

СЕКЦИЯ 6. БИМЕДИЦИНСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

ОСАЖДЕНИЕ НА ПОВЕРХНОСТИ ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН ПОКРЫТИЙ В ВАКУУМЕ С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МЕМБРАН ДЛЯ ОПРЕСНЕНИЯ МОРСКОЙ ВОДЫ

DEPOSITION ON THE TRACK-ETCHED MEMBRANES SURFACE OF COATINGS IN VACUUM WITH A PURPOSE OF COMPOSITE MEMBRANES CREATION FOR SEAWATER DESALINATION

Л.И.Кравец¹(ORCID: 0000-0001-8468-4259), Н.Е.Лизунов¹, М.А.Ярмоленко²,
V.Satulu³, B.Mitu³, G.Dinescu³ / kravets@jinr.ru

L.I.Kravets(ORCID: 0000-0001-8468-4259), N.E.Lizunov, M.A.Yarmolenko, V.Satulu,
B.Mitu, G.Dinescu

¹Объединенный институт ядерных исследований, г.Дубна, Московская обл.

²Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, г. Гомель

³National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics, Bucharest, Romania.

Рассмотрены способы формирования покрытий на поверхности трековой мембраны из полиэтилентерефталата путем магнетронного распыления и электронно-лучевого диспергирования полимеров в вакууме. Установлено, что применение данных методов модифицирования при использовании в качестве мишени политетрафторэтилена позволяет получать на поверхности мембраны гидрофобные покрытия. Показано, что композиционные мембраны разработанного образца могут быть использованы в процессах опреснения морской воды методом мембранной дистилляции.

Methods for the formation of coatings on the poly(ethylene terephthalate) track-etched membrane surface by magnetron and electron-beam sputter deposition in vacuum are considered. It is found that the application of these modification methods at the usage of polytetrafluoroethylene as a target material allows obtaining hydrophobic coatings on the membrane surface. It is shown that the composite membranes of the developed sample can be used in the processes of desalination of seawater by the method of membrane distillation.

Ключевые слова: трековая мембрана, электронно-лучевое диспергирование и магнетронное распыление полимеров в вакууме, политетрафторэтилен, гидрофобизация, композиционные мембраны, мембранная дистилляция

Key words: track-etched membrane, electron-beam and magnetron sputtering of polymers in vacuum, polytetrafluoroethylene, hydrophobization, composite membranes, membrane distillation.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема получения пригодной для питья пресной воды в новом тысячелетии становится глобальной проблемой человечества. Растущий дефицит пресной воды может быть скомпенсирован опреснением (снижением концентрации растворённых солей) морской воды. Наиболее перспективным методом обессоливания воды в настоящее время является метод мембранной дистилляции (МД) [1], так как он обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными методами разделения (дистилляция, электродиализ, обратный осмос и др.), в том числе высокой селективностью разделения, отсутствием

избыточного давления в аппарате, возможностью использования низкопотенциальной теплоты и нетрадиционных источников энергии, экологичностью. Для проведения этого процесса применяют разделительные мембранные модули. Известно несколько вариантов конфигураций разделительных модулей для реализации процесса мембранной дистилляции, из которых конфигурация модуля с воздушным зазором является наиболее оптимальной, поскольку имеющийся воздушный зазор обеспечивает значительное снижение теплотерь по сравнению с другими модулями благодаря наличию конденсирующей перегородки и большей разности температур между горячей и охлажденной поверхностями, а также обеспечивает более высокую тепловую энергию для испарения воды [2].

Основным параметром мембран, применяемых для МД является гидрофобность материала, из которого они изготовлены. В публикациях последних лет показано, что наряду с традиционно применяемыми для МД гидрофобными мембранами из полипропилена, поливинилиденфторида и политетрафторэтилена, перспективно использование двухслойных композиционных мембран (ДКМ), в которых один из слоев, как правило более толстый, имеет гидрофильную высокопористую основу, а второй тонкий микропористый слой обладает гидрофобными свойствами [3, 4]. Использование тонкого гидрофобного слоя в сочетании с толстым гидрофильным подслоем позволяет увеличить поток конденсата через мембрану за счет снижения сопротивления массообмену.

Существуют различные подходы к созданию ДКМ, одним из которых является осаждение на пористую подложку полимерных покрытий. Для этого применяют различные физико-химические методы. Наибольший интерес представляют методы формирования покрытий из активной газовой фазы, получаемой диспергированием полимеров под воздействием лазерного излучения, плазмы ВЧ-разряда или пучка ускоренных электронов [5]. Указанные методы являются высоко технологичными и позволяют регулировать структуру и состав осаждаемых слоев.

В данной работе проведено исследование структуры и поверхностных свойств двухслойных композиционных мембран, формируемых в процессе осаждения наноразмерных покрытий из политетрафторэтилена (ПТФЭ) на поверхности полиэтилентерефталатной трековой мембраны (ПЭТФ ТМ) методами высокочастотного магнетронного распыления (ВЧ МР) и электронно-лучевого диспергирования (ЭЛД) исходного полимера в вакууме. Для определения эффективности композиционных мембран разработанного образца использован процесс обессоливания водного раствора хлорида натрия методом мембранной дистилляции с воздушным зазором.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В экспериментах использовали ПЭТФ ТМ с эффективным диаметром пор 250 нм, полученную на основе полимерной пленки Лавсан (Россия) с номинальной толщиной 10,0 мкм. Для получения мембраны исходную пленку облучали ускоренными на циклотроне У-400 положительно заряженными ионами криптона с энергией ~ 3 МэВ/нуклон. Флюенс ионов составлял 2×10^8 см⁻². Химическое травление облученной пленки проводили при температуре 75°C в водном растворе гидроксида натрия с концентрацией 3 моль/л [6]. При исследовании процесса мембранной дистилляции также использовали образцы трековой мембраны из полипропилена (ПП) с эффективным диаметром пор 250 нм. Для изготовления мембраны исходную пленку Torayfan T2372 (Япония) толщиной 10,0 мкм облучали ускоренными на циклотроне ионами криптона. Флюенс ионов составлял 2×10^8 см⁻². Химическое травление облученной пленки для образования пор проводили при температуре 80°C в водном растворе оксида хрома (VI) с концентрацией 1000 г/л по методике [7].

Покрyтия из ПТФЭ на поверхность мембраны осаждением методом магнетронного распыления полимера в вакууме наносили при мощности разряда 80 Вт. В

качестве мишени использовали пластину ПТФЭ толщиной 2,5 см и размером 2,5×3,5 см. В качестве рабочего газа использовали аргон, скорость потока которого составляла 100 см³/мин. Предварительное вакуумирование рабочей камеры проводили до давления ~10⁻² Па, рабочее давление аргона составляло 6,8×10⁻¹ Па. Схема установки и методика нанесения покрытия методом ВЧ МР подробно описаны в работе [8]. Мишенью для нанесения покрытий методом электронно-лучевого диспергирования служил порошок ПТФЭ, плотность которого составляла 2,15 г/см³ (Aldrich). Схема установки и методика осаждения покрытия методом ЭЛД подробно описаны нами в [9]. В качестве источника электронов использовали электронно-лучевую пушку с катодом прямого накала, позволяющую формировать пучки с энергией 0,8–1,6 кэВ и площадью сечения (5–10)×10⁻⁴ м². Начальное давление остаточных газов в вакуумной камере составляло 4×10⁻³ Па, температура поверхности подложки ~300 К. Скорость осаждения покрытий из ПТФЭ в обоих случаях составляла 10 нм/мин.

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. Исследование микроструктуры образцов, а также определение диаметра пор на поверхности мембран проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) высокого разрешения “НИТАСИ” SU-8020 (Japan). Перед просмотром на образцы напыляли в вакууме тонкий слой золота. Смачиваемость поверхности мембран характеризовали значениями углов смачивания по воде, измеренными с помощью установки “Easy Drop DSA100” (KRUSS, Germany) и программного обеспечения Drop Shape Analysis V.1.90.0.14.

Экспериментальные исследования по использованию модифицированных мембран для опреснения водного раствора хлорида натрия проводили на лабораторной установке, которая содержала мембранно-дистилляционный модуль (МДМ) с воздушным зазором, устанавливаемый вертикально. Рабочая площадь мембраны составляла 5×10⁻³ м². МДМ состоял из двух камер, разделенных мембраной и сплошной охлаждаемой перегородкой. Толщина воздушного зазора между мембраной и охлаждаемой перегородкой составляла 4 мм. По одной из камер проходил горячий поток (опресняемая вода), по другой двигался поток холодной воды. Горячий поток циркулировал по замкнутому контуру между МДМ и водяным термостатом марки LOIP LT-100 (Россия), с помощью которого поддерживалась температура 65°С. Холодный поток циркулировал по замкнутому контуру между МДМ и жидкостным криостатом марки LOIP FT-211-25 (Россия), с помощью которого поддерживалась температура 10°С. Температуру горячего и холодного потоков на входе и выходе МДМ контролировали электронными термометрами с ценой деления 0,1°С. Опресняемая вода, концентрация хлорида натрия в которой составляла 15 г/л, и холодная вода термостатировались в специальных емкостях по принципу “водяной бани”. Перемещение горячего и холодного потоков осуществлялось насосами марки LOIP LS-301 (Россия). Скорость потока в камерах горячего раствора и холодной воды составляла 600 ± 5 мл/мин. Расходы горячего и холодного потоков контролировали ротаметрами. Конденсат, образующийся на поверхности охлаждаемой перегородки, стекал самотеком через имеющейся в нижней части штуцер в стеклянный измерительный цилиндр. Использовался объемный метод измерения количества конденсата, получаемого за определенное время. Эффективность процесса МД оценивали коэффициентом солезадержания, который определяли из соотношения:

$$R = \frac{C_o - C_x}{C_o} \times 100\%$$

где C_o – концентрация NaCl в подающем растворе, C_x – концентрация NaCl в конденсате. Концентрацию соли в подающем растворе и конденсате определяли кондуктометрически с помощью прибора Starter 3100C (OHAUS Co., China).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений характеристик исходной ПЭТФ ТМ и композиционных мембран, полученных путем нанесения на ее поверхность покрытия из ПТФЭ методами магнетронного распыления и электронно-лучевого диспергирования исходного полимера в вакууме, приведены в таблице 1. Формирование полимерного покрытия на ее поверхности иллюстрирует рис. 1, на котором представлены микрофотографии поверхностного слоя исходной ПЭТФ ТМ (а) и модифицированных мембран (б-д), полученные методом СЭМ. Из представленных данных видно, что с ростом толщины осажденного покрытия наблюдается уменьшение диаметра пор на поверхности образующихся композиционных мембран. Эффективный диаметр пор ДКМ при этом также уменьшается. Наибольшее уменьшение эффективного диаметра пор происходит при нанесении покрытия методом электронно-лучевого диспергирования ПТФЭ. Так, при осаждении покрытия толщиной 100 нм магнетронным распылением ПТФЭ эффективный диаметр пор мембраны уменьшается до 240 нм, диаметр пор на ее поверхности при этом равен 250 нм (рис. 1б). Осаждение покрытия толщиной 200 нм вызывает более существенное уменьшение как эффективного диаметра пор исходной мембраны, так и диаметра пор на ее поверхности. Значения эффективного диаметра пор и диаметра пор на поверхности формируемой композиционной мембраны составляют 215 и 140 нм соответственно (рис. 1в). При осаждении покрытия из ПТФЭ толщиной 100 нм электронно-лучевым диспергированием эффективный диаметр пор исходной мембраны уменьшается до 225 нм, диаметр пор на поверхности формируемой в этом случае композиционной мембраны при этом равен 215 нм (рис. 1г). При осаждении покрытия ПТФЭ толщиной 300 нм поры на поверхности исходной мембраны закрываются слоем полимера (рис. 1д), что вызывает значительное уменьшение эффективного диаметра пор образующейся ДКМ (табл. 1). Из данных электронной микроскопии также следует, что диаметр пор на обратной стороне ДКМ остается неизменным. Это свидетельствует о том, что осаждение полимера происходит лишь на стороне мембраны, подвергнутой модифицированию. Нанесение на поверхность ПЭТФ ТМ покрытия из ПТФЭ методами электронно-лучевого диспергирования и магнетронного распыления исходного полимера приводит, таким образом, к формированию ДКМ, имеющих асимметричную форму пор – диаметр пор на необработанной стороне мембраны не изменяется, а на модифицированной стороне происходит его уменьшение. Этот результат коррелирует с данными, полученными нами при исследовании модифицирования ПЭТФ ТМ методом полимеризации в плазме [10].

Таблица 1.

Сравнение исходных и композиционных мембран по производительности и селективности разделения в процессе мембранной дистилляции

Параметры	ПЭТФ ТМ	ПП ТМ	Метод нанесения и толщина покрытия			
			ВЧ МР, 100 нм	ВЧ МР, 200 нм	ЭЛД, 100 нм	ЭЛД, 300 нм
Эффективный диаметр пор, нм	250	250	240	215	225	195
Диаметр пор на поверхности, нм	295	300	250	140	215	—
Пористость, %	9,8	9,8	9,0	7,3	7,9	6,0
Угол смачивания, град	65	120	104	102	130	150
Максимальный поток конденсата, г/м ² час	1815	630	1005	970	980	960
Удельная электропроводность конденсата, мкСм/см	12800	3,2	293,8	116,9	6,0	5,3
Концентрация соли в конденсате, мг/л	6980	1,5	140,5	55,1	3,40	2,45
Коэффициент солезадержания, %	53,45	99,99	99,06	99,63	99,97	99,98

Изучение морфологии поверхностного слоя композиционных мембран показывает некоторое различие процессов осаждения покрытий используемыми методами. Осаждение на поверхности трековой мембраны покрытий из ПТФЭ методом магнетронного распыления приводит к сглаживанию структурных неоднородностей поверхностного слоя (рис. 1б, в). Осаждение покрытий методом ЭЛД, напротив, вызывает повышение шероховатости (рис. 1г, д). Наблюдаемое различие в морфологии поверхностного слоя ДКМ прежде всего связано, с размерами осаждающихся полимерных наноструктур. Наноструктуры, образующиеся при диспергировании ПТФЭ под действием электронного пучка, имеют, как правило, существенно большие размеры, чем наноструктуры, формирующиеся при магнетронном его распылении [11].

Исследование поверхностных свойств исходной ПЭТФ ТМ показало, что она характеризуется средним уровнем гидрофильности. Величина угла смачивания по воде (Θ) ее поверхности составляет 65° . После нанесения покрытия из ПТФЭ методом ВЧ МР происходит существенная гидрофобизация ее поверхности – значение Θ возрастает в среднем до 103° . Осаждение слоя полимера, полученного электронно-лучевым диспергированием ПТФЭ приводит к более заметной гидрофобизации поверхности исходной мембраны. Величина угла смачивания поверхности композиционных мембран в этом случае изменяется от 130° до 150° . Такое изменение смачиваемости покрытий, обладающих гидрофобными свойствами, обусловлено ростом шероховатости их поверхности при увеличении толщины осажденного слоя полимера [9]. Различие в смачиваемости покрытий, формируемых методами ВЧ МР и ЭЛД может быть также вызвано различием в химической структуре полимерных покрытий. Сравнение экспериментальных данных по исследованию покрытий из ПТФЭ, осажденных данными методами, показывает, что покрытия, полученные методом ЭЛД, по химическому составу более близки к исходному полимеру. Кроме того, на поверхности этих покрытий наблюдается значительно меньшая концентрация кислородсодержащих групп, чем на поверхности покрытий, полученных методом ВЧ МР [12].

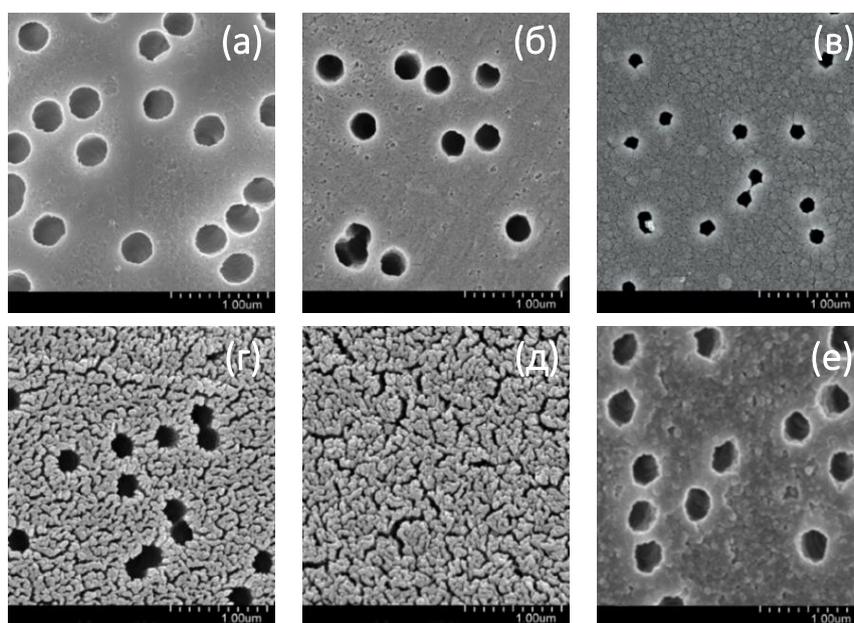


Рис. 1. Микрофотографии поверхности исходной ПЭТФ ТМ (а), мембран с покрытием из ПТФЭ толщиной 100 (б) и 200 нм (в), осажденным на ее поверхности методом ВЧ МР; толщиной 100 (г) и 300 нм (д), осажденным методом ЭЛД; исходной ПП ТМ (е).

Для определения эффективности разделения солевого раствора модифицированными мембранами был использован метод мембранной дистилляции с воздушным зазором. На рис. 2 приведены данные по изменению производительности исследуемых мембран во времени. Можно видеть, в процессе эксплуатации для всех ДКМ на начальном этапе наблюдается возрастание потока конденсата до некоторого максимального значения, а затем происходит его постепенное уменьшение. Композиционная мембрана с осажденным методом ВЧ МР слоем ПТФЭ толщиной 100 нм при этом показала наибольшее значение потока конденсата – 1005 г/м² час. По мере увеличения толщины слоя ПТФЭ, осажденного на поверхности исходной мембраны, величина максимального потока конденсата уменьшается. Так, максимальный поток конденсата через мембрану с покрытием из ПТФЭ толщиной 300 нм, осажденным методом ЭЛД, составляет 960 г/м² час. Из исследуемых композиционных мембран наибольшей газопроницаемостью обладает первая, а наименьшей газопроницаемостью – вторая мембрана. Это позволяет заключить, что эффективность работы мембран в процессе МД, в первую очередь, определяются величиной их газопроницаемости, т.е. пористостью.

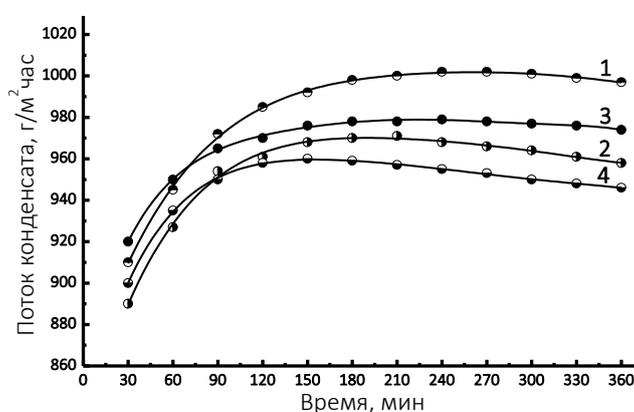


Рис. 2. Изменение потока конденсата во времени в процессе МД при использовании ПЭТФ ТМ с покрытием из ПТФЭ толщиной 100 (1) и 200 нм (2), осажденным методом ВЧ МР; толщиной 100 (3) и 300 нм (4), осажденным методом ЭЛД.

Интересно отметить, что для композиционной мембраны с покрытием толщиной 300 нм, осажденным ЭЛД, для которой осаждение слоя ПТФЭ приводит к закрытию пор на поверхности (рис. 1д), наблюдается более резкое падение потока конденсата во времени по сравнению с другими мембранами (рис. 2), для которых осаждение покрытия вызывает лишь уменьшение диаметра пор на поверхности исходной мембраны (рис. 1б-г). Это сравнение показывает, что эффективность мембран в процессе МД определяется не только величиной их пористости, но и состоянием пор на поверхности. Следует также отметить, что смачиваемость исследуемых мембран несколько отличается друг от друга. Возможно, что эффективность мембран в процессе МД определяется величиной смачиваемости их поверхности. Причиной уменьшения потока конденсата во времени может также являться осаждение соли на рабочей поверхности мембраны.

Аналогичная зависимость изменения потока конденсата во времени наблюдается для исходных трековых мембран из ПЭТФ и ПП. Для них также на начальном этапе происходит увеличение потока конденсата до определенного максимального значения, а затем величина потока начинает постепенно снижаться. При этом исходная ПЭТФ ТМ показала максимальное значение потока конденсата, равное 1815 г/м² час. Высокое значение потока конденсата обусловлено гидрофильными свойствами матрицы мембраны. Для мембраны из полипропилена вследствие ее гидрофобности значение максимального потока равно 630 г/м² час, что значительно ниже, чем для двухслойных композиционных мембран. Причиной низкого значения потока для ПП трековой мембраны является более

толстая толщина по сравнению с толщиной нанесенного гидрофобного покрытия из ПТФЭ для композиционных мембран.

Сравнение композиционных мембран по селективности разделения при опреснении водного раствора хлорида натрия с концентрацией 15,0 г/л (удельная электропроводность 26,85 мСм/см) методом мембранной дистилляции приведено в табл. 1. В таблице также представлены данные по селективности разделения для исходных трековых мембран из полиэтилентерефталата (рис. 1а) и полипропилена (рис. 1е) с одинаковой пористостью. Можно видеть, исследованные ДКМ обеспечивают высокую селективность разделения. В результате проведения МД содержание соли в воде снижается в среднем более, чем в 5000 раз. Значение коэффициента солезадержания (R) в исследованном режиме составляет 99,97–99,98%. Для исходной ПЭТ ТМ коэффициент солезадержания равен 53,45%, а для мембраны из ПП – 99,99%. Низкое значение R для мембраны из ПЭТФ указывает на недостаточную селективность разделения в процессе мембранной дистилляции.

ВЫВОДЫ

Таким образом, проведенные исследования позволяют сделать следующее заключение. Осаждение на поверхности ПЭТФ ТМ покрытий из активной газовой фазы, формируемой методами магнетронного распыления и электронно-лучевого диспергирования ПТФЭ, приводит к существенной гидрофобизации поверхностного слоя мембраны, степень которой зависит от толщины покрытия и метода его нанесения. Композиционные мембраны разработанного образца, по сравнению с исходной ПЭТФ трековой мембраной, обеспечивают более высокую селективность разделения при обессоливании водного раствора хлорида натрия методом мембранной дистилляции. Кроме того, производительность двухслойных композиционных мембран в процессе мембранной дистилляции вследствие низкого сопротивления массопереносу (за счет уменьшения длины пути переноса водяного пара через гидрофобный слой покрытия из ПТФЭ) выше в сравнении с исходной ПП трековой мембраной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брык М.Т., Нигматуллин Р.Р. Мембранная дистилляция. // Успехи химии. 1994. Т. 63. № 12. С. 1114–1129.
2. Woo Yu.Ch., Tijing L.D., Park M.J., Yao M., Choi J.-S., Lee S., Kim S.-H., An K.-J., Shon H.K. Electrospun dual-layer nonwoven membrane for desalination by air gap membrane distillation. // Desalination. 2017. Vol. 404. P. 187–198.
3. Qtaishat M., Khayet M., Matsuura T. Guidelines for preparation of higher flux hydrophobic/hydrophilic composite membranes for membrane distillation. // J. Membr. Sci. 2009. Vol. 329. P. 193–200.
4. 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. 2012. Vol. 417–418. P. 163–173.
5. Ярмоленко М.А., Рогачев А.А., Лучников П.А., Рогачев А.В., Джанг Сянь Хун. Микро- и нанокомпозиционные полимерные покрытия, осаждаемые из активной газовой фазы. / Под ред. А.В. Рогачева. Москва: Радиотехника. 2016, 424 с.
6. Apel P.Yu., Dmitriev S.N. Micro- and nanoporous materials produced using accelerated heavy ion beams. // Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol. 2011. Vol. 2. No. 013002.
7. Kravets L.I., Dmitriev S.N., Apel P.Yu. Production and properties of polypropylene track membranes. // Collect. Czech. Commun. 1997. Vol. 62. P. 752–760.
8. Satulu V., Mitu B., Pandele A.M., Voicu S.I., Kravets L., Dinescu G. Composite polyethylene terephthalate track membranes with thin teflon-like layers: preparation and surface properties. // Appl. Surf. Sci. 2019. Vol. 476. P. 452–459.

9. Kravets L.I., Yarmolenko M.A., Rogachev A.A., Gainutdinov R.V., Altynov V.A., Lizunov N.E. Deposition of double-layer coatings for preparing composite membranes with superhydrophobic properties. // High Temp. Mater. Proc. 2019. Vol. 23. P. 77–96.

10. Кравец Л.И., Гильман А.Б., Satulu V., Mitu B., Dinescu G. Формирование ‘diode-like’ композитных мембран методом полимеризации в плазме. // Перспективные материалы. 2017. № 9. С. 5–21.

11. Kravets L., Gainutdinov R., Gilman A., Yablokov M., Satulu V., Mitu B., Dinescu G. Morphology and wettability of polytetrafluoroethylene-like films deposited onto track-etched membrane surface in vacuum. // Plasma Phys. Technol. 2018. Vol. 5. P. 110–116.

12. Kravets L.I., Altynov V.A., Gilman A.B., Yablokov M.Yu., Satulu V., Mitu B., Dinescu G. Deposition of fluorinated polymer films onto track-etched membrane surface. // Romanian Reports in Physics. 2018. Vol. 70. No. 516.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ЗАРЯДКА ПРОВОДЯЩИХ МИШЕНЕЙ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СИЛЬНОНЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЕ Пониженного Давления

ELECTROSTATIC CHARGING OF CONDUCTING TARGETS IN LOW-TEMPERATURE NON-EQUILIBRIUM LOW-PRESSURE PLASMA

Аунг Чжо У / aungkyaw@phystech.edu (ORCID: 0000-0003-4799-3284)

Йе ХлаингТун / yehlainghtun@phystech.edu (ORCID: 0000-0002-3559-9717)

Васильев М.Н. / vasiliev.mn@mipt.ru

Хтет Ко КоЗав / htetkozaw536@gmail.com (ORCID: 0000-0002-8552-4633)

Васильева Т.М. / tmvasilieva@gmail.com (ORCID: 0000-0001-6103-6195)

Aung Kyaw Oo (ORCID: 0000-0003-4799-3284)

Ye Hlaing Htun (ORCID: 0000-0002-3559-9717)

Vasiliev M.N.,

Htet Ko KoZaw (ORCID :0000-0002-8552-4633)

Vasilieva T.M. (ORCID: 0000-0001-6103-6195)

Московский физико-технический институт Московская обл., г. Долгопрудный.

Рассмотрены физические процессы, протекающие при взаимодействии сильнонеравновесной электронно-пучковой плазмы, генерируемой при пониженном давлении, с макроскопическими проводящими объектами, расположенными внутри контейнера, находящегося в реакционном объеме.

Physical processes occurring during the interaction of a strongly non-equilibrium low-pressure generated electron-beam plasma with macroscopic objects inserted in a reaction volume are considered.

Ключевые слова: электронно-пучковая плазма, электростатическая зарядка тел в плазме.

Keywords: electron-beam plasma, electrostatic charging of bodies in plasma.

ВВЕДЕНИЕ

В пучково-плазменных системах технологического назначения имеет место взаимодействие электронных пучков и/или возбуждаемой ими неравновесной плазмы с