

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 66.081.6-278, 66.081.63
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-4-431-438>

Поступило в редакцию 31.03.2021
Received 31.03.2021

**Е. С. Бурть¹, Т. В. Плиско¹, академик А. В. Бильдюкевич¹, Г. Ли², И. Куява²,
М. В. Шишонок³, В. Куявский²**

¹*Институт физико-органической химии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

²*Университет им. Николая Коперника в Торуне, Торунь, Польша*

³*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь*

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СЕЛЕКТИВНОГО СЛОЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ДИНАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МЕМБРАН ДЛЯ ПЕРВАПОРАЦИИ

Аннотация. Композиционные мембраны для первапорации были получены методом формирования селективного слоя на основе сшитого поливинилового спирта (ПВС) на поверхности пористой мембраны-подложки в динамическом режиме (ультрафильтрации растворов ПВС). Установлено, что повышение давления приводит к увеличению толщины селективного слоя композиционных мембран; при этом их контактный угол смачивания, удельная производительность, содержание воды в пермеате в процессе первапорации смеси этанол/вода 90/10 изменяются экстремально с максимумом при 3–4 атм в зависимости от концентрации раствора ПВС. Экстремальная зависимость краевого угла смачивания, коэффициента разделения и проницаемости композиционных мембран объясняется процессами уплотнения полимерной матрицы-подложки под действием трансмембранного давления и ее релаксации после снятия давления. При использовании повышенных давлений (более 3–4 атм) релаксация полимерной матрицы приводит к появлению микродефектов в результате деформации сформированного селективного слоя.

Ключевые слова: композиционные мембраны, динамический режим, первапорация, поливиниловый спирт, сшивание, этиловый спирт, дегидратация

Для цитирования. Влияние давления при формировании селективного слоя на структуру и свойства динамических композиционных мембран для первапорации / Е. С. Бурть [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 4. – С. 431–438. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-4-431-438>

**Katsiaryna S. Burts¹, Tatiana V. Plisko¹, Academician Alexandr V. Bilydukevich¹, Guoqiang Li²,
Joanna Kujawa², Margarita V. Shishonok³, Wojciech Kujawski²**

¹*Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Nicolaus Copernicus University in Toruń, Torun, Poland*

³*Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus*

PRESSURE EFFECT DURING THE FORMATION OF A SELECTIVE LAYER ON THE STRUCTURE AND PERFORMANCE OF DYNAMIC COMPOSITE MEMBRANES FOR PERVAPORATION

Abstract. Composite membranes for pervaporation were prepared by forming a selective layer based on cross-linked polyvinyl alcohol (PVA) on the porous membrane-substrate surface in the dynamic mode (via PVA solution ultrafiltration). It was found that the pressure growth results in increasing the thickness of the composite membrane selective layer. Composite membrane contact angle, flux, water content in permeate in ethanol/water (mass ratio 90/10) pervaporation were revealed to have maximum values at 3–4 atm depending on the PVA concentration in the feed solution. It was shown that the revealed dependence of the contact angle, selectivity, and permeability on the pressure of the selective layer formation is due to the compaction of the polymer matrix-substrate under the action of the transmembrane pressure and its relaxation after pressure release. When using elevated pressures (more than 3–4 atm), the relaxation of the polymer matrix causes the microdefect to form as a result of deformation of the selective layer.

Keywords: composite membranes, dynamic mode, pervaporation, polyvinyl alcohol, cross linking, ethanol, dehydration

For citation. Burts K. S., Plisko T. V., Bilydukevich A. V., Li G., Kujawa J., Shishonok M. V., Kujawski W. Pressure effect during the formation of a selective layer on the structure and performance of dynamic composite membranes for pervaporation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 4, pp. 431–438 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-4-431-438>

Введение. Первапорация представляет собой мембранный процесс разделения жидких смесей через непористую мембрану, движущей силой которого является градиент химического потенциала [1]. Актуальность и перспективность процесса первапорации обусловлена высокой эффективностью разделения различных водно-органических смесей и смесей органических веществ, в том числе азеотропных; малой энергоемкостью по сравнению с альтернативными процессами разделения, а также отсутствием необходимости использования дополнительных реагентов. Наиболее востребованной и развитой областью первапорации является гидрофильная первапорация, т. е. разделение водно-органических смесей, например, метанол–вода, этанол–вода, изопропанол–вода и т. д., в процессе которого через мембрану преимущественно проникает вода [2]. В качестве мембранного материала для разделения водно-органических смесей используют гидрофильные полимерные материалы, такие как поливиниловый спирт (ПВС), хитозан, полиэлектролитные комплексы и др.

