

## ГИБРИДНЫЕ МЕМБРАНЫ ДЛЯ ОПРЕСНЕНИЯ ВОДЫ МЕМБРАННОЙ ДИСТИЛЛЯЦИЕЙ

**И.И. Виноградов<sup>1</sup>, Н.А. Дрожжин<sup>1</sup>, Л.И. Кравец<sup>1</sup>, А. Россоу<sup>1,2</sup>, Б.Л. Горберг<sup>3</sup>,**

**А.Н. Нечаев<sup>1,4</sup>, П.Ю. Апель<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия*

*<sup>2</sup>Nelson Mandela University, Gqeberha, South Africa*

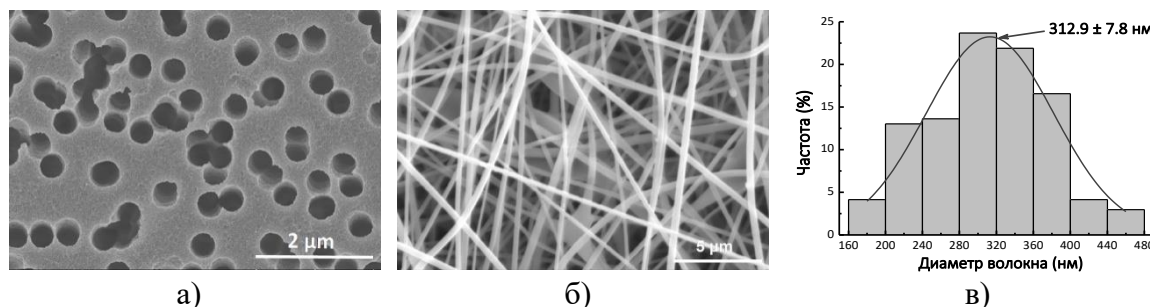
*<sup>3</sup>Ивановский государственный химико-технологический университет, Иваново, Россия*

*<sup>4</sup>Государственный университет “Дубна,” Дубна, Россия*

Проблема получения пригодной для питья пресной воды в новом тысячелетии становится глобальной проблемой человечества. Общий объем воды на Земле оценивается в 1.386 миллиарда км<sup>3</sup>, из которых только 2.5% приходится на пресную воду. Из пресной воды лишь 0.3% находится на поверхности в жидкой форме [1]. Растущий дефицит пресной воды может быть скомпенсирован опреснением морских и океанических вод, объем которых составляет 97.5% от всех запасов воды. Для этого могут быть применены методы дистилляции, обратного и прямого осмоса, электродиализа, ионного обмена, вымораживания. Одним из перспективных методов обессоливания морской воды в настоящее время является метод мембранной дистилляции (МД), в основе которого лежит проницаемость микропористой мембраны для водяного пара при одновременной непроницаемости для воды [2, 3]. Как правило, для этой цели применяют производимые промышленностью гидрофобные микрофильтрационные мембраны из политетрафторэтилена (ПТФЭ), поливинилиденфторида (ПВДФ) и полипропилена (ПП), ключевым свойством которых является низкая смачиваемость их поверхности для предотвращения проникновения воды в заполненные паром поры. Эти мембраны имеют высокое сопротивление массопереносу из-за значительной толщины и, вследствие этого, низкую производительность.

Наряду с традиционно применяемыми для МД гидрофобными мембранами перспективно использование гибридных мембран (ГМ), в которых один из слоев, как правило более толстый, имеет гидрофильную высокопористую основу, а второй тонкий микропористый слой обладает гидрофобными свойствами. Использование тонкого гидрофобного слоя в сочетании с толстым гидрофильным подслоем позволяет увеличить поток конденсата через мембрану за счет снижения сопротивления массопереносу. Существуют различные подходы к созданию ГМ. Одним из них является осаждение на пористую подложку полимерных покрытий. Для этого применяют различные физико-химические методы. В данной работе предлагается метод создания гибридных мембран для

МД, состоящих из гидрофильной микропористой подложки и гидрофобного нановолоконного слоя, полученного методом электроформования. В качестве гидрофильной микропористой подложки использовали трековые мембраны (ТМ) из полиэтилентерефталата (ПЭТФ) с различной пористостью, на поверхность которых для обеспечения адгезии нановолоконного покрытия методом магнетронного напыления наносили тонкий слой титана (Рис. 1а). Титановый слой одновременно выполнял функцию электрода осадительного коллектора в процессе электроформования. С целью формирования гидрофобного нановолоконного слоя использован ПВДФ. Для определения эффективности мембран разработанного образца применен процесс обессоливания водного раствора хлорида натрия с концентрацией 26.5 г/л методом мембранной дистилляции с воздушным зазором.



**Рисунок 1.** Изображение поверхности ПЭТФ ТМ с диаметром пор 0.3 мкм (а), после нанесения нановолоконного покрытия из ПВДФ плотностью  $6.9 \pm 0.2$  г/м<sup>2</sup> (б) и соответствующей данному слою гистограммы распределения нановолокон по диаметру (в).

Установлено, что применение метода электроформования полимерных покрытий при использовании в качестве исходного материала ПВДФ позволяет получать нановолоконный слой, обладающий высокогидрофобными свойствами. Угол смачивания поверхности этого слоя, в зависимости от плотности осаждения, в среднем составляет  $142.2 \pm 1.3^\circ$ . Электронная микроскопия показала, что полученный слой состоит из нановолокон, ориентированных случайным образом, и имеет микроструктуру, типичную для нетканых материалов (Рис. 1б). Нановолокна, образующие пористую систему этого слоя, имеют широкий разброс размеров по диаметру (Рис. 1в). Увеличение диаметра пор ТМ приводит к уменьшению среднего диаметра волокон.

Показано, что полученные гибридные мембраны обладают высокой селективностью при разделении водного раствора хлорида натрия методом мембранной дистилляции. Коэффициент солеудержания для мембран с плотностью нановолоконного покрытия от  $20.7 \pm 0.2$  до  $27.6 \pm 0.2$  г/м<sup>2</sup> в исследованном режиме МД составляет 99.97 – 99.99%. Уменьшение

плотности нановолоконного слоя увеличивает производительность процесса мембранной дистилляции благодаря снижению сопротивления массопереносу, но также снижает коэффициент солеудержания до 97.59 – 96.47%. Вопрос создания высокоэффективных гибридных мембран разработанного образца с целью их применения для обессоливания воды заключается не только в подборе оптимальной плотности нановолоконного слоя, но и в выборе пористости исходной трековой мембраны. Экспериментальные данные показывают, что увеличение пористости трековой мембраны повышает производительность процесса МД. Таким образом, для повышения эффективности гибридных мембран, содержащих высокогидрофобный нановолоконный слой из ПВДФ, для мембранной дистилляции необходимо увеличивать пористость ТМ и уменьшать плотность нановолоконного слоя.

#### Литература:

1. *Eakins B.W., Sharman G.F.* Volumes of the World's Oceans from ETOPO1. // NOAA Natl. Geophys. Data Cent. 2010.
2. *Curto D., Franzitta V., Guercio A.* A review of the water desalination technologies. // Appl. Sci. 2021. V. 11. Article 670. 36 p.
3. *Drioli E., Ali A., Macedonio F.* Membrane distillation: Recent developments and perspectives. // Desalination. 2015. V. 356. P. 56–84.