллических фаз в образцах мембраны от различных кристаллографических плоскостей элементарной ячейки, а относительная интенсивность рефлексов свидетельствует о расположении кристаллитов по отношению рассеивающего луча

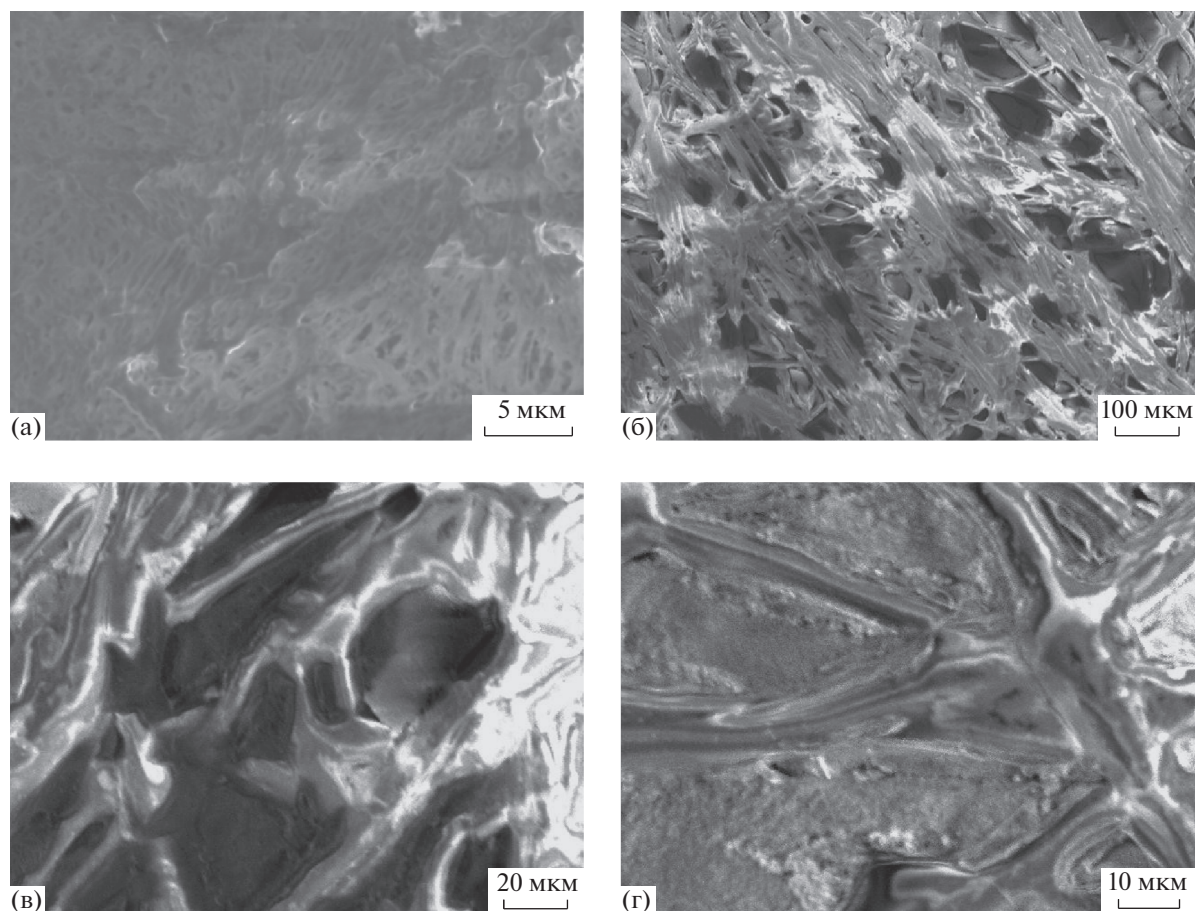


Рис. 1. Электронные изображения исходных образцов микрофильтрационной мембраны МФФК-3 при увеличении 4000 (а) и подложки при увеличении 140 (б), 700 (в), 1300 (г).

и, конечно, относительно поверхности образца. Суммарная интенсивность под кривой рентгеновского рассеяния соответствует рассеянию от кристаллической и аморфной фаз.

Известно [13], что МФФК мембрана композитна и сформирована на основе сополимеров винилиденфторида с тетрафторэтиленом (ВДФ-ТФЭ) (ПВДФ) на полимерном каркасе из лавсана (ПЭТФ). Кристаллическая фаза ПВДФ сополимеров винилиденфторида+тетрафторэтилена характеризуется наличием трех основных полиморфных модификаций, α , β , γ [16], где α -фаза является стабильной и наиболее распространенной из кристаллических фаз. На рентгенограммах α -фаза проявляется характерными рефлексами при $2\theta = 17.66, 18.30$ и 19.90° от плоскостей (100), (020) и (110) соответственно и пиком при $2\theta = 26.70^\circ$, соответствующему дифракции от плоскости (021) [17]. Кристаллическая структура полиэтилентерефталата (ПЭТФ) [18] с параметрами элементарной ячейки $a = 0.45$ нм, $b = 0.59$ нм, $c = 10.7$ нм [19], идентифицируется дифракционными пиками при $2\theta \sim 17.7, 22.7, 26.1^\circ$ от кристаллографических плоскостей (010), (110), (100). Не-

обходимо отметить, что оси макромолекул ПВДФ и ПЭТФ в кристаллических ячейках располагаются параллельно кристаллографической оси c и плоскости поверхности пленки, что является критерием, определяющим особые свойства композитного материала мембраны, его кристалличности и термостойкости.

Сравнение экспериментальных рентгенограмм с данными авторов [17, 20] по рентгеноструктурному исследованию чистых ПВДФ и ПЭТФ полимеров позволяет допустить, что дифрактограмма от образцов МФФК мембраны представляет суперпозицию двух кристаллических фаз сополимеров, перекрывающих друг друга. Рефлексы от воздушно-сухого образца при $2\theta = 17.7, 19.1^\circ$ от соответствующих плоскостей (100), (110) ПВДФ маскируют рефлекс при $2\theta \sim 17.23^\circ$ от плоскости (010) ПЭТФ, а рефлексы при $2\theta \sim 22.7, 26.1^\circ$ от плоскостей (110), (100) ПЭТФ маскируют пик при $2\theta = 26.70^\circ$ от плоскости (021) ПВДФ.

На спектрограмме рабочего образца можно отметить падение общей пиковой интенсивности

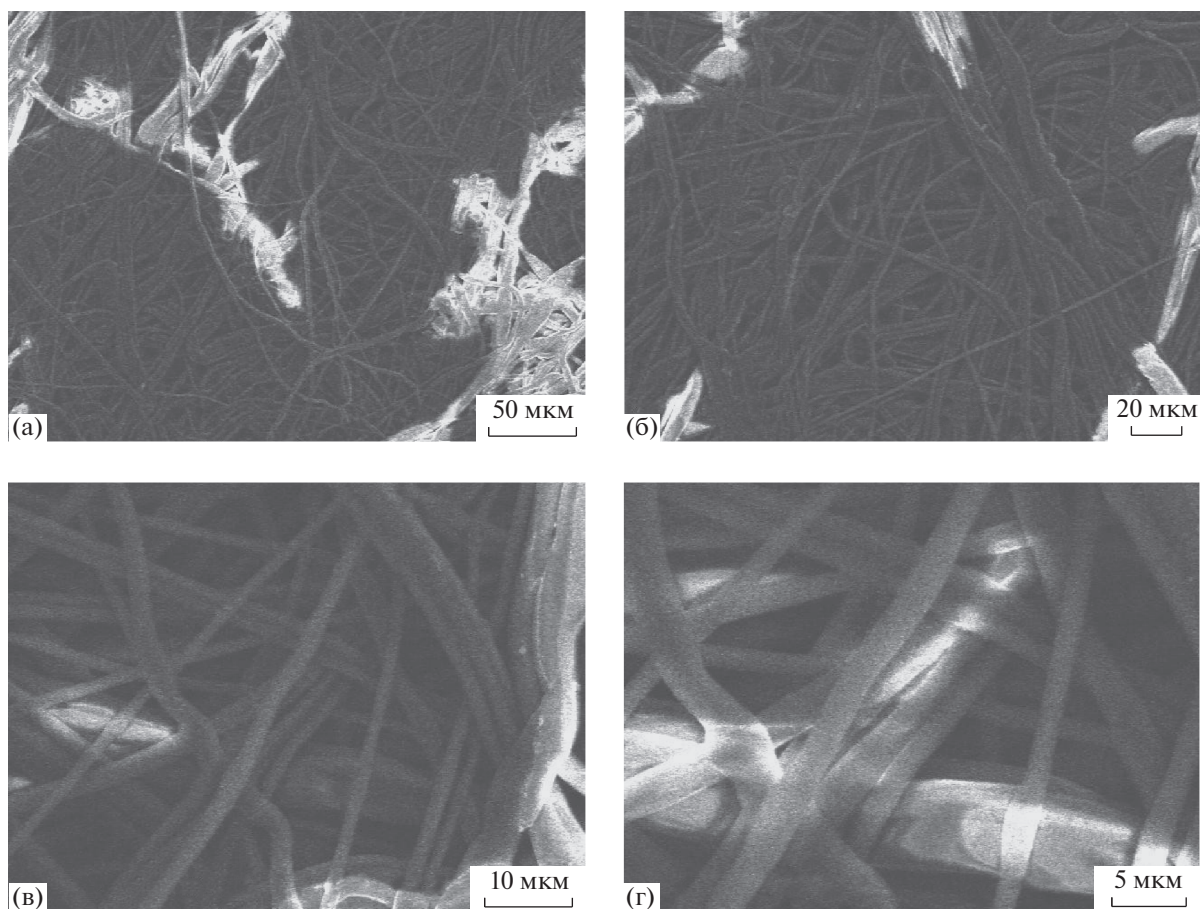


Рис. 2. Электронные изображения исходных образцов предварительного фильтра ПП-190 при увеличении 400 (а), 550 (б), 2000 (в), 3500 (г).

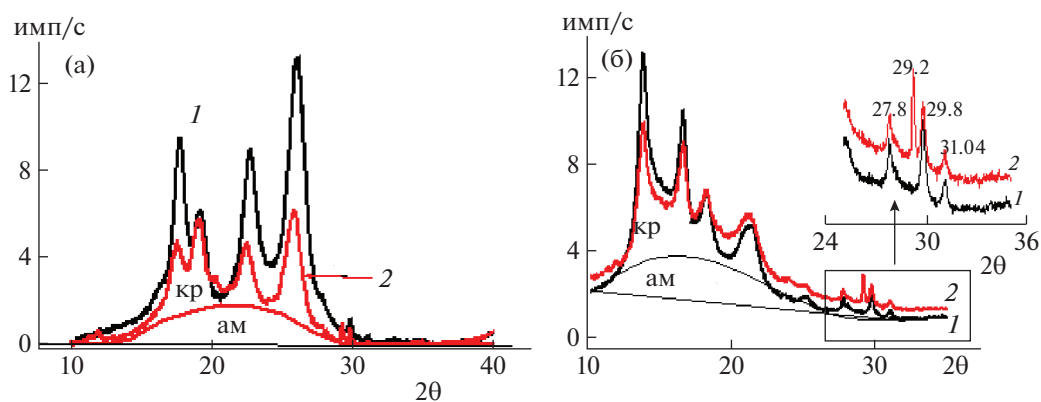


Рис. 3. Экспериментальные зависимости, полученные методом рентгеноструктурного анализа для пленок МФК-3 (а) и ПП-190 (б): 1 – исходная, 2 – рабочая.

рефлексов с увеличением диффузного гало, смещенного в область малых углов дифракции и увеличение интенсивности рефлекса при угле $2\theta \sim 19.1^\circ$ (рис. 3а). Подобные изменения, следуя формальной логике, свидетельствуют об эволю-

ции кристаллографической текстуры. Для анализа ориентации кристаллитов в композитной пленке МФК-3 был проведен сравнительный анализ нормированных пиковых интенсивностей по отношению к сумме пиковых интенсивностей

Таблица 1. Приведенные значения пиковых интенсивностей и рентгеновская степень кристалличности ($X_{\text{рск}}$)

Пленка	Параметры	Кристаллографические параметры				$X_{\text{рск}}, \%$
МФФК-3	Угл. дифрак. (град)	26.1	22.7	17.7	19.1	
	Кристалл. плоск.	(100)	(110)	(010)	(110)	
	Исход. ($I_{\text{отн}}$)	0.35	0.24	0.25	0.16	76
	Рабоч. ($I_{\text{отн}}$)	0.29	0.22	0.21	0.27	59
ПП-190	Угл. дифрак. (град)	21.3	18.3	16.6	14.3	
	Кристалл. плоск.	(111)	(130)	(040)	(110)	
	Исход. ($I_{\text{отн}}$)	0.32	0.44	0.78	1	47
	Рабоч. ($I_{\text{отн}}$)	0.5	0.62	0.92	1	43

четырёх основных рефлексов, зафиксированных на дифрактограмме – это рефлексы при углах – $2\theta \sim 17.7, 19.1, 22.7, 26.1^\circ$. Числовые значения микроструктурных параметров и рентгеновская степень кристалличности ($X_{\text{рск}}$) сведены в таблице 1.

Из табличных данных следует, что отношение пиковых интенсивностей рабочего и исходного образцов мембраны МФФК-3 уменьшилось на ~20% для кристаллографических плоскостей (100), (010), (110). В то же время для дифракционного угла $2\theta \sim 19.1^\circ$ (110) это соотношение увеличилось на 40%. Следовательно, падение пиковых интенсивностей для кристаллографических плоскостей (100), (010), (110) практически на одинаковую величину указывает на уменьшение кристалличности пленки, а увеличение пиковой интенсивности при угле $2\theta \sim 19.1^\circ$ (110) свидетельствует о деформации кристаллитов ПВДФ, скорее всего, перпендикулярно кристаллографической оси c элементарной ячейки. Полученные данные свидетельствуют о влиянии трансмембранного давления на ориентацию макромолекул аморфной фазы преимущественно в плоскости пленки [21, 22]. Таким образом, можно утверждать, что трансмембранное давление инициирует в композитной пленке МФФК-3 конформацию кристаллитов в ПЭТФ относительно основной оси (c) полимерных молекул.

Полипропилен (ПП) (рис. 3б) является синтетическим термопластичным полимером и относится к группе неполярных полиолефинов. Кристаллическая фаза состоит из макромолекул изотактического ПП, а в аморфную фазу входят макромолекулы как изотактического, так и атактического ПП. Известно, что α -фаза является доминирующей кристаллической модификацией ПП.

На дифрактограммах видно, что как в исходном, так и в рабочем образцах полипропилена наблюдаются на фоне аморфного гало сравнительно узкие кристаллографические рефлексы с одинаковыми дифракционными углами $2\theta = 13.8, 16.6, 18.3, 21.3, 25.1, 27.8, 29.8^\circ$, которые соответ-

ствуют кристаллитам доминирующей моноклинной (α -фазы) изотактического ПП [23, 24]. Тем не менее, на рентгенограмме рабочего образца можно заметить некоторое перераспределение интенсивностей рефлексов и появление дифракционного пика при $2\theta = 29.2^\circ$, что, очевидно, указывает на переориентацию ламелярных кристаллитов. Следует подчеркнуть, что на интенсивность рефлексов в рентгеноструктурных исследованиях влияет ориентация кристалла. В общем случае, если a -, b - или c -оси кристаллов ориентируются перпендикулярно поверхности исследуемого образца, интенсивность отражения от плоскостей ($h00$), ($0k0$) или ($00l$) увеличивается.

Эволюцию молекулярной ориентации в образцах ПП-190 оценивали по приведенным пиковым интенсивностям рефлексов – при $2\theta = 13.8, 16.6, 18.3, 21.3^\circ$, соответствующих кристаллографическим плоскостям с индексами (110), (040), (130), (111) относительно самого интенсивного рефлекса $2\theta = 13.8^\circ$ (110), табл. 3. Анализ показал, что дифракционная картина для исходного образца (рис. 3б, кривая 1) характеризуется меньшей приведенной интенсивностью, чем для рабочего образца (рис. 3б, кривая 2) для $2\theta = 16.6^\circ$ от 0.78 до 0.92, для $2\theta = 18.3^\circ$ от 0.44 до 0.62 и для $2\theta = 21.3^\circ$ от 0.33 до 0.5 соответственно (таблице 1). Это свидетельствует о том, что в рабочем образце кристаллиты ПП в результате конформации ориентируются кристаллографической осью c предпочтительно перпендикулярно, а ламели почти параллельно плоскости мембраны. Подобный факт торсионной деформации ламелярных кристаллов происходит из-за ослабления или уменьшения числа “проходных” макромолекул аморфной фазы между кристаллическими областями. Как известно из работ ламелярный кристаллит не подвержен деформации, он может испытывать повороты вокруг основной оси полимерных молекул, находящихся в аморфной фазе, т.е. в межламелярном пространстве. Это представляется торсионным поворотом в фибриллярной структуре.

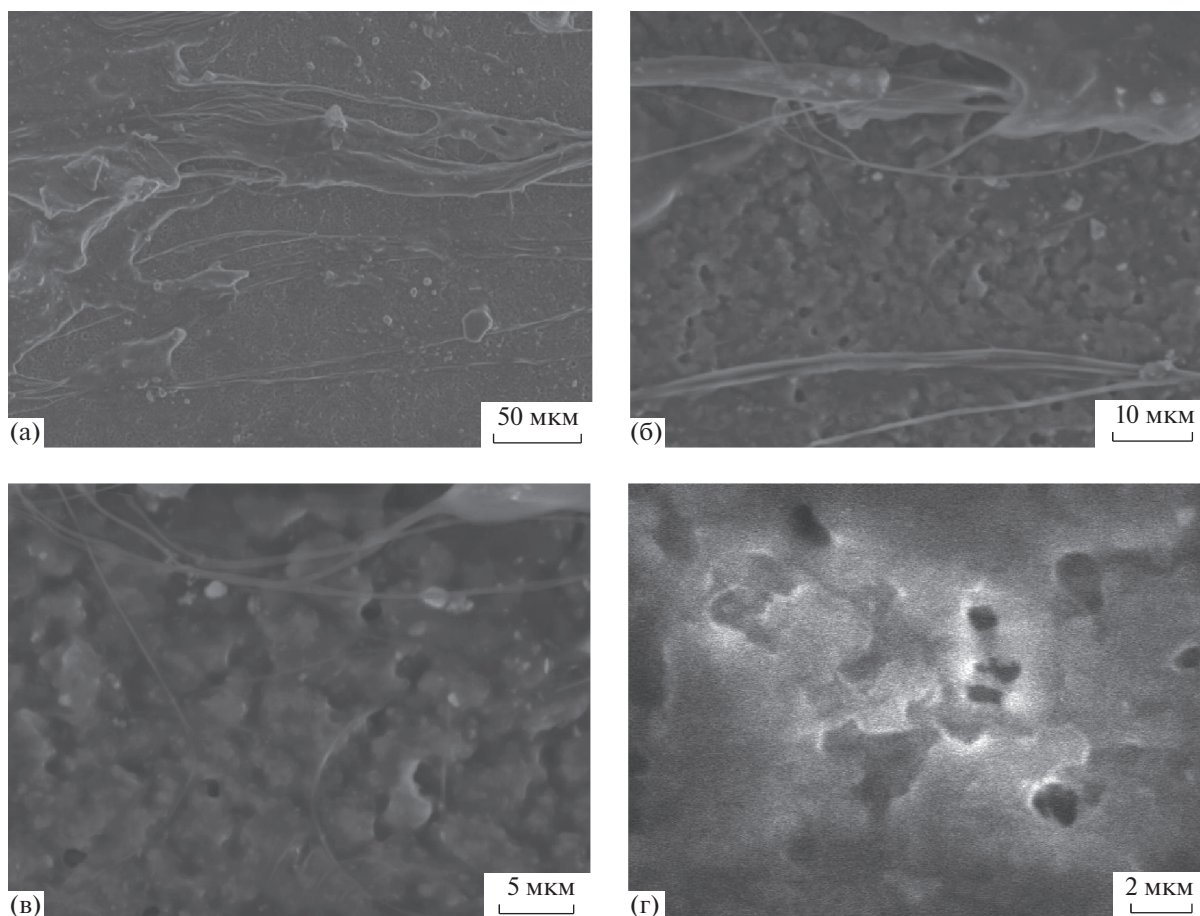


Рис. 4. Электронные изображения рабочих образцов микрофильтрационной мембраны МФФК-3 при увеличении 370 (а), 1800 (б), 3500 (в), 7000 (г).

На рис. 4, 5 представлены электронные изображения рабочих образцов микрофильтрационной мембраны МФФК-3 и предварительного фильтра ПП-190. Анализ электронных изображений при различных увеличениях образцов микрофильтрационной мембраны МФФК-3 и предварительного фильтра ПП-190 (воздушносухих и рабочих образцов), полученных до и после действия трансмембранного давления, показывает морфологические особенности, фиксируются остаточные гелевые сгустки, которые отчетливо видны на рис. 4 в отличие от предварительного фильтра ПП-190 (рис. 5), на изображениях которых такие образования отсутствуют.

При сравнении электронных изображений исходных и рабочих образцов (рис. 1, 4) можно отметить, что действительно на поверхности активного слоя видны гелевые образования, вероятно, продукт органических кислот. Для предварительного фильтра такие образования отсутствуют. Поверхность рабочего образца предварительного фильтра забита продуктами разделения исходного раствора, что отмечается при сравне-

нии рис. 2 и рис. 5 и также подтверждается экспериментальными исследованиями кинетических характеристик, где с течением времени происходит снижение гидродинамической проницаемости [14]. Поэтому при работе с микрофильтрационной мембраной МФФК-3 и предварительным фильтром ПП-190 с микроскопическими пустотами при мембранной фильтрации при действии трансмембранного давления активный слой может изменять свою структуру, что, вероятно, может привести к снижению или увеличению доли кристаллических или аморфных областей в активном слое мембраны и влияет на разделительные показатели мембраны и фильтра.

Таким образом, в результате выполненных экспериментальных и теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Сравнения данных, полученных в результате рентгеноструктурного анализа, показали, что существенные изменения микроструктуры образцов рабочих пленок происходят в межкристаллитной аморфной фазе в результате конформации ламелярных кристаллитов, при этом

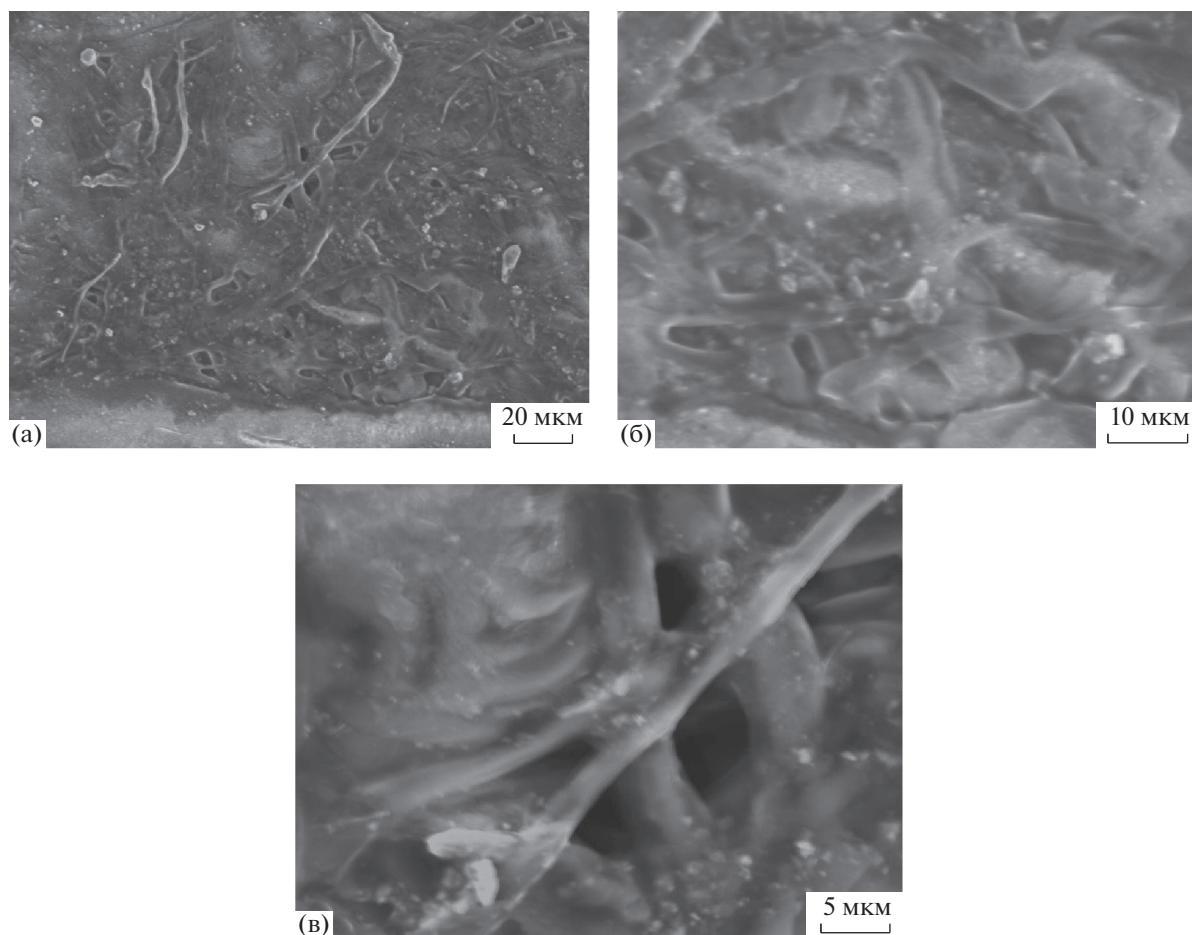


Рис. 5. Электронные изображения рабочих образцов предварительного фильтра ПП-190 при увеличении 650 (а), 1800 (б), 3000 (в).

рентгеновская степень кристалличности для мембраны МФФК-3 уменьшилась на 22%, а для предварительного фильтра ПП-190 – на 9%. Уменьшение кристалличности влечет за собой увеличение объема межкристаллитной аморфной фазы.

2. Выполненные электронно-микроскопические исследования исходных и рабочих образцов микрофильтрационной мембраны МФФК-3 и предварительного фильтра ПП-190 отмечают, что на поверхности активного слоя пленок сорбируются частицы, вероятнее всего, органические вещества находящиеся в разделяемом растворе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Седелкин В.М., Суркова А.Н., Лебедева О.А. и др.* // Изв. Волгоградского гос. технического университета. 2018. № 12. С. 72.
2. *Канюков Е.Ю., Шумская Е.Е., Якимчук Д.В. и др.* // Изв. НАН Армении. Физика. 2017. Т. 52. № 2. С. 212.
3. *Федотова А.В., Шайхиев И.Г., Дряхлов В.О. и др.* // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. № 5. С. 16.
4. *Шиповская А.Б.* Фазовый анализ систем эфир целлюлозы-мезофазогенный растворитель. Автореф. дис. ... докт. техн. наук. С.: Ин-т, 2009. С. 41.
5. *Kowalik-Klimczak A., Bednarska A., Gradkowski M.* // Problemy eksploatacji - maintenance problems. 2016. V. 1. P. 119.
6. *Sundaramoorthi G., Hadwiger M., Ben Romdhane M. et al.* // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2016. V. 55. I. 12. P. 3689.
7. *Tamime R., Wyart Y., Siozade L. et al.* // Membranes (Basel). 2011. V. 1 (2). P. 91.
8. *Zhang Y., Zhou L., Mao E.* // Applied Mechanics and Materials. 2011. V. 109. P. 110.
9. *Yakovlev S., Downing K.H.* // Phys. Chem. Chem. Phys. 2013. V. 15. P. 1052.
10. *Васильева В.И., Голева Е.А., Селеменев В.Ф. и др.* // Журн. физ. химии. 2019. Т. 93. № 3. С. 428.
11. *Lazarev S.I., Golovin Yu.M., Kovalev S.V. et al.* // Published in Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki. 2021. V. 91. № 3. P. 444.

12. *Lazarev S.I., Golovin Yu.M., Kovalev S.V. et al.* // High Temperature. 2020. V. 58. № 6. P. 812.
13. Технофильтр: сайт ООО НПП Технофильтр. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.technofilter.ru/catalog/laboratory-filtration/filtry-dlya-laboratoriy/> (дата обращения: 07.02.2021).
14. *Лазарев С.И., Нагорнов С.А., Ковалев С.В. и др.* // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2022. № 1. С. 86-95. <https://doi.org/10.31857/S1028096022010095>
15. *Zaroulis J.S., Boyce M.C.* // Polymer. 1997. V. 38. № 6. P. 1303.
16. *Кочервинский В.В.* // Успехи химии. 1996. № 10 (65). С. 936.
17. *Новаков И.А., Рахимова Н.А., Нустратов А.В. и др.* // Изв. ВолгГТУ. Серия “Химия и технология элементоорганических мономеров и полимерных материалов”. 2011. Вып. 8. № 2 (75). С. 121.
18. *Gregorio R.* // J. Appl. Polym. Sci. 2006. V. 100. P. 3272.
19. *Daubeny R. de P., Bunn C.W., Brown C.J.* // Proc. Roy. Soc. Ser A. 1954. V. 226. P. 531.
20. *Daubeny R. de P., Bunn C.W., Brown C.J.* // Ibid. 1955. V. 226. P. 531. электронный ресурс.
21. *Huisman R., Heuvel H.J.* // Appl. Polym. Sci. 1978. V. 22. I. 4. P. 943.
22. *Лазарев С.И., Головин Ю.М., Родионов Д.А.* // Журн. физ. химии. 2021. Т. 95. № 10. С. 1578. <https://doi.org/10.31857/S0044453721100150>
23. *Da Costa H.M., Ramosa V.D., de Oliveirab M.G.* // Polymer Testing. 2007. V. 26. № 5. P. 676. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2007.04.003>
24. *Favaro M.M., Branciforti M.C., Suman Bretas R.E.* // Materials Research. 2009. V. 12. P. 4.