В настоящее время в первапорации широко используются композиционные мембраны (КМ), которые получают нанесением тонкого непористого селективного слоя на пористую подложку (ультра- или микрофльтрационную мембрану) [3]. Преимущество КМ перед гомогенными первапорационными мембранами заключается в более высокой удельной производительности разделения за счет уменьшения толщины селективного слоя.

Одним из перспективных способов получения КМ является динамический метод. Динамический метод получения КМ заключается в нанесении селективного слоя на мембрану-подложку путем фильтрации растворов водорастворимых полимеров [4; 5], различных коллоидных растворов (оксидов металлов, наночастиц, активированного угля и т. д.) [6–8] в режиме тангенциальной [9] или тупиковой [5] фильтрации. Динамические мембраны на основе полимеров представляют большой интерес вследствие разнообразия мембранообразующих материалов, возможности их направленной модификации и, тем самым, варьирования свойств в широких пределах. При нанесении селективного слоя методом ультрафильтрации в тангенциальном режиме важным является трансмембранное давление и скорость потока над мембраной. Толщина селективного слоя динамической мембраны увеличивается с уменьшением скорости потока [10; 11], однако при существенном снижении скорости потока образующийся селективный слой неоднороден [12]. Повышение трансмембранного давления вызывает увеличение потока пермеата и уплотнение гелевого слоя, который образуется в динамическом режиме. Это приводит к образованию более тонкого, но в то же время плотного динамического слоя [10; 12], что в свою очередь снижает удельную производительность мембран.

Одно из основных преимуществ динамических мембран заключается в том, что их можно получать путем обработки мембран, аппаратно оформленных в мембранный модуль (плоскорамный, рулонный или половолоконный) в условиях, которые мало отличаются от условий дальнейшей эксплуатации [13]. Получение КМ в динамическом режиме потенциально позволяет сформировать непористый селективный слой на поверхности ультрафильтрационных мембран, например, с использованием промышленных ультрафильтрационных установок. Преимущество нанесения селективного слоя на поверхность мембран, уже оформленных в модуль, состоит не только в упрощении технологии изготовления КМ, но и в предотвращении повреждения селективного слоя КМ при последующих операциях, связанных с их аппаратным оформлением. Помимо этого, к достоинствам данного подхода можно отнести следующие: низкий расход реагентов; высокую скорость и простоту реализации процесса; возможность варьирования толщины и структуры селективного слоя путем изменения режимов фильтрации и, соответственно, свойств композиционных мембран. Например, получают композиционные половолоконные мембраны, представляющие собой половолоконную мембрану-подложку на основе полисульфона и нанесенный в динамическом режиме на внутреннюю поверхность волокна тонкий селективный слой полидиметилсилоксана. Такие мембраны используют для разделения водно-спиртовых смесей в процессе первапорации [14]. Ранее было показано, что нанесение ПВС на поверхность ультра- (полисульфон, поливинилиденфторид) и микрофльтрационных мембран (наилон) в режиме ультрафильтрации с последующим сшиванием приво-

дит к получению ультрафильтрационных мембран с повышенной селективностью и устойчивостью к загрязнению [5].

Цель данной работы заключалась в исследовании влияния давления при формировании селективного слоя на основе ПВС на структуру и транспортные свойства динамических КМ для первапорационной дегидратации водно-спиртовых смесей, в частности смеси этанол–вода. Новизна данной работы заключается в формировании селективного слоя КМ в режиме тупиковой фильтрации при использовании растворов ПВС, содержащих, помимо мембранообразующего полимера, сшивающий агент и катализатор сшивания.

Материалы и методы исследования. В качестве подложки при получении композиционных мембран использованы плоские ультрафильтрационные мембраны ПАН-100 на основе поли(акрилонитрил-*co*-метилакрилат)а (ПАН, $\langle M_w \rangle = 107000$ г/моль, соотношение звеньев акрилонитрила и метилакрилата – 92 : 8, ПО «Оргстекло «ВНИИСВ», Россия), на подложке из полиэфира производства Института физико-органической химии НАН Беларуси. Мембраны ПАН-100 характеризуются номинальным молекулярно-массовым пределом отсечения 100 кДа и устойчивы в диапазоне температур 0–70 °С и диапазоне рН 2–10. В качестве реагентов для приготовления модифицирующего раствора для нанесения непористого селективного слоя на ультрафильтрационную мембрану-подложку использовали поливиниловый спирт (ПВС, $\langle M_n \rangle = 145000$ г/моль, 17-99, Китай) как мембранообразующий полимер, глутаровый альдегид (ГА, 25 %-ный водный раствор, Fluka, Германия) как сшивающий агент и концентрированную соляную кислоту как катализатор сшивания.

Формирование селективного слоя на мембране ПАН-100 проводили в режиме тупиковой фильтрации раствора ПВС с добавками сшивающего агента и катализатора в специально сконструированной фильтрационной ячейке с увеличенным резервуаром (400 мл) для питающего раствора. Ячейка с увеличенным объемом использована для нивелирования изменения концентрации раствора ПВС при фильтрации. Рабочая площадь мембран составляла 15,5 см². Для формирования селективного слоя ПВС использовали два состава модифицирующего раствора, отобранных по результатам предварительных экспериментов и различающихся концентрацией ПВС. Концентрации компонентов в модифицирующих растворах составляли 1,0 мас. % ПВС, 0,06 мас. % ГА и 0,5 мас. % HCl; 0,5 мас. % ПВС, 0,1 мас. % ГА и 1,5 мас. % HCl. Нанесение селективного слоя проводили при давлении от 1 до 8 бар и температуре 20 °С, продолжительность нанесения слоя для 1,0 мас. % раствора ПВС составляла 10 мин, для 0,5 мас. % раствора ПВС – 20 мин. Мембраны сушили в сушильном шкафу при 50 °С в течение 16 ч.

Краевой угол смачивания мембран для ультрафильтрации и первапорации определяли методом прикрепленного пузырька с помощью Attension Theta Optical Tensiometer (Biolin Scientific, Швеция/Финляндия). Погрешность измерения не превышала $\pm 2^\circ$. Морфологию мембран исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM 6700F Field Emission SEM (Токио, Япония). Сколы КМ готовили методом криогенного разлома в жидком азоте с последующим нанесением слоя золота.

Транспортные характеристики композиционных мембран анализировали в ходе разделения смеси этанол–вода (в соотношении 90/10 по массе соответственно) при температуре разделяемой смеси, равной 35 °С.

Удельная производительность композиционных мембран определяется массой пермеата, проходящей через единицу площади поверхности за единицу времени:

$$J_n = \frac{m}{St},$$

где J_n – удельная производительность КМ, г/(м²·ч); m – масса пермеата, г; S – площадь мембраны, м²; t – продолжительность фильтрации, ч.

Значение коэффициента разделения определяли по формуле

$$\beta = \frac{y_A / y_B}{x_A / x_B},$$

где y_A и y_B – содержание воды и этанола в пермеате соответственно, мас. %; x_A и x_B – содержание воды и этанола в разделяемой жидкой смеси, мас. %.

Концентрации компонентов в исходной смеси и в пермеате определяли с использованием газового хроматографа VARIAN-3300 (США).

Показатель эффективности первапорации (PSI) является параметром, определяющим эффективность использования мембран в процессе разделения смесей, и рассчитывается по формуле

$$PSI = J_p(\beta - 1),$$

где J_p – удельная производительность КМ, кг/(м²·ч); β – коэффициент разделения.

Результаты и их обсуждение. Результаты исследования структуры и транспортных характеристик КМ, полученных при различных давлениях фильтрации раствора ПВС, представлены на рис. 1 и в таблице. Из сравнения электронных микрофотографий сколов КМ следует, что с повышением давления фильтрации толщина селективного слоя возрастает (рис. 1, таблица) от 2 мкм при 1 атм до 12 мкм при 8 атм. Толщина селективного слоя сшитого ПВС удовлетворительно аппроксимируется линейной зависимостью от давления фильтрации раствора ПВС.

Анализ данных показал, что зависимость удельной производительности КМ носит выраженный экстремальный характер. Наиболее высокими транспортными характеристиками обладают КМ, полученные при давлении формовочного раствора 3 атм: удельная производительность таких мембран составляет 106 г/(м²·ч), содержание воды в пермеате – 97 % (таблица). Зависимость PSI от давления при нанесении раствора ПВС также свидетельствует о том, что оптимальное давление раствора для формирования селективного слоя составляет 3 атм.

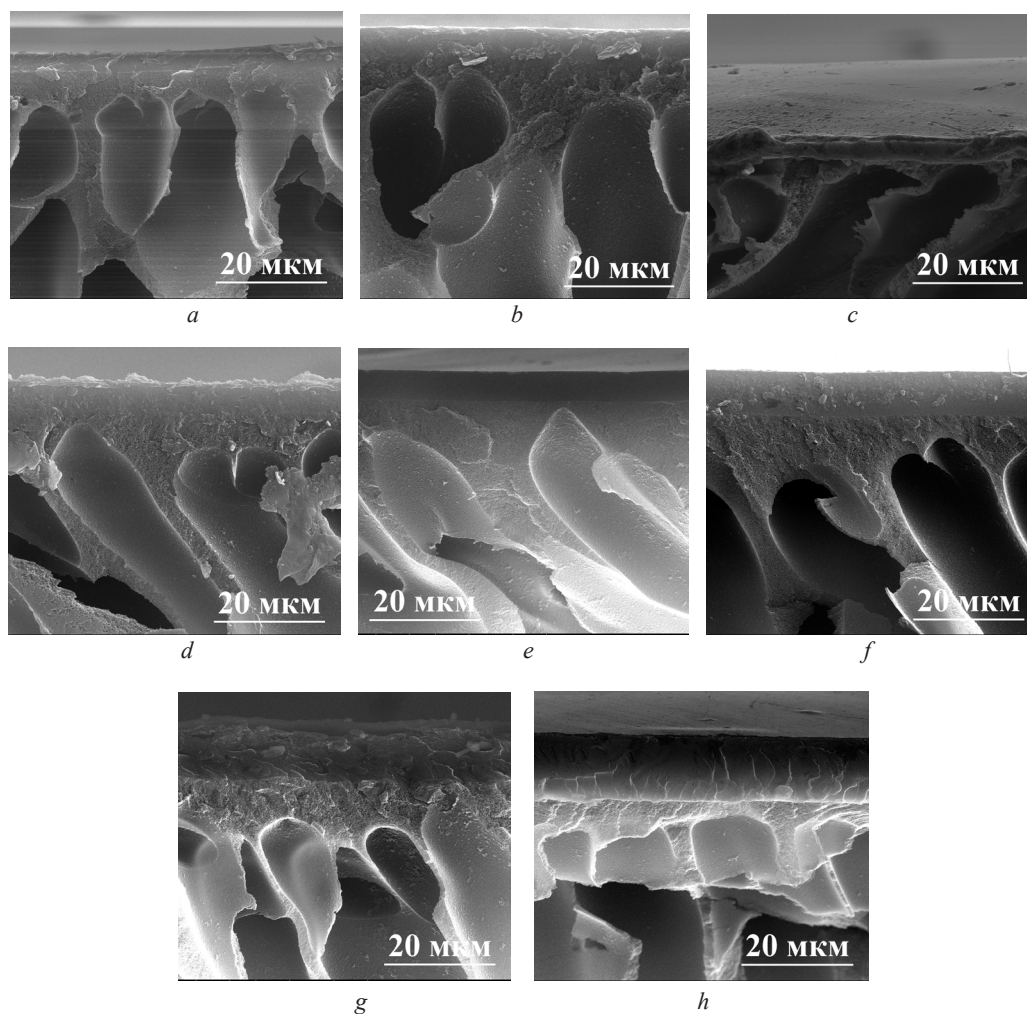


Рис. 1. Электронные микрофотографии фрагментов поперечных сколов композиционных мембран, полученных при различных давлениях фильтрации раствора ПВС, атм: *a* – 1; *b* – 2; *c* – 3; *d* – 4; *e* – 5; *f* – 6; *g* – 7; *h* – 8

Fig. 1. SEM-microphotographs of composite membrane cross-section prepared at different values of transmembrane pressure, atm: *a* – 1; *b* – 2; *c* – 3; *d* – 4; *e* – 5; *f* – 6; *g* – 7; *h* – 8

Зависимость толщины селективного слоя (l), удельной производительности (J_p), содержания воды в пермеате (ω_p), коэффициента разделения (β) и показателя эффективности первапорации (PSI) для КМ, полученных фильтрацией водного раствора 1 мас. % ПВС, 0,06 мас. % ГА и 0,5 мас. % HCl при различном давлении в течение 10 мин

Dependence of the selective layer thickness, flux (J_p), water content in permeate (ω_p), membrane separation factor (β) and pervaporation separation index (PSI) on the transmembrane pressure

ΔP , атм	l , мкм	J_p , г/(м ² ·ч)	ω_p , %	β	PSI, кг/(м ² ·ч)
1	3,0–4,0	53	91	88	5
2	4,5–5,0	57	97	291	16
3	4,3–5,0	106	97	241	31
4	5,5–6,0	55	97	291	15
5	6,2–7,0	59	97	291	17
6	7,5–8,0	51	96	234	12
7	10,0–11,0	34	94	141	5
8	11,8–12,3	45	97	291	13

Установлено, что значения краевого угла смачивания по воде композиционных мембран, полученные при различных давлениях раствора ПВС, также проходят через максимум. При повышении давления с 1 до 3 атм значения θ возрастают с 61 до 70°, а затем уменьшаются (рис. 2). Это может свидетельствовать о максимальной степени сшивания ПВС в данных условиях, вследствие чего поверхность мембран становится более гидрофобной. Мембраны, полученные при давлении 8 атм, имеют минимальное значение краевого угла смачивания (~30°).

Дополнительно исследованы транспортные характеристики КМ, полученных при использовании менее концентрированного раствора ПВС (0,5 мас. % ПВС, 0,1 мас. % ГА и 1,5 мас. % HCl) в зависимости от приложенного давления (рис. 3).

С увеличением давления 0,5 мас. % раствора ПВС при нанесении селективного слоя несколько возрастает удельная производительность композиционных мембран. При этом содержание воды в пермеате, как и в предыдущем случае, составляет 94–97 %. Параметр PSI имеет экстремальную зависимость от давления фильтрации 0,5 мас. % ПВС раствора (рис. 3). Наиболее эффективными в данном эксперименте являются композиционные мембраны, полученные фильтрованием раствора, содержащего 0,5 мас. % ПВС, 0,1 мас. % ГА и 1,5 мас. % HCl, при давлении 4 атм. Смещение

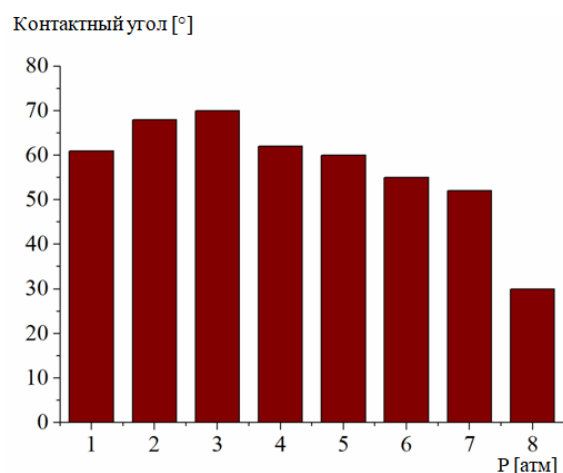


Рис. 2. Значения краевых углов смачивания по воде селективного слоя КМ в зависимости от давления при фильтрации раствора ПВС

Fig. 2. Water contact angles of the selective layer of composite membranes vs. filtration pressure of the aqueous PVA solution

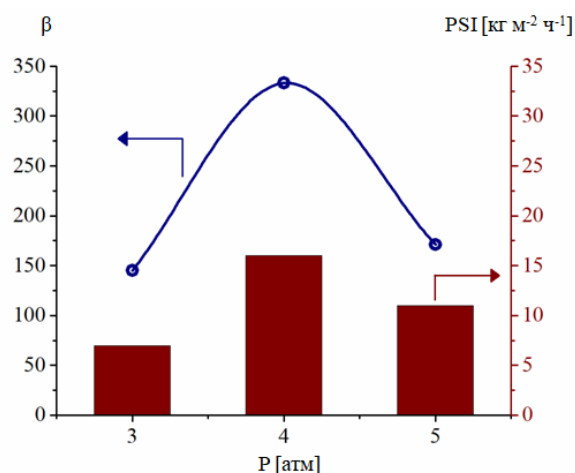


Рис. 3. Зависимость коэффициента разделения (β) и показателя эффективности первапорации (PSI) от давления раствора 0,5 мас. % ПВС, 0,1 мас. % ГА и 1,5 мас. % HCl при нанесении селективного слоя в течение 20 мин

Fig. 3. Dependence of separation factor (β) and pervaporation separation index (PSI) on the 0.5 wt. % ПВС, 0.1 wt. % ГА и 1.5 wt. % HCl solution pressure during selective layer formation for 20 min

экстремума PSI для данных КМ в область более высоких давлений по сравнению с 1,0 мас. % раствором ПВС обусловлена более низкой вязкостью модифицирующего раствора.

Следует отметить, что повышение трансмембранного давления приводит, как правило, к уплотнению полимерных ультрафильтрационных мембран и является одной из важных характеристик, определяющих стабильность транспортных свойств мембран при эксплуатации. Для оценки устойчивости мембраны ПАН-100 к действию давления, образец мембраны предварительно тестировали с использованием дистиллированной воды при давлении 1 бар (J_1^0), затем давление повышали до 5 бар, фиксировали начальное значение потока (J_5^0) и определяли зависимость потока во времени. Как правило, достаточно резкое снижение производительности мембран по воде наблюдалось в течение 10–15 мин, а стабилизация потока (J_5^*) достигалась через 1,5–2,0 ч. После чего давление сбрасывали и через 30 мин мембрану вновь тестировали по дистиллированной воде при давлении 1,0 бар (J_1^*). Установлено, что суммарная степень уплотнения мембраны (J_5^* / PJ_1^0), т. е. ее отклонение от идеально жесткой составило 0,69, а параметр (J_1^* / J_1^0), характеризующий способность полимерной матрицы к релаксации (восстановлению исходной проницаемости), составил 0,90–0,93. Таким образом, при нанесении раствора ПВС при повышенных давлениях происходит уплотнение мембраны, а при последующем сбросе давления полимерная матрица мембраны-подложки релаксирует. В результате на процесс формирования селективного слоя влияют два фактора, которые могут оказывать противоположное действие на транспортные характеристики КМ. Увеличение давления приводит к возрастанию толщины и плотности слоя ПВС, а релаксация полимерной матрицы-подложки после его нанесения может приводить к появлению микродефектов вследствие деформации сформированного селективного слоя. Именно этим объясняется экстремальная зависимость краевого угла смачивания, коэффициента разделения и проницаемости композиционных мембран от трансмембранного давления.

Итак, показана возможность получения композиционных мембран для гидрофильной первапорации в динамическом режиме методом тупиковой ультрафильтрации разбавленных растворов ПВС, содержащих сшивающий агент и катализатор сшивания. Такой подход позволяет осуществить процесс модификации в одну стадию.

Заключение. Установлено влияние давления при формировании селективного слоя композиционных мембран в динамическом режиме на их структуру и свойства. Показано, что толщина селективного слоя динамических композиционных мембран увеличивается при повышении давления. Установлено, что удельная производительность в процессе первапорации, содержание воды в пермеате и показатель эффективности первапорации изменяются экстремально с максимумом при 3 атм при использовании 1,0 мас. % раствора ПВС и 4 атм для 0,5 мас. % ПВС, что объясняется образованием микродефектов селективного слоя вследствие уплотнения полимерной матрицы-подложки под действием высокого трансмембранного давления и ее релаксации после снятия давления. Смещение экстремумов для КМ, полученных при фильтрации 0,5 мас. % раствора ПВС, в область более высоких давлений по сравнению с 1,0 мас. % раствором обусловлена более низкой вязкостью модифицирующего раствора. Данный метод позволяет получать динамические композиционные мембраны в одну стадию.

Список использованных источников

1. Membranes for dehydration of alcohols via pervaporation / M. S. Jyothi [et al.] // J. Environ. Manage. – 2019. – Vol. 242. – P. 415–429. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.043>
2. Drioli, E. On the coupling effect in pervaporation / E. Drioli, S. Zhang, A. Basile // J. Membr. Sci. – 1993. – Vol. 81, N 1–2. – P. 43–55. [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(93\)85030-z](https://doi.org/10.1016/0376-7388(93)85030-z)
3. Baker, R. W. Membrane technology and applications / R.W. Baker. – 2nd ed. – Chichester, 2004. – XII, 538 p. <https://doi.org/10.1002/0470020393>
4. Effect of the composition of the copolymer of carboxybetaine and n-butylmethacrylate on low-fouling property of dynamically formed membrane / K. Akamatsu [et al.] // Sep. Purif. Technol. – 2013. – Vol. 118. – P. 463–469. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.07.034>

5. Na, L. Dynamically formed poly (vinyl alcohol) ultrafiltration membranes with good anti-fouling characteristics / L. Na, L. Zhongzhou, X. Shuguang // *J. Membr. Sci.* – 2000. – Vol. 169. – P. 17–28. [https://doi.org/10.1016/s0376-7388\(99\)00327-0](https://doi.org/10.1016/s0376-7388(99)00327-0)
6. Hydrophilic Fe₂O₃ dynamic membrane mitigating fouling of support ceramic membrane in ultrafiltration of oil/water emulsion / D. Lu [et al.] // *Sep. Purif. Technol.* – 2016. – Vol. 165. – P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.03.034>
7. Chen, C. C. Formation and characteristics of zirconium ultrafiltration dynamic membranes of various pore sizes / C. C. Chen, B. H. Chiang // *J. Membr. Sci.* – 1998. – Vol. 143, N 1–2. – P. 65–73. [https://doi.org/10.1016/s0376-7388\(98\)00017-9](https://doi.org/10.1016/s0376-7388(98)00017-9)
8. The antifouling performance of an ultrafiltration membrane with pre-deposited carbon nanofiber layers for water treatment / T. Liu [et al.] // *J. Membr. Sci.* – 2018. – Vol. 557. – P. 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.04.018>
9. Preparation of polyelectrolyte multilayer membranes by dynamic layer-by-layer process for pervaporation separation of alcohol/water mixtures / G. Zhang [et al.] // *J. Membr. Sci.* – 2006. – Vol. 280, N 1–2. – P. 727–733. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.02.031>
10. Dynamic membranes of powder-activated carbon for removing microbes and organic matter from seawater / S. E. Wu [et al.] // *J. Membr. Sci.* – 2017. – Vol. 541. – P. 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.07.006>
11. Parameters affecting the properties of dynamic membranes formed by Zr hydroxide colloids / M. Romyantsev [et al.] // *Desalination.* – 2000. – Vol. 131, N 1–3. – P. 189–200. [https://doi.org/10.1016/s0011-9164\(00\)90018-3](https://doi.org/10.1016/s0011-9164(00)90018-3)
12. Prediction of particle deposition and layer growth in the preparation of a dynamic membrane with cross-flow microfiltration / Y. Pan [et al.] // *RSC Adv.* – 2015. – Vol. 5, N 108. – P. 89015–89024. <https://doi.org/10.1039/c5ra14572d>
13. Evaluations of polyelectrolyte multilayer membranes assembled by a dynamic layer-by-layer technique / S. Ji [et al.] // *Desalination.* – 2008. – Vol. 234, N 1–3. – P. 300–306. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.09.098>
14. Dynamically formed inner skin hollow fiber polydimethylsiloxane/polysulfone composite membrane for alcohol permselective pervaporation / J. Guo [et al.] // *Chem. Eng. J.* – 2010. – Vol. 158, N 3. – P. 558–565. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.01.053>

References

1. Jyothi M. S., Reddy K. R., Soontarapa K., Naveen S., Raghu A. V., Kulkarni R. V., Suhas D. P., Shetti N. P., Nadagouda M. N., Aminabhavi T. M. Membranes for dehydration of alcohols via pervaporation. *Journal of Environmental Management*, 2019, vol. 242, pp. 415–429. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.043>
2. Drioli E., Zhang S., Basile A. On the coupling effect in pervaporation. *Journal of Membrane Science*, 1993, vol. 81, no. 1–2, pp. 43–55. [https://doi.org/10.1016/0376-7388\(93\)85030-z](https://doi.org/10.1016/0376-7388(93)85030-z)
3. Baker R. W. *Membrane technology and applications*. 2nd ed. Chichester, 2004. XII, 538 p. <https://doi.org/10.1002/0470020393>
4. Akamatsu K., Okuyama M., Mitsumori K., Yoshino A., Nakao A., Nakao S. I. Effect of the composition of the copolymer of carboxybetaine and n-butylmethacrylate on low-fouling property of dynamically formed membrane. *Separation and Purification Technology*, 2013, vol. 118, pp. 463–469. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.07.034>
5. Na L., Zhongzhou L., Shuguang X. Dynamically formed poly (vinyl alcohol) ultrafiltration membranes with good anti-fouling characteristics. *Journal of Membrane Science*, 2000, vol. 169, no. 1, pp. 17–28. [https://doi.org/10.1016/s0376-7388\(99\)00327-0](https://doi.org/10.1016/s0376-7388(99)00327-0)
6. Lu D., Cheng W., Zhang T., Lu X., Liu Q., Jiang J., Ma J. Hydrophilic Fe₂O₃ dynamic membrane mitigating fouling of support ceramic membrane in ultrafiltration of oil/water emulsion. *Separation and Purification Technology*, 2016, vol. 165, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.03.034>
7. Chen C. C., Chiang B. H. Formation and characteristics of zirconium ultrafiltration dynamic membranes of various pore sizes. *Journal of Membrane Science*, 1998, vol. 143, no. 1–2, pp. 65–73. [https://doi.org/10.1016/s0376-7388\(98\)00017-9](https://doi.org/10.1016/s0376-7388(98)00017-9)
8. Liu T., Zhou H., Graham N., Lian Y., Yu W., Sun K. The antifouling performance of an ultrafiltration membrane with pre-deposited carbon nanofiber layers for water treatment. *Journal of Membrane Science*, 2018, vol. 557, pp. 87–95. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.04.018>
9. Zhang G., Gu W., Ji S., Liu Z., Peng Y., Wang Z. Preparation of polyelectrolyte multilayer membranes by dynamic layer-by-layer process for pervaporation separation of alcohol/water mixtures. *Journal of Membrane Science*, 2006, vol. 280, no. 1–2, pp. 727–733. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2006.02.031>
10. Wu S. E., Hwang K. J., Cheng T. W., Lin Y. C., Tung K. L. Dynamic membranes of powder-activated carbon for removing microbes and organic matter from seawater. *Journal of Membrane Science*, 2017, vol. 541, pp. 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.07.006>
11. Romyantsev M., Shauly A., Yiantsios S. G., Hasson D., Karabelas A. J., Semiat R. Parameters affecting the properties of dynamic membranes formed by Zr hydroxide colloids. *Desalination*, 2000, vol. 131, no. 1–3, pp. 189–200. [https://doi.org/10.1016/s0011-9164\(00\)90018-3](https://doi.org/10.1016/s0011-9164(00)90018-3)
12. Pan Y., Wang W., Wang W., Wang T. Prediction of particle deposition and layer growth in the preparation of a dynamic membrane with cross-flow microfiltration. *RSC Advances*, 2015, vol. 5, no. 108, pp. 89015–89024. <https://doi.org/10.1039/c5ra14572d>
13. Ji S., Zhang G., Liu Z., Peng Y., Wang Z. Evaluations of polyelectrolyte multilayer membranes assembled by a dynamic layer-by-layer technique. *Desalination*, 2008, vol. 234, no. 1–3, pp. 300–306. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.09.098>
14. Guo J., Zhang G., Wu W., Ji S., Qin Z., Liu Z. Dynamically formed inner skin hollow fiber polydimethylsiloxane/polysulfone composite membrane for alcohol permselective pervaporation. *Chemical Engineering Journal*, 2010, vol. 158, no. 3, pp. 558–565. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2010.01.053>

Информация об авторах

Бурть Екатерина Сергеевна – мл. науч. сотрудник, аспирант. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: katyaburt@gmail.com.

Плиско Татьяна Викторовна – канд. хим. наук, доцент, заведующая лабораторией. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: plisko.v.tatiana@gmail.com.

Бильдюкевич Александр Викторович – академик, д-р хим. наук, профессор, директор. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: uf@ifoch.bas-net.by.

Ли Грант – аспирант. Университет им. Николая Коперника в Торуне (ул. Гагарина, 7, 87-100, Торунь, Польша). E-mail: grantli@doktorant.umk.pl.

Куява Иоанна – д-р хим. наук, доцент. Университет им. Николая Коперника в Торуне (ул. Гагарина, 7, 87-100, Торунь, Польша). E-mail: joanna.kujawa@umk.pl.

Шишонок Маргарита Валентиновна – канд. хим. наук, доцент. Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 14, 220006, Минск, