

**ПОРИСТЫЕ МЕМБРАНЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА:  
ПОЛУЧЕНИЕ МЕТОДОМ ИНВЕРСИИ ФАЗ И СВОЙСТВА****Л.А. Лим, А.А. Еремеева, К.В. Сайдакова, А.Г. Козлов, А.М. Заболотная**

Любовь Андреевна Лим (ORCID 0000-0002-6254-6207)\*, Ксения Викторовна Сайдакова (ORCID 0000-0001-5935-9892), Анна Михайловна Заболотная (ORCID 0000-0001-6313-3757)

Департамент нефтегазовых технологий и нефтехимии, Политехнический институт (Школа), Дальневосточный федеральный университет, п. Аякс, 10, о. Русский, Владивосток, Приморский край, 690922

E-mail: lim.la@dvfu.ru\*, saidakova.kv@students.dvfu.ru, zabolotnaya.am@dvfu.ru

Анастасия Андреевна Еремеева (ORCID 0000-0003-3967-7804)

Департамент ядерных технологий, Институт наукоемких технологий и передовых материалов (Школа), Дальневосточный федеральный университет, п. Аякс, 10, о. Русский, Владивосток, Приморский край, 690922

E-mail: eremeeva.aa@dvfu.ru.

Алексей Гаврилович Козлов (ORCID 0000-0001-8774-0631)

Департамент общей и экспериментальной физики, Институт наукоемких технологий и передовых материалов (Школа), Дальневосточный федеральный университет, п. Аякс, 10, о. Русский, Владивосток, Приморский край, 690922

E-mail: kozlov.ag@dvfu.ru

*Методом инверсии фаз получены пористые полимерные мембраны на основе нестабилизированного поливинилхлорида (ПВХ) с концентрацией 7, 9 и 11 масс.%. В качестве растворителя использовался диметилформамид (ДМФА). Структура мембран, изученная по СЭМ изображениям, демонстрирует значимую зависимость от времени выдержки и состава атмосферы во время выдержки. Выдержанный в течение 30 с в атмосфере насыщенных паров растворителя образец имеет равномерную губчатую структуру, чем отличается от всех прочих образцов, выдержанных на воздухе, имеющих классическое для данного способа синтеза строение: два скин-слоя и пальцеобразные вертикальные поры. С увеличением концентрации литевых растворов возрастают толщина мембран, плотность, минимальное гидростатическое давление; уменьшается усадка. Образец, изготовленный из 11% масс. раствора ПВХ, выдержанный на воздухе в течение 10 с, гидрофобен, имеет краевой угол  $104,3^\circ$ , для остальных краевой угол лежит в диапазоне  $62-82^\circ$ . Смачивание пористых материалов сильно зависит от характера поверхности, гидрофобные свойства данного образца обусловлены большим количеством мелких поверхностных пор, что подтверждается максимальным значением гидростатического сопротивления мембран LEP (liquid entry pressure). Интересно, что свойства скин-слоя, непосредственно контактирующего с водой, для всех образцов достаточно гомогенны, в том время как для скин-слоев, прилегающих к стеклянной подложке, наблюдаются значимые отличия для различных образцов и сложная иерархическая структура пор, внешне напоминающая фигуры дыхания. Оценка размера пор проводилась при помощи программы обработки изображений с открытым доступом ImageJ (Image processing and analysis in Java). Размеры пор лежат в диапазоне  $0,03-0,5$  мкм. Установлено, что свойства полученных мембран в общем соответствуют требованиям к материалам для мембранной дистилляции, а метод их синтеза позволяет гибко управлять структурой.*

**Ключевые слова:** инверсия фаз, полимерная мембрана, мембранная дистилляция, поливинилхлорид

**POROUS MEMBRANES BASED ON POLYVINYL CHLORIDE:  
PREPARING BY THE METHOD OF PHASE INVERSION AND ITS PROPERTIES**

**L.A. Lim, A.A. Ereemeeva, K.V. Saidakova, A.G. Kozlov, A.M. Zabolotnaya**

Lyubov A. Lim (ORCID 0000-0002-6254-6207)\*, Ksenia V. Saidakova (ORCID 0000-0001-5935-9892), Anna M. Zabolotnaya (ORCID 0000-0001-6313-3757)

Department of Oil and Gas Technologies and Petrochemistry, Polytechnic Institute (School), Far Eastern Federal University, FEFU Campus, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, Primorsky Krai, 690922, Russia  
E-mail: lim.la@dvfu.ru\*, sayakova.kv@students.dvfu.ru, zabolotna-ya.am@dvfu.ru

Anastasia A. Ereemeeva (ORCID 0000-0003-3967-7804)

Department of Nuclear Technologies, Institute of Science-Intensive Technologies and Advanced Materials (School), Far Eastern Federal University, FEFU Campus, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, Primorsky Krai, 690922, Russia  
E-mail: ereemeeva.aa@dvfu.ru

Alexey G. Kozlov (ORCID 0000-0001-8774-0631)

Department of General and Experimental Physics, Institute of Scientific and Technical Technologies and Advanced Materials (School), Far Eastern Federal University, FEFU Campus, 10 Ajax Bay, Russky Island, Vladivostok, Primorsky Krai, 690922, Russia  
E-mail: kozlov.ag@dvfu.ru

*Porous polymeric membranes based on unstabilized polyvinyl chloride (PVC) with a concentration of 7, 9, and 11 wt% were obtained by the phase inversion method. Dimethylformamide (DMF) was used as a solvent. The structure of the membranes studied from SEM images shows a significant dependence on the exposure time and the composition of the atmosphere during exposure. The sample aged for 30 s in an atmosphere of saturated solvent vapor has a uniform spongy structure, which differs from all other samples aged in air, which have a structure classic for this kind of synthesis method: two skin-layers and finger-shaped vertical pores. With an increase in the concentration of casting solutions, the thickness of the membranes, density, and minimum hydrostatic pressure increase; shrinkage is reduced. A sample made from 11wt% PVC solution, kept in air for 10 s, is hydrophobic, has a contact angle of 104.3°, for the rest the contact angle lies in the range of 62–82°. Wetting of porous materials strongly depends on the nature of the surface, the hydrophobic properties of this sample are associated with many small surface pores, which is confirmed by the maximum value of LEP (liquid entry pressure). Interestingly, the properties of the skin-layer in direct contact with water are rather homogeneous for all samples, while for the skin-layers adjacent to the glass substrate significant differences are observed for different samples and a complex hierarchical pore structure resembling breathing figures. The pore sizes were evaluated using the ImageJ image processing and analysis program in Java. The pore sizes are in the 0.03–0.5 μm range. It has been determined that the properties of the obtained membranes generally meet the requirements for the materials for membrane distillation, and the method of their synthesis allows flexible control of the structure.*

**Key words:** phase inversion, polymer membrane, membrane distillation, polyvinyl chloride

**Для цитирования:**

Лим Л.А., Еремеева А.А., Сайдакова К.В., Козлов А.Г., Заболотная А.М. Пористые мембраны на основе поливинилхлорида: получение методом инверсии фаз и свойства. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2023. Т. 66. Вып. 8. С. 77–84. DOI: 10.6060/ivkkt.20236608.6762.

**For citation:**

Lim L.A., Ereemeeva A.A., Saidakova K.V., Kozlov A.G., Zabolotnaya A.M. Porous membranes based on polyvinyl chloride: preparing by the method of phase inversion and its properties. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 8. P. 77–84. DOI: 10.6060/ivkkt.20236608.6762.

## ВВЕДЕНИЕ

Мембранные технологии приобретают все большую актуальность в свете разворота к зеленой химии и ресурсосбережению. Уникальные свойства мембран позволяют проводить процессы разделения и концентрирования веществ различной природы с минимальными затратами энергии, что особенно актуально для водных растворов. Проблемы нехватки пресной воды, очистки промышленных стоков и объектов среды от биологического загрязнения [1-4] являются актуальными для всех регионов мира [5].

Полимерные мембраны относительно дешевы, просты в производстве, доступны с широким диапазоном размеров пор, используются в различных отраслях промышленности [6], интенсивно исследуются для придания им новых перспективных свойств [7]. Сравнительно небольшое разнообразие полимеров используется для изготовления мембран: полисульфон, поли(эфирсульфон), полиакрилонитрил, полиамид, полиимид, поли(винилиденфторид) и политетрафторэтилен, полипропилен, ацетат целлюлозы [8]. Полисульфон, поли(эфирсульфон), поли(винилиденфторид), полиимид довольно дороги и зачастую трудноперерабатываемы, остальные недорогие полимеры недостаточно механически и/или химически устойчивы в условиях эксплуатации. При выборе материала мембраны нужно учитывать и структурные свойства, и экономические параметры, а также подбор метода формирования пористой структуры. Такой подход открывает широкие возможности регулирования эксплуатационных свойств и внутренней структуры мембран [9, 10]. По совокупности свойств поливинилхлорид (ПВХ) весьма перспективен для рассмотрения, как недорогой, многотоннажный полимер, обладающий отличными механическими и пленкообразующими свойствами, длительным сроком службы. В последние годы интерес к мембранам из ПВХ неуклонно растет [11]. Традиционно считается, что гидрофобность является недостатком ПВХ мембран. Множество работ посвящено модификации поверхности путем введения различных добавок для увеличения гидрофильности [12]. Однако имеется область применения мембранных технологий, в которой гидрофобность поверхности является обязательным условием, причем чем больше значения контактного угла, тем лучше.

Метод мембранной дистилляции (МД), запатентованный в 1963 г., предполагает использование температурного градиента на гидрофобной

микропористой мембране. До настоящего времени метод не получил такого широкого распространения, как, например, нанофильтрация или обратный осмос [13–15]. При этом минимальные затраты энергии при производстве воды, использование низкопотенциальных источников тепла, способность очищать сильно засоленные или загрязненные воды [16] делает процесс МД перспективным для решения задач устойчивого развития.

Цель настоящей работы – получение пористых материалов на основе ПВХ и исследование их свойств с точки зрения потенциала для разработки мембран для мембранной дистилляции.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для получения мембран использовали нестабилизированный ПВХ марки ПВХ-С-6669ПЖ, КФ 66–68, производства Башкирской содовой компании (Стерлитамак), с молекулярной массой 70000 и плотностью 1400 кг/м<sup>3</sup>. В качестве растворителя был использован N,N-диметилформамид (ДМФА), квалификации «х.ч.», производство АО «ЭКОС-1». Для осадительной ванны использовался глицерин, квалификации «ч.д.а.».

Для получения образцов навеску порошка полимера порционно высыпали в N,N-диметилформамид (ДМФА) и выдерживали при T = 65 °C и постоянном перемешивании до полного растворения. Полученные растворы выдерживали в ультразвуковой ванне Elma Transsonic TI-H5 при T = 65 °C в течение 6 ч для удаления воздуха.

Далее заполняли полученным раствором стеклянную литейную форму с бортиками заданной высоты, выдерживали на воздухе или в парах ДМФА заданное время (столбец 3, табл. 1) и погружали в осадительную ванну, содержащую 40% раствор глицерина в дистиллированной воде, для предотвращения схлопывания пор и замедления фазовой инверсии.

Маркировка образцов в зависимости от концентрации полимера и времени испарения растворителя представлена в табл. 1. Для серии с концентрацией 9% масс. был дополнительно подготовлен образец, выдержанный 30 с в насыщенных парах растворителя перед погружением в коагуляционную ванну (D9-30-ДМФА). Все прочие образцы выдерживали указанное время на воздухе.

После осаждения образцы выдерживали в большом объеме дистиллированной воды в течение 24 ч до полного извлечения растворителя и далее высушивали на воздухе.

Таблица 1

Обозначение полученных образцов  
Table 1. Assigning of received samples

Обозначение	Конц. ПВХ, % масс.	Испарение, с
D7-10	7	10
D7-30	7	30
D9-10	9	10
D9-30	9	30
D11-10	11	10
D11-30	11	30
D9-30-ДМФА	9	30

Исследования методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) проводились на растровом двулучевом электронном микроскопе Thermo Scientific DualBeam Scios 2. Изображения получались в режиме регистрации вторичных электронов внешним детектором при низких ускоряющих напряжениях 2 и 5 кV.

Усадка образцов определялась как разница единицы и отношения толщины полученных образцов к высоте раствора в литьевой форме.

Кажущаяся плотность ( $\rho_{\text{каж}}$ , кг/м<sup>3</sup>) определялась по ГОСТ 409–2017 [17].

Для определения общей пористости ( $P_{\text{общ}}$ , %) был использован модифицированный метод определения общей пористости по ГОСТ 2409–2014 [18]. Отличия от прописанной процедуры анализа заключались в том, что образец мембраны с линейными размерами 1×1 см выдерживали на воздухе до постоянной массы.

Смачиваемость исследуемых материалов оценивали методом сидячей капли на анализаторе формы капель DSA100 (KRÜSS, Германия). Перед измерениями мембраны высушивали на воздухе не менее чем за 24 ч до эксперимента. Краевые углы (КУ) между водой и мембраной измеряли при 25 °С по результатам 10-15 измерений на различных участках поверхности, с абсолютной ошибкой, составляющей не более 5° величины КУ.

Значения минимального гидростатического давления LEP (кПа) мембран из ПВХ оценивали в экспериментах с использованием тупиковой лабораторной ячейки, снабженной клапаном регулирования давления и манометром, при комнатной температуре с активной площадью мембраны 1,33 см<sup>2</sup>. За LEP принималось давление по манометру в момент появления первой капли.

Равновесное содержание воды (PCB) оценивали по разнице масс образцов в сухом и влажном состоянии [19]. Мембраны погружали в дистиллированную воду на 24 ч при температуре окружающей среды (24 ± 2 °С). После выдержки их поверхность протирали фильтровальной бумагой и взвешивали.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Синтез полимерных мембран для различных целей – задача, не потерявшая своей актуальности по сей день. По мере накопления экспериментальных данных о мембранах можно выявить важные параметры материалов и учитывать их при планировании экспериментов. Высокая производительность мембраны может быть обеспечена мелкопористым тонким скин-слоем, находящемся на рыхлой подложке с развитой поверхностью [20]. Анализ литературных данных показал, что наряду с высоким сопротивлением смачиваемости и высокой проницаемостью [21–23] мембрана для МД должна иметь низкую теплопроводность для увеличения температурного градиента и высокие характеристики стабильности и механической прочности. Теплопроводность различных полимеров не слишком различается и лежит в диапазоне 0,1 - 0,5 Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup> для сплошных полимерных тел. Очевидно, что теплопроводность мембраны будет зависеть не только от материала мембраны, но и от его пористости и распределения пор по размерам. Имеются экспериментальные данные о мембранах, контактный угол которых составлял 80-160° [21], при этом считается, что высокие значения контактного угла предпочтительнее для предотвращения загрязнения и «забивания» пор. Диаметр пор изученных мембран составляет 0,012-1,2 мкм [24–26]. Однако отдельные авторы рекомендуют использовать материалы с размером пор 0,05-1 мкм [27, 28], в среднем 0,3 мкм [21, 29, 30]. При этом пористость должна составлять не менее 80% [31, 32]. Что же касается толщины мембран, то общепринят диапазон 10-200 мкм, однако установлен факт, что толщина обессоливающих мембран зависит от солености растворов и колеблется от 30 мкм для растворов с низкой соленостью, до 700 мкм – с высокой [33–36].

В мембранной дистилляции минимальное гидростатическое давление (LEP) может быть использовано как первый параметр, чтобы указать, насколько смачиваема мембрана по отношению к различным жидкостям. Для предотвращения смачиваемости мембраны ретентатом значение LEP должно быть высоким, что достигается за счет гидрофобности материала, его шероховатости, заданной формы и малого размера пор. Однако, уменьшение размера пор только для увеличения LEP отрицательно сказывается на производительности мембраны и уменьшает поток пермеата [16].

При выборе параметров мембраны необходимо устанавливать компромиссные характеристики между производительностью и значениями

смачиваемости, влияющими на качество очистки пермеата.

Для выбора мембраны для МД желательно априорное предсказание потока воды и уровня ее загрязнения, поэтому разработка мембран под конкретный процесс и исследование их свойств является актуальной задачей.

В данной работе исследуется строение ПВХ мембран, полученных методом инверсии фаз, на предмет соответствия их структуры требованиям, предъявляемым к мембранам для МД.

Морфологию поверхности и строение внутреннего слоя полученных мембран исследовали методом сканирующей электронной микроскопии. Установлено, что классические для данного метода синтеза пальцеобразные поры (рис. 1) присутствуют в той или иной степени во всех образцах кроме D9-30-ДМФА (рис. 2). Однако глубина их залегания и степень выраженности разная и зависит от концентрации литьевого раствора.

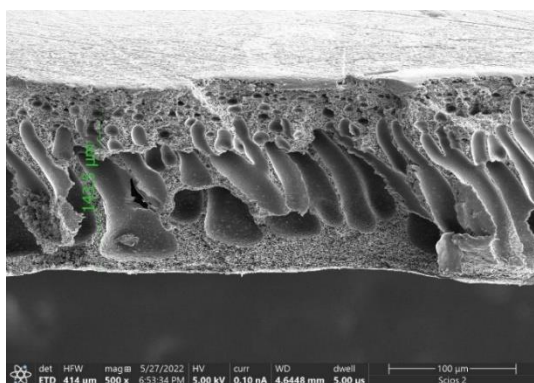


Рис. 1. Пальцеобразные поры в структуре внутреннего слоя (на примере образца D11-30)

Fig. 1. Finger-shaped pores in the structure of the inner layer (on the example of sample D11-30)

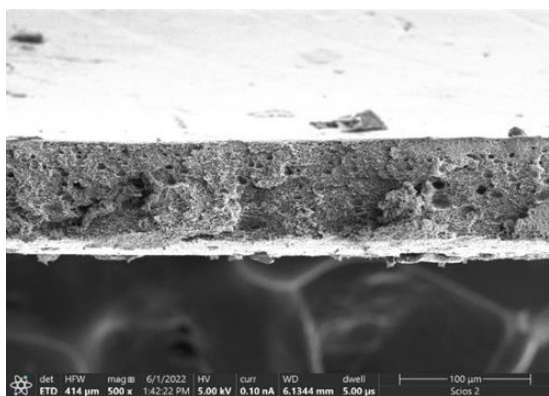


Рис. 2. Губчатая структура образца D9-30-ДМФА

Fig. 2. Spongy structure of sample D9-30-DMFA

При детальном рассмотрении стенок пальцеобразных пор видна их губчатая структура, об-

разованная при диффузии растворителя в осадительную и промывную ванны. Губчатая структура стенок пальцеобразных пор взаимосвязанная, т. е. открытая. Для многих образцов наблюдаются дефекты структуры в виде макропустот.

В структуре всех мембран, кроме образца D9-30-ДМФА, хорошо различимы три слоя: внутренний слой с пальцеобразными порами, два скин-слоя: нижний, прилегающий к стеклу отливочной формы, и верхний, контактирующий с раствором в осадительной ванне, обозначаемые далее, как скин-С и скин-В соответственно.

Детальным рассмотрением структуры поверхностных слоев (рис. 3, 4) установлено, что скин-С поверхность мембран характеризуется участками с активной и менее активной структурой пор. Это объясняется трудностью проникновения осадителя между подложкой и мембраной: соответственно там, где поры более выражены, проникновение осадителя к нижней поверхности мембраны произошло.

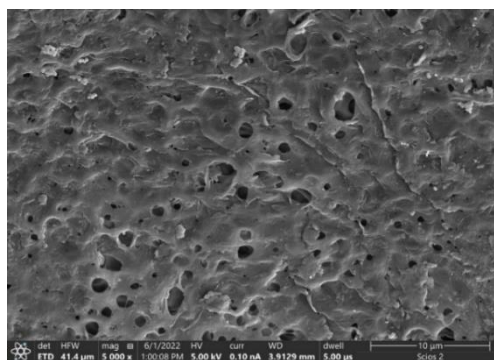


Рис. 3. Поверхность скин-В слоя (на примере образца D7-10)

Fig. 3. The surface of the skin-W layer (on the example of sample D7-10)

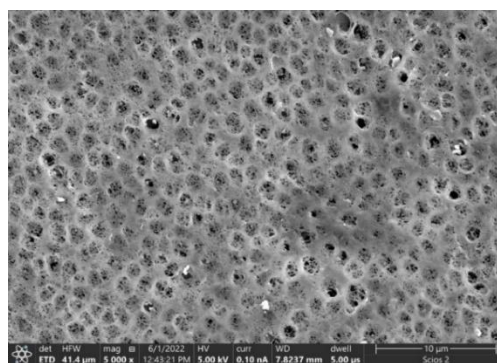


Рис. 4. Поверхность скин-С слоя (на примере образца D7-10)

Fig. 4. The surface of the skin-C layer (on the example of sample D7-10)

Оценка размера пор проводилась при помощи программы обработки изображений Image processing and analysis in Java (ImageJ). Результаты

измерений размера пор на поверхности скин-слоя С и скин-слоя В представлены в табл. 2. Большие значения доверительного интервала вызваны широким разбросом размера пор на поверхности.

Таблица 2

**Морфология полученных мембран**  
**Table 2. Morphology of the resulting membranes**

Образец	h скин-С, мкм	d <sub>пор</sub> скин-С, мкм	h скин-В, мкм	d <sub>пор</sub> скин-В, мкм
D7-10	2,9	0,22 ± 0,12	1,7	0,65 ± 0,2
D7-30	9,2	0,21 ± 0,11	1,9	0,47 ± 0,2
D9-10	15,9	0,05 ± 0,03	2,1	0,6 ± 0,19
D9-30	11,8	0,04 ± 0,02	< 1	0,28 ± 0,19
D11-10	8,8	0,035 ± 0,02	< 1	0,13 ± 0,08
D11-30	26,1	0,11 ± 0,03	39,1	0,7 ± 0,21
D9-30-ДМФА	–	0,03 ± 0,01	–	0,17 ± 0,1

Толщина полученных мембран (h, мкм) увеличивается синхронно с увеличением концентрации отливочных растворов (табл. 2). Влияние времени выдержки на воздухе (до погружения в осадительную ванну) неоднозначно, но очень велико, так как структура мембраны, полученной выдерживанием в насыщенных парах ДМФА в течение 30 с для предотвращения испарения с поверхности, принципиально отличается от всех прочих.

Интересно, что наибольшие различия в размерах пор и их количестве наблюдаются в скин-С слое, в то время как ожидаемыми являются значимые различия в скин-В. Именно с поверхности скин-В происходит испарение ДМФА во время выдержки, эта поверхность контактирует с раствором осадительной ванны, однако, если не брать во внимание аномальный образец D9-30-ДМФА и самый плотный D11-30, параметры скин-В слоев гораздо более однородные, нежели скин-С, что оставляет открытым вопрос о диффузионных процессах при формировании мембранных слоев.

В табл. 3 приведены некоторые характеристики полученных мембран. Для образца D7-10 значение LEP не определено из-за сниженных механических характеристик мембраны. Установлено, что степень усадки закономерно падает с увеличением концентрации литьевого раствора, в то время как толщина возрастает. Влияние степени выдержки (10 или 30 с) наиболее сильно проявляется для концентрации 11% по всем установленным характеристикам. Явно аномально поведение образца D9-30-ДМФА. Минимальная плотность и максимальные значения общей пористости и краевого угла наблюдаются для образца D11-10, при этом LEP также максимально.

Таблица 3

**Характеристика мембран**  
**Table 3. Membrane characteristics**

Образец	h, мкм	Усадка, %	ρ <sub>каж</sub> , кг/м <sup>3</sup>	П <sub>общ</sub> , %	PCB, %	LEP, кПа	КУ, °
D7-10	80,4	86	393,0	72	0,09	–	70,6±1,3
D7-30	73,1	86	357,1	75	0,76	35	82,1±1,5
D9-10	81,2	83	464,6	67	4,69	50	68,5±1,5
D9-30	52,3	84	522,5	63	4,62	175	67,7±1,5
D11-10	104,1	65	256,3	82	2,33	200	104,3±2,7
D11-30	143,5	73	427,6	70	5,32	170	76,3±1,6
D9-30-ДМФА	74,8	79	396,8	72	1,85	230	62,3±1,8

Значения равновесного содержания воды (PCB) и измерений минимального гидростатического давления, приложенного к воде, до появления первой капли – LEP (кПа) (табл. 3), закономерно увеличиваются с повышением концентрации полимера в литьевом растворе от 7 до 9%. Значение LEP для D9-30-ДМФА максимально, так как в данном образце полностью отсутствуют пальцевидные поры и структура однородная губчатая.

#### ВЫВОДЫ

Были получены мембраны, изготовленные из растворов нестабилизированного поливинилхлорида в N,N-диметилформамиде, методом инверсии фаз осаждением в нерастворителе (вода).

Оценивалось влияние концентрации полимера в литьевом растворе, времени предварительного испарения растворителя, среды испарения, а также соответствие характеристик полученных образцов мембранам, используемым в технологии мембранной дистилляции.

Специфика технологии позволяет получать мембраны с ассиметричной структурой, содержащей вытянутые пальцевидные поры с губчатыми стенками. Показано, что приготовленные мембраны шероховатые, поры распределены по всей поверхности и объему материала. Скин-слои, обращенные к воде, для всей серии образцов, характеризуются гораздо большей однородностью структуры, чем имеющие сложную иерархическую

структуру пор скин-слои, обращенные к стеклянной подложке.

По результатам определения LEP и краевого угла смачивания максимальные значения имеет образец D11-10. Образец D11-30ДМФА, выдержанный в насыщенных парах растворителя перед погружением в осадительную ванну, имеет равномерную губчатую структуру и самое большое значение LEP. Усадка мембран снижается с увеличением концентрации полимера в литевом растворе. Значения усадки для образцов колеблются в диапазоне 65-86%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каталевский Е.Е. // Тез. докл. XII Всерос. Научн. конф. Мембраны-2013. Владимир.: Институт нефтехимического синтеза РАН. 2013. С. 28–29.
2. Каталевский Е.Е. // Тез. докл. XII Междун. Научн. Конф. с научн. молодежн. сессией. Владимир-Суздаль.: Владимир. гос. ун-т. 2016. С. 141–143.
3. Апчел В.Я., Змеева Т.А., Малышев В.В., Сбойчаков В.Б., Марданлы С.Г., Каталевский Е.Е. // *Вестн. Росс. воен.-мед. акад.* 2017. Т. 1. Вып. 57. С. 142–146.
4. Медведева И.В., Медведева О.М., Студенок А.Г., Студенок Г.А., Цейтлин Е.М. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 1. С. 6–27. DOI: 10.6060/ivkkt.20236601.6538.
5. Camacho L.M., Dumée L., Zhang J., Li, J., Duke M., Gomez J., Gray S. // *Water.* 2013. V. 5. N 1. P. 94–196. DOI: 10.3390/w5010094.
6. Ahmad T., Guria C. // *J. Water Process Eng.* 2022. V. 45. P. 102466. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102466.
7. Hankins N.P., Singh R. *Emerging Membrane Technology for Sustainable Water Treatment.* Elsevier. 2016. 472 p. DOI: 10.1016/B978-0-444-63312-5.12001-7.
8. Peng Y., Sui Y. // *Desalination.* 2006. V. 196. N 1–3. P. 13–21. DOI: 10.1016/j.desal.2005.07.053.
9. Perepechkin L.P. // *Rus. Chem. Rev.* 1988. V. 57. N 6. P. 539–548. DOI: 10.1070/RC1988v057n06ABEH003370.
10. Dzyubenko V.G. // *Membr. Membr. Technol.* 2020. V. 2. N 4. P. 217–220. DOI: 10.1134/S2517751620040034.
11. Kang G., Cao Y. // *J. Membr. Sci.* 2014. V. 463. P. 145–165. DOI: 10.1016/j.memsci.2014.03.055.
12. Behboudi A., Jafarzadeh Y., Yegani R. // *J. Memb. Sci.* 2017. V. 534. P. 18–24. DOI: 10.1016/j.memsci.2017.04.011.
13. Jones E., Qadir M., Michelle T.H. van Vliet, Smakhtin V, Seong-mu Kang. // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 657. P. 1343–1356. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.076.
14. Pinto F.S., Marques R.C. // *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2017. V. 78. P. 904–915. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.024.
15. Ahmed E., Hashaikh R., Hilal N. // *Desalination.* 2019. V. 453. P. 54–76. DOI: 10.1016/j.desal.2018.12.002.
16. Ravi J., Othman M.H.D., Matsuura T., Ro'il Bilad M., El-badawy T.H., Aziz F., Ismail A.F., Rahman M.A., Jaafar J. // *Desalination.* 2020. V. 490. P. 114530. DOI: 10.1016/j.desal.2020.114530.
17. ГОСТ 409–2017 (ISO 845:2006). Пластмассы ячеистые и резины губчатые: Метод определения кажущейся плотности. М.: Стандартинформ. 2017. 7 с.

Таким образом, полученные пористые полимерные материалы соответствуют основным характеристикам, предъявляемым к материалам для мембранной дистилляции, а методика их получения позволяет гибко управлять процессом для получения мембран с желаемой структурой.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.*

*The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.*

## REFERENCES

1. Katalovsky E.E. // Abstr. report XII All-Russian. Scientific conf. Membranes-2013. Vladimir: Inst. of Petrochem. Synt. of the RAS. 2013. P. 28–29 (in Russian).
2. Katalovsky E.E. // Abstr. report XII Intern. Scientific Conf. from scientific youth. session. Vladimir State University. Vladimir-Suzdal. 2016. P. 141–143 (in Russian).
3. Apchel V.Ya., Zmeeva T.A., Malyshev V.V., Sboychakov V.B., Mardarly S.G., Katalovsky E.E. // *Vestn. Ross. Voenno-Med. Akad.* 2017. V. 1. N 57. P. 142–146 (in Russian).
4. Medvedeva I.V., Medvedeva O.M., Studenok A.G., Studenok G.A., Zeitlin E.M. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. V. 66. N 1. P. 6–27 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20236601.6538.
5. Camacho L.M., Dumée L., Zhang J., Li, J., Duke M., Gomez J., Gray S. // *Water.* 2013. V. 5. N 1. P. 94–196. DOI: 10.3390/w5010094.
6. Ahmad T., Guria C. // *J. Water Process Eng.* 2022. V. 45. P. 102466. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102466.
7. Hankins N.P., Singh R. *Emerging Membrane Technology for Sustainable Water Treatment.* Elsevier. 2016. 472 p. DOI: 10.1016/B978-0-444-63312-5.12001-7.
8. Peng Y., Sui Y. // *Desalination.* 2006. V. 196. N 1–3. P. 13–21. DOI: 10.1016/j.desal.2005.07.053.
9. Perepechkin L.P. // *Rus. Chem. Rev.* 1988. V. 57. N 6. P. 539–548. DOI: 10.1070/RC1988v057n06ABEH003370.
10. Dzyubenko V.G. // *Membr. Membr. Technol.* 2020. V. 2. N 4. P. 217–220. DOI: 10.1134/S2517751620040034.
11. Kang G., Cao Y. // *J. Membr. Sci.* 2014. V. 463. P. 145–165. DOI: 10.1016/j.memsci.2014.03.055.
12. Behboudi A., Jafarzadeh Y., Yegani R. // *J. Memb. Sci.* 2017. V. 534. P. 18–24. DOI: 10.1016/j.memsci.2017.04.011.
13. Jones E., Qadir M., Michelle T.H. van Vliet, Smakhtin V, Seong-mu Kang. // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 657. P. 1343–1356. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.076.
14. Pinto F.S., Marques R.C. // *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2017. V. 78. P. 904–915. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.024.
15. Ahmed E., Hashaikh R., Hilal N. // *Desalination.* 2019. V. 453. P. 54–76. DOI: 10.1016/j.desal.2018.12.002.
16. Ravi J., Othman M.H.D., Matsuura T., Ro'il Bilad M., El-badawy T.H., Aziz F., Ismail A.F., Rahman M.A., Jaafar J. // *Desalination.* 2020. V. 490. P. 114530. DOI: 10.1016/j.desal.2020.114530.
17. GOST 409–2017 (ISO 845:2006). Cellular plastics and spongy rubbers. Method for determining the apparent density. M.: Standartinform. 2017. P. 7. (in Russian).

18. ГОСТ 2409–2014. Огнеупоры. Метод определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения. М.: Стандартинформ. 2014. 8 с.
19. **Muhammad I.K.M., Manaf O., Sujith A.** // *Mater. Lett.* 2019. V. 252. P. 321–324. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.06.008.
20. **Бон А.И., Дзюбенко В.Г., Шишова И.И.** // *Высокомолек. соед.* 1993. Т. 35. № 7. С. 922–932.
21. **Eykens L., De Sitter K., Dotremont C., Pinoy L., Van der Bruggen B.** // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2017. V. 182. P. 36–51. DOI: 10.1016/j.seppur.2017.03.035.
22. **Rao G., Hiibel S.R., Childress A.E.** // *Desalination.* 2014. V. 351. P. 151–162. DOI: 10.1016/j.desal.2014.07.006.
23. **Wang K.Y., Foo S.W., Chung T.S.** // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009. V. 48. P. 4474–4483. DOI: 10.1021/ie8009704.
24. **Essalhi M., Khayet M.** // *J. Membr. Sci.* 2013. V. 433. P. 180–191. DOI: 10.1016/j.memsci.2013.01.024.
25. **Qtaishat M., Khayet M., Matsuura T.** // *J. Membr. Sci.* 2009. V. 341. P. 139–148. DOI: 10.1016/j.memsci.2009.05.053.
26. **Rao G., Hiibel S.R., Childress A.E.** // *Desalination.* 2014. V. 351. P. 151–162. DOI: 10.1016/j.desal.2014.07.006.
27. **Alkhudhiri A., Darwish N., Hilal N.** // *Desalination.* 2012. V. 287. P. 2–18. DOI: 10.1016/j.desal.2011.08.027.
28. **Schneider K., Hölz W., Wollbeck R., Ripperger S.** // *J. Membr. Sci.* 1988. V. 39. P. 25–42. DOI: 10.1016/S0376-7388(00)80992-8.
29. **Idrees H., Ali S., Sajid M., Rashid M., Khawaja F.I., Ali Z., Anwar M.N.** // *Desalination.* 2012. V. 306. P. 60–71. DOI: 10.1016/j.desal.2012.07.043.
30. **Winter D., Koschikowski J., Düver D., Hertel P., Beuscher U.** // *Desalination.* 2013. V. 323. P. 120–133. DOI: 10.1016/j.desal.2013.04.007.
31. **Khayet M., Khulbe K.C., Matsuura T.** // *J. Membr. Sci.* 2004. V. 238. P. 199–211. DOI: 10.1016/j.memsci.2004.03.036.
32. **Fernández-Pineda C., Izquierdo-Gil M., García-Payo M.** // *J. Membr. Sci.* 2002. V. 198. P. 33–49. DOI: 10.1016/S0376-7388(01)00605-6.
33. **Lagana F., Barbieri G., Drioli E.** // *J. Membr. Sci.* 2000. V. 166. P. 1–11. DOI: 10.1016/S0376-7388(99)00234-3.
34. **Martinez L., Rodriguez-Maroto J.M.** // *J. Membr. Sci.* 2008. V. 312. P. 143–156. DOI: 10.1016/j.memsci.2007.12.048.
35. **Wu H.Y., Wang R., Field R.W.** // *J. Membr. Sci.* 2014. V. 470. P. 2257–2265. DOI: 10.1016/j.memsci.2014.06.002.
36. **Ali A., Quist-Jensen C.A., Macedonio F., Drioli E.** // *J. Membr. Sci. Res.* 2016. V. 2. P. 179–185. DOI: 10.22079/jmsr.2016.21948.
18. GOST 2409–2014. Refractories. Method for determining apparent density, open and total porosity, water absorption. M.: Standartinform. 2014. P. 8. (in Russian).
19. **Muhammad I.K.M., Manaf O., Sujith A.** // *Mater. Lett.* 2019. V. 252. P. 321–324. DOI: 10.1016/j.matlet.2019.06.008.
20. **Bon A.I., Dzyubenko V.G., Shishova I.I.** // *Vysokomol. Soed.* 1993. V. 35. N 7. P. 922–932 (in Russian).
21. **Eykens L., De Sitter K., Dotremont C., Pinoy L., Van der Bruggen B.** // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2017. V. 182. P. 36–51. DOI: 10.1016/j.seppur.2017.03.035.
22. **Rao G., Hiibel S.R., Childress A.E.** // *Desalination.* 2014. V. 351. P. 151–162. DOI: 10.1016/j.desal.2014.07.006.
23. **Wang K.Y., Foo S.W., Chung T.S.** // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009. V. 48. P. 4474–4483. DOI: 10.1021/ie8009704.
24. **Essalhi M., Khayet M.** // *J. Membr. Sci.* 2013. V. 433. P. 180–191. DOI: 10.1016/j.memsci.2013.01.024.
25. **Qtaishat M., Khayet M., Matsuura T.** // *J. Membr. Sci.* 2009. V. 341. P. 139–148. DOI: 10.1016/j.memsci.2009.05.053.
26. **Rao G., Hiibel S.R., Childress A.E.** // *Desalination.* 2014. V. 351. P. 151–162. DOI: 10.1016/j.desal.2014.07.006.
27. **Alkhudhiri A., Darwish N., Hilal N.** // *Desalination.* 2012. V. 287. P. 2–18. DOI: 10.1016/j.desal.2011.08.027.
28. **Schneider K., Hölz W., Wollbeck R., Ripperger S.** // *J. Membr. Sci.* 1988. V. 39. P. 25–42. DOI: 10.1016/S0376-7388(00)80992-8.
29. **Idrees H., Ali S., Sajid M., Rashid M., Khawaja F.I., Ali Z., Anwar M.N.** // *Desalination.* 2012. V. 306. P. 60–71. DOI: 10.1016/j.desal.2012.07.043.
30. **Winter D., Koschikowski J., Düver D., Hertel P., Beuscher U.** // *Desalination.* 2013. V. 323. P. 120–133. DOI: 10.1016/j.desal.2013.04.007.
31. **Khayet M., Khulbe K.C., Matsuura T.** // *J. Membr. Sci.* 2004. V. 238. P. 199–211. DOI: 10.1016/j.memsci.2004.03.036.
32. **Fernández-Pineda C., Izquierdo-Gil M., García-Payo M.** // *J. Membr. Sci.* 2002. V. 198. P. 33–49. DOI: 10.1016/S0376-7388(01)00605-6.
33. **Lagana F., Barbieri G., Drioli E.** // *J. Membr. Sci.* 2000. V. 166. P. 1–11. DOI: 10.1016/S0376-7388(99)00234-3.
34. **Martinez L., Rodriguez-Maroto J.M.** // *J. Membr. Sci.* 2008. V. 312. P. 143–156. DOI: 10.1016/j.memsci.2007.12.048.
35. **Wu H.Y., Wang R., Field R.W.** // *J. Membr. Sci.* 2014. V. 470. P. 2257–2265. DOI: 10.1016/j.memsci.2014.06.002.
36. **Ali A., Quist-Jensen C.A., Macedonio F., Drioli E.** // *J. Membr. Sci. Res.* 2016. V. 2. P. 179–185. DOI: 10.22079/jmsr.2016.21948.

Поступила в редакцию 14.11.2022  
Принята к опубликованию 24.05.2023

Received 14.11.2022  
Accepted 24.05.2023