

# **ФОРМИРОВАНИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН ВЫСОКО- И СУПЕРГИДРОФОБНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ УСТОЙЧИВОСТИ В ВОДЕ И ВОДНО-СОЛЕВЫХ РАСТВОРАХ**

Л.И. Кравец, М.А. Кувайцева, М.А. Ярмоленко, Р.В. Гайнутдинов, М.Ю. Яблоков

## **АННОТАЦИЯ**

Изучены морфология и смачиваемость наноразмерных покрытий, осажденных на поверхности полиэтилентерефталатной трековой мембраны путем электронно-лучевого диспергирования полимеров в вакууме. Показано, что применение данного метода модифицирования при использовании полимеров с низкой поверхностной энергией позволяет получать композиционные мембраны, состоящие из двух слоев, одним из которых является исходная трековая мембрана, характеризующаяся средним уровнем гидрофильности. Второй, осажденный слой, имеет гидрофобную природу. Исследована устойчивость полученных композиционных мембран при длительном контакте с водой, а также водно-солевыми растворами хлорида натрия с концентрацией от 5 до 15 г/л.

## **КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА**

ТРЕКОВЫЕ МЕМБРАНЫ, ПОЛИМЕРНЫЕ ПОКРЫТИЯ, КОМПОЗИЦИОННЫЕ МЕМБРАНЫ

## **FORMATION OF HIGH- AND SUPERHYDROPHOBIC POLYMER COATINGS ON THE TRACK-ETCHED MEMBRANE SURFACE AND INVESTIGATION OF THEIR STABILITY IN WATER AND WATER-SALT SOLUTIONS**

L.I. Kravets, M.A. Kuvaitseva, M.A. Yarmolenko, R.V. Gainutdinov, M.Yu. Yablokov

## **ABSTRACT**

The morphology and wettability of nanoscale coatings deposited on the poly(ethylene terephthalate) track-etched membrane surface by electron-beam dispersion of polymers in vacuum have been studied. It is shown that the application of this modification method using polymers with low surface energy to obtain composite membranes consisting of two layers, one of which is the original track-etched membrane, characterized by an average level of hydrophilicity. The second, deposited layer has a hydrophobic nature.

The stability of the obtained composite membranes under prolonged contact with water, as well as water-salt solutions of sodium chloride with a concentration of 5 to 15 g/l has been investigated.

## **KEYWORDS**

TRACK-ETCHED MEMBRANES, POLYMER COATINGS, COMPOSITE MEMBRANES

## **ВВЕДЕНИЕ**

Модифицирование полимерных материалов, в том числе мембран, является универсальным подходом, позволяющим варьировать в широком диапазоне их физико-химические, механические и эксплуатационные свойства. Одним из современных методов

модифицирования мембран является нанесение на их поверхность тонких полимерных покрытий. Такое модифицирование приводит к образованию композиционных мембран (КМ), состоящих из пористой подложки – исходной мембраны и осажденного слоя полимера. Наибольший интерес представляет разработка методов создания композиционных мембран, в которых один из слоев имеет высокопористую гидрофильную основу, а второй тонкий микропористый слой обладает гидрофобными свойствами. Мембраны подобного образца находят применение в процессах мембранной дистилляции для опреснения морской воды. Использование тонкого гидрофобного слоя в сочетании с толстым гидрофильным подслоем позволяет повысить производительность данного процесса за счет снижения сопротивления массообмену [1, 2].

Существуют различные методы нанесения полимерных покрытий на поверхность изделий. Наибольший интерес представляют методы формирования покрытий из активной газовой фазы, включающие их осаждение на поверхности твердого тела (подложке) в результате протекания реакций полимеризации адсорбированных низкомолекулярных органических соединений (прекурсоров), активированных под воздействием электронов, ионов, УФ излучения [3], или диспергированных в результате воздействия на мишень (полимер или олигомер) концентрированного потока энергии – электронов, ионов, лазерного излучения [4]. Особенностью второго подхода является одновременное протекание двух основных стадий, а именно, стадии образования летучих продуктов и стадии их активации. Указанные методы являются высокотехнологичными и позволяют регулировать структуру и состав осаждаемых слоев. Для получения гидрофобных покрытий используют материалы с низкой поверхностной энергией. К таким материалам в первую очередь относятся соединения на основе кремния и фтора.

Целью работы является изучение морфологии и смачиваемости наноразмерных полимерных покрытий, осажденных на поверхности полиэтилентерефталатной трековой мембраны (ПЭТФ ТМ) путем электронно-лучевого диспергирования (ЭЛД) полимеров в вакууме, и исследование устойчивости полученных композиционных мембран при длительном контакте с водой, а также водно-солевыми растворами хлорида натрия с концентрацией от 5 до 15 г/л, моделирующими морскую воду.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах использовали ПЭТФ ТМ с эффективным диаметром пор 250 нм, изготовленную на основе пленки Лавсан (ГОСТ 24234-80, Россия) толщиной 10,0 мкм. Для получения мембраны исходную пленку облучали ускоренными на циклотроне У-400 положительно заряженными ионами криптона с энергией  $\sim 3$  МэВ/нуклон. Флюенс ионов составлял  $2 \times 10^8$  см<sup>-2</sup>. Химическое травление облученной ПЭТФ-пленки проводили при температуре 75 °С в водном растворе гидроксида натрия с концентрацией 3 моль/л по стандартной методике [5]. До начала травления для увеличения избирательности процесса травления треков облученную пленку подвергали воздействию УФ-излучения с максимальной длиной волны спектра испускания 310–320 нм.

Мишенями для нанесения покрытий электронно-лучевым диспергированием полимеров служили порошки политетрафторэтилена (ПТФЭ), плотность которого составляла 2,15 г/см<sup>3</sup> (Aldrich) и сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) со средней молекулярной массой  $5 \times 10^6$  г/моль (Foresight Global FZE, UAE). В качестве источника электронов использовали электронно-лучевую пушку с катодом прямого

накала, позволяющую формировать пучки с энергией 0,8–1,6 кэВ площадью сечения  $(5-10) \times 10^{-4} \text{ м}^2$ . Начальное давление остаточных газов в вакуумной камере составляло  $4 \times 10^{-3}$  Па, температура поверхности подложки  $\sim 300 \text{ К}$ . Модифицированию подвергали одну сторону мембраны. Схема установки и методика осаждения покрытий методом ЭЛД подробно описаны нами в [2].

Характеристики исходной и модифицированных мембран определяли при помощи ряда методик. Газопроницаемость (поток воздуха, прошедший через мембрану) измеряли при заданном перепаде давления с помощью поплавкового расходомера. На основании полученных значений, используя формулу Хагена-Пуазейля, рассчитывали эффективный диаметр пор [6]. Смачиваемость поверхности мембран характеризовали значениями краевых углов по воде, измеренными с помощью установки “Easy Drop DSA100” (KRUSS, Germany) и программного обеспечения Drop Shape Analysis V.1.90.0.14. Морфологию поверхности мембран изучали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью прибора NTEGRA Prima (NT-MDT, Россия). Сканирование проводили в прерывисто-контактном режиме с использованием кремниевых зондов НА\_FM (Tipsnano, Estonia). Поле сканирования составляло  $2 \times 2 \text{ мкм}^2$  с разрешением  $512 \times 512$  точек на изображение. Основным определяемым параметром являлась величина среднеквадратичного отклонения высот поверхности от среднего значения ( $S_q$ ), рассчитанная по всем точкам скана. Для того чтобы избежать влияния пор при определении поверхностной шероховатости, исследовали также сканы меньшей площадью, не содержащие пор.

Для выяснения устойчивости полимерных покрытий проводили исследование полученных композиционных мембран при длительном контакте (18 час) с водой, а также водно-солевыми растворами хлорида натрия с концентрацией от 5 до 15 г/л, моделирующими морскую воду. Данные исследования выполняли в стеклянной ячейке, наполненной тестовым раствором. Исследуемые образцы помещали на дно ячейки таким образом, чтобы поверхность мембран, на которую было осаждено покрытие, полностью контактировала с тестовым раствором. После контакта с тестовым раствором мембраны высушивали на воздухе в течение 2 час.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерения характеристик ПЭТФ ТМ и мембран после нанесения на ее поверхность покрытий, полученных методом электронно-лучевого диспергирования СВМПЭ и ПТФЭ в вакууме, приведены в табл. 1. Формирование полимерных покрытий на поверхности исходной мембраны иллюстрирует рис. 1, на котором представлены трехмерные изображения поверхностного слоя композиционных мембран, полученные методом АСМ. Из представленных данных следует, что осаждение полимерных покрытий вызывает прирост массы образцов мембраны. Поток воздуха и, как следствие, эффективный диаметр пор композиционных мембран, рассчитываемый из величины газопроницаемости, при этом уменьшается (табл. 1). Наибольшее уменьшение эффективного диаметра пор происходит при нанесении покрытия из СВМПЭ. Так, осаждение покрытия из ПТФЭ толщиной 300 нм вызывает уменьшение эффективного диаметра пор исходной мембраны до 195 нм, в то время как при осаждении покрытия из СВМПЭ такой же толщины диаметр пор образующейся композиционной мембраны составляет 180 нм. При осаждении покрытия из ПТФЭ толщиной 500 нм эффективный

диаметр пор ПЭТФ ТМ уменьшается до 180 нм, а осаждение покрытия из СВМПЭ такой же толщины вызывает уменьшение ее эффективного диаметра пор до 145 нм (табл. 1).

Вместе с этим, как показали экспериментальные данные, диаметр пор на обратной стороне композиционных мембран остается неизменным. Это свидетельствует о том, что осаждение покрытий методом электронно-лучевого диспергирования полимеров в вакууме происходит лишь на стороне трековой мембраны, подвергнутой модифицированию. Нанесение на поверхность ПЭТФ ТМ покрытий данным методом приводит, таким образом, к формированию композиционных мембран, имеющих асимметричную форму пор – диаметр пор на необработанной стороне мембран не изменяется, а на модифицированной стороне происходит его уменьшение. Аналогичные данные получены нами при исследовании модифицирования трековых мембран методом полимеризации в плазме [7].

Таблица 1. Изменение характеристик ПЭТФ ТМ при нанесении на ее поверхность покрытий, полученных методом электронно-лучевого диспергирования полимеров

Параметры	Исходная мембрана	Тип и толщина осажденного слоя полимера			
		СВМПЭ		ПТФЭ	
		300 нм	500 нм	300 нм	500 нм
Увеличение массы образца, %	—	7,0	8,7	10,2	13,7
Поток воздуха при $\Delta P = 10^4$ Па, мл/мин см <sup>2</sup>	300	105	50	130	100
Эффективный диаметр пор, нм	250	180	145	195	180
Пористость, %	9,8	5,1	3,3	6,0	5,1
Угол смачивания, град	65	110	115	150	155
Поверхностная шероховатость, нм (площадь сканирования 2×2 мкм <sup>2</sup> )	50,0	39,3	50,4	16,3	20,1
Поверхностная шероховатость, нм (область без пор)	5,5	24,1	32,2	15,6	18,5

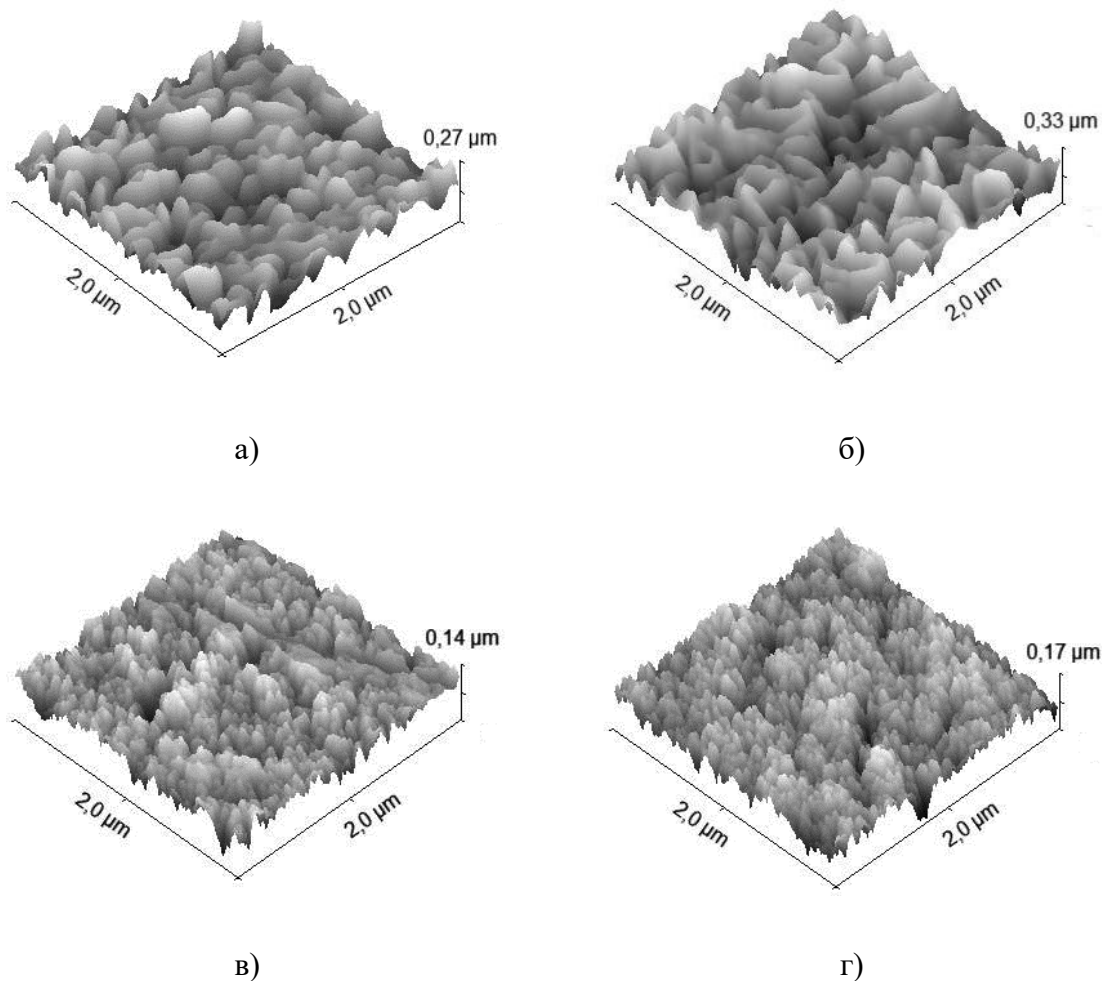


Рис. 1. Трехмерные изображения поверхности ПЭТФ ТМ с диаметром пор 250 нм после нанесения покрытия из СВМПЭ толщиной 300 (а) и 500 нм (б) и покрытия из ПТФЭ толщиной 300 (в) и 500 нм (г); сканирование произведено непосредственно после изготовления образцов мембран

Исследование морфологии поверхностного слоя модифицированных мембран с помощью АСМ показывает, что в процессе осаждения покрытий на поверхности ПЭТФ ТМ происходит развитие ее шероховатости (рис. 1). Так, для исходной мембраны среднеквадратичное отклонение высот поверхности от среднего значения  $S_q$ , рассчитанное по всем точкам скана площадью  $2 \times 2 \text{ мкм}^2$ , равно 50,0 нм. Относительно высокое значение этой величины обусловлено как наличием пор на мембранной поверхности, так и способом изготовления трековой мембраны, включающем химическое травление. Чтобы избежать влияния пор при определении поверхностной шероховатости, были обработаны сканы меньшей площадью, не содержащие пор. Для исходной ПЭТФ ТМ величина  $S_q$  в этом случае составляет 5,5 нм, что на порядок меньше при выборе поля сканирования большей величины. При осаждении на поверхности трековой мембраны покрытия из СВМПЭ толщиной 300 нм в случае сканирования образца площадью  $2 \times 2 \text{ мкм}^2$  происходит сглаживание структурных неоднородностей – шероховатость образующейся композиционной мембраны уменьшается. Данный результат объясняется формированием

слоя полимера в каналах пор на некоторой глубине от входа и перекрытием пор на поверхности мембраны. Однако, при выборе меньшей площади сканирования (не содержащей пор)  $S_q = 24,1$  нм, что несколько выше, чем у исходной мембраны. Это указывает на развитие шероховатости поверхностного слоя мембраны при нанесении слоя СВМПЭ. Увеличение толщины покрытия до 500 нм ведет к росту поверхностной шероховатости. Величина  $S_q$  для композиционной мембраны, рассчитанная по всем точкам скана площадью  $2 \times 2$  мкм<sup>2</sup>, заметно возрастает. Шероховатость на поверхности мембраны, не содержащей пор, при выборе площади сканирования меньшего размера также возрастает. Возрастание величины  $S_q$  на беспоровой поверхности в процессе осаждения покрытия свидетельствует о том, что покрытие из СВМПЭ имеет более развитую поверхность по сравнению с поверхностью исходной трековой мембраны и величина ее шероховатости существенно зависит от продолжительности процесса осаждения.

Осаждение на поверхности ПЭТФ ТМ покрытий из ПТФЭ толщиной 300 и 500 нм вследствие формирования полимера в каналах пор на некоторой глубине от входа и частичного перекрытия пор на поверхности также приводит к сглаживанию структурных неоднородностей исходной мембраны – величина среднеквадратичного отклонения высот поверхности от среднего значения, рассчитанная по всем точкам скана площадью  $2 \times 2$  мкм<sup>2</sup>, для композиционных мембран уменьшается. Однако, при выборе меньшей площади сканирования, не содержащей пор, величина  $S_q$  выше, чем у исходной мембраны (табл. 1). Возрастание среднеквадратичного отклонения высот поверхности от среднего значения на поверхности без пор в процессе осаждения свидетельствует о том, что покрытия из ПТФЭ также как покрытия из СВМПЭ имеют более развитую поверхность по сравнению с поверхностью исходной ТМ и величина их шероховатости зависит от продолжительности процесса осаждения.

Исследование смачиваемости мембран показывает некоторое различие их поверхностных свойств (табл. 1). Если исходная ПЭТФ ТМ характеризуется величиной угла смачивания по воде ( $\Theta$ ), равной  $65^\circ$ , то для композиционной мембраны с покрытием из СВМПЭ толщиной 300 нм значение  $\Theta$  составляет  $110^\circ$ . Увеличение толщины осажденного слоя полимера до 500 нм приводит к повышению угла смачивания до  $115^\circ$ . Дальнейшее увеличение толщины осажденного слоя СВМПЭ до 900 нм ведет к росту угла смачивания до  $120^\circ$ , т.е. в этом случае происходит образование высокогидрофобного слоя полимера. Такое изменение смачиваемости поверхности композиционных мембран обусловлено ростом шероховатости слоя СВМПЭ, обладающего гидрофобными свойствами, при увеличении его толщины [8]. Осаждение покрытия, полученного диспергированием ПТФЭ приводит к более заметной гидрофобизации поверхностного слоя исходной мембраны – величина угла смачивания поверхности композиционных мембран при возрастании толщины покрытия увеличивается от  $150$  до  $155^\circ$ . Это означает, что в этом случае мы наблюдаем формирование покрытий, обладающих супергидрофобными свойствами. Обусловлено это более низкой поверхностной энергией ПТФЭ в сравнении со СВМПЭ. Так, для ПТФЭ поверхностная энергия составляет  $18,3$  мДж/м<sup>2</sup>, а для СВМПЭ эта величина равна  $33,0$  мДж/м<sup>2</sup>.

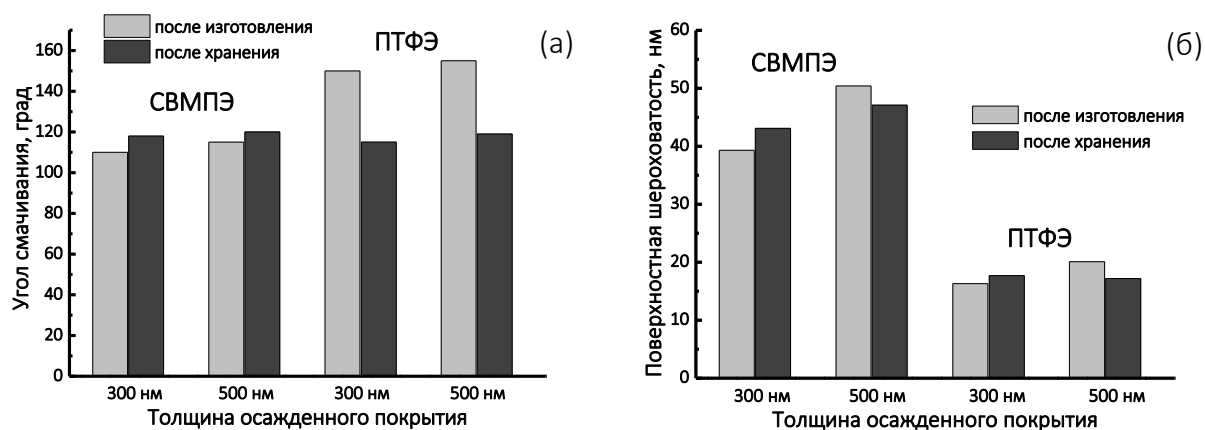


Рис. 2. Изменение угла смачивания (а) и поверхностной шероховатости (б) покрытий из СВМПЭ и ПТФЭ в зависимости от их толщины при хранении композиционных мембран в течение 5 лет на воздухе

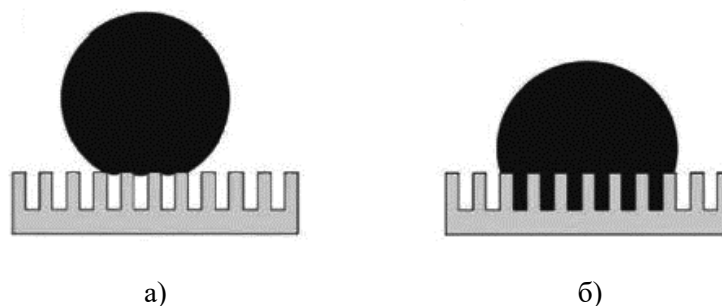


Рис. 3. Капля воды на шероховатой поверхности:  
 а – гетерогенный режим смачивания (модель Касси-Бакстера),  
 б – гомогенный режим смачивания (модель Венцеля)

При оценке возможности применения композиционных мембран разработанного нами образца для обессоливания морской воды методом мембранной дистилляции важное значение имеет сохранение данными материалами низкой смачиваемости при хранении. Воздействие реальных условий окружающей среды на супергидрофобные покрытия, как показали наши исследования, в отличие от высокогидрофобных покрытий, имеют тенденцию стареть и постепенно терять свои желаемые свойства, что потенциально ставит под угрозу их применение. Так, например, угол смачивания для покрытий из ПТФЭ при хранении образцов мембран в течение 5 лет на воздухе уменьшается в среднем на 30° (рис. 2а), что составляет 23% от первоначальной величины. Начальное супергидрофобное состояние на поверхности материала является, таким образом, нетабульным. Причина снижения угла смачивания заключается в следующем. Для супергидрофобного состояния характерна реализация гетерогенного режима смачивания (модель Касси-Бакстера), когда между смачивающей жидкостью и покрытием сохраняется слой микропузырьков воздуха (рис. 3а) [9]. Тем самым площадь контакта супергидрофобного покрытия и жидкости составляет лишь несколько процентов от площади геометрической проекции капли на поверхность. В случае полного вытеснения воздуха водой возможен переход из гетерогенного режима смачивания в гомогенный режим (модель Венцеля), сопровождающийся значительным снижением значений краевого угла (рис. 3б) [9].

Л.И. Кравец, М.А. Кувайцева, М.А. Ярмоленко, Р.В. Гайнутдинов, М.Ю. Яблоков Формирование на поверхности трековых мембран высоко- и супергидрофобных полимерных покрытий и исследование их устойчивости в воде и водно-солевых растворах [Электронный ресурс] // Вестник РВО. – 2023. – № 2 (30.09.2023). – Режим доступа: <https://www.vestnik-rvo.ru/ru/issues/2023-01/5807/>

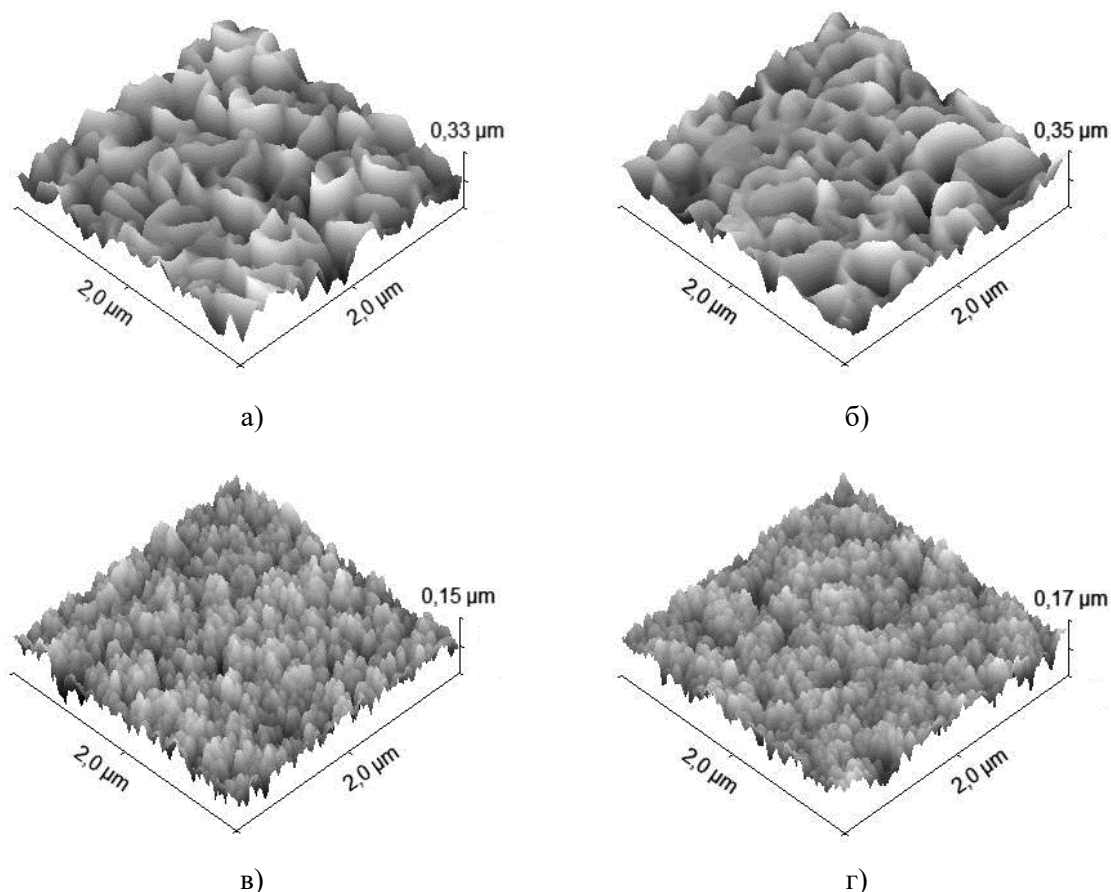


Рис. 4. Трехмерные изображения поверхности ПЭТФ ТМ с диаметром пор 250 нм после нанесения покрытия из СВМПЭ толщиной 300 (а) и 500 нм (б) и покрытия из ПТФЭ толщиной 300 (в) и 500 нм (г); сканирование произведено после хранения образцов мембран в течение 5 лет

Таблица 2. Изменение угла смачивания полимерных покрытий после контакта с водой и водно-солевыми растворами в течение 18 час

Угол смачивания	Тип и толщина осажденного покрытия	
	СВМПЭ, 300 нм	ПТФЭ, 300 нм
Покрытие после хранения, град	118 ± 2	115 ± 2
Покрытие после контакта с водой, град	115 ± 2	99 ± 1
Покрытие после контакта с раствором NaCl с концентрацией 5 г/л, град	116 ± 2	105 ± 1
Покрытие после контакта с раствором NaCl с концентрацией 10 г/л, град	115 ± 2	108 ± 1
Покрытие после контакта с раствором NaCl с концентрацией 15 г/л, град	118 ± 2	107 ± 1

В противоположность этому, угол смачивания покрытий из СВМПЭ при хранении образцов мембран на воздухе имеет тенденцию к увеличению (рис. 2а). Для объяснения наблюдаемых явлений было проведено сравнительное исследование морфологии образцов композиционных мембран непосредственно после их изготовления и после хранения. Как показали наши исследования, структура поверхностного слоя мембран практически не



изменяется (рис. 4). Определение параметров шероховатости образцов мембран (рис. 2б) подтверждает данный вывод – среднеквадратичные отклонения высот поверхности для модифицированных мембран от среднего значения, рассчитанные по всем точкам скана площадью  $2 \times 2 \text{ см}^2$  лежат в пределах ошибки измерения. Разброс экспериментальных данных может быть обусловлен неоднородностью морфологической структуры покрытий. Сохранение структуры супергидрофобных покрытий позволяет заключить, что причина уменьшения краевого угла при хранении композиционных мембран, вызванного переходом из гетерогенного режима смачивания в гомогенный режим, заключается в ином. Данный вопрос, по-видимому, требует отдельного, более детального изучения.

При оценке возможности применения композиционных мембран с высоко- и супергидрофобными покрытиями для обессоливания морской воды методом мембранной дистилляции важное значение, кроме того, имеет сохранение данными материалами низкой смачиваемости при длительном контакте мембран с водными и водно-солевыми средами. Для выяснения устойчивости полимерных покрытий в данных средах проведено исследование полученных композиционных мембран при контакте с водой, а также водно-солевыми растворами хлорида натрия с концентрацией от 5 до 15 г/л. Данная среда является моделирующей действие морской воды. В результате проведенных экспериментов установлено, что покрытия из СВМПЭ устойчивы как в воде, так и в водных растворах хлорида натрия. Изменение угла смачивания покрытий после контакта с тестовыми растворами лежит в пределах ошибки (табл. 2). Покрытия из ПТФЭ демонстрируют лучшую устойчивость к водно-солевым растворам – краевые углы изменяются в среднем не более чем на  $8^\circ$  после выдержки мембран в тестируемых растворах в течение 18 часов, в то время как после контакта мембран с водой угол смачивания уменьшается на  $16^\circ$  (табл. 2). Вероятно, это связано с образованием энергетически выгодных гидратов внутри водно-солевых растворов. В случае контакта полярного покрытия из ПТФЭ с раствором сильного электролита на его поверхности происходит образование двойного электрического слоя. Заряженный поверхностный слой полимерного покрытия будет обогащаться гидратированными противоионами. Т.е. молекулы воды в приповерхностном слое находятся при этом в связанном состоянии. Это обуславливает стабильность поведения водно-солевого раствора на границе раздела фаз.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Проведенные исследования, таким образом, позволяют сделать следующие заключения. Осаждение на поверхности ПЭТФ ТМ покрытий из активной газовой фазы, получаемой методом электронно-лучевого диспергирования при использовании в качестве мишени СВМПЭ и ПТФЭ приводит к существенной гидрофобизации поверхностного слоя мембраны. Это позволяет получать композиционные мембраны, состоящие из двух слоев, одним из которых является исходная трековая мембрана, характеризующаяся средним уровнем гидрофильности. Второй, осажденный из активной газовой фазы слой, имеет гидрофобную природу. Угол смачивания этого слоя зависит от величины поверхностной энергии полимера, используемого для модифицирования, и толщины образованного на поверхности трековой мембраны покрытия.

Осаждение на поверхности ПЭТФ трековой мембраны покрытий электронно-лучевым диспергированием СВМПЭ и ПТФЭ вызывает повышение шероховатости поверхностного слоя мембраны. Данный эффект вызван образованием на ее поверхности

полимерных наноструктур. Значительное повышение поверхностной шероховатости за счет роста размеров наноструктур приводит к формированию покрытий, обладающих супергидрофобными свойствами, для которых характерен гетерогенный режим смачивания. Причиной снижения угла смачивания супергидрофобного покрытия из ПТФЭ при хранении образцов композиционных мембран является переход из гетерогенного режима смачивания в гомогенный режим. Исследование устойчивости полимерных покрытий при длительном контакте композиционных мембран с водой и водно-солевыми растворами хлорида натрия показало, что если высокогидрофобные покрытия из СВМПЭ устойчивы как в воде, так и водно-солевых растворах, то супергидрофобные покрытия из ПТФЭ более стабильны к действию растворов соли, чем воды.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Essalhi M., Khayet M. Surface segregation of fluorinated modifying macromolecule for hydrophobic/hydrophilic membrane preparation and application in air gap and direct contact membrane distillation, *J. Membr. Sci.* 417-418 (2012) 163-173.
2. Kravets L.I., Yarmolenko M.A., Yablokov M.Yu., Gainutdinov R.V., Altynov V.A., Lizunov N.E. Fabrication of composite membranes for water desalination by electron-beam deposition of a polytetrafluoroethylene-like coating on the surface of track-etched membrane, *High Temp. Mater. Proc.* 24 (2020) 239-260.
3. Kravets L.I., Gilman A.B., Dinescu G. Modification of polymer membrane properties by low-temperature plasma, *Rus. J. Gener. Chem.* 85 (2015) 1284-1301.
4. Ярмоленко М.А., Рогачев А.А., Лучников П.А., Рогачев А.В., Джанг Сянь Хун. Микро- и нанокomпозиционные полимерные покрытия, осаждаемые из активной газовой фазы. Под ред. А.В. Рогачева. 2016. Москва: Радиотехника. 424 с.
5. Apel P.Yu., Dmitriev S.N. Micro- and nanoporous materials produced using accelerated heavy ion beams, *Adv. Natur. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.* 2 (2011) 013002.
6. Мулдер М. Введение в мембранную технологию. М.: Мир. 1999. 514 с.
7. Кравец Л.И., Гильман А.Б., Satulu V., Mitu B., Dinescu G. Формирование ‘diode-like’ композитных мембран методом полимеризации в плазме. *Перспективные материалы* 9 (2017) 5-21.
8. Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М. Гидрофобные материалы и покрытия: принципы создания, свойства и применение, *Успехи химии* 77 (2008) 619-638.
9. Пашинин А.С., Емельяненко А.М., Бойнович Л.Б. Взаимодействие гидрофобных и супергидрофобных материалов с водными средами, *Физикохимия поверхности и защита материалов* 46 (2010) 664-670.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Кравец Любовь Ивановна**, старший научный сотрудник, кандидат технических наук, (ORCID: 0000-0001-8468-4259), Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, г. Дубна Московской обл. e-mail: [kravets@jinr.ru](mailto:kravets@jinr.ru);

**Кувайцева Мария Андреевна**, инженер, Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, г. Дубна Московской обл.;

---

Л.И. Кравец, М.А. Кувайцева, М.А. Ярмоленко, Р.В. Гайнутдинов, М.Ю. Яблоков Формирование на поверхности трековых мембран высоко- и супергидрофобных полимерных покрытий и исследование их устойчивости в воде и водно-солевых растворах [Электронный ресурс] // Вестник РВО. – 2023. – № 2 (30.09.2023). – Режим доступа: <https://www.vestnik-rvo.ru/ru/issues/2023-01/5807/>

**Ярмоленко Максим Анатольевич**, доцент, доктор технических наук, Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, г. Гомель;

**Гайнутдинов Радмир Вильевич**, старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, г. Москва;

**Яблоков Михаил Юрьевич**, старший научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН, г. Москва.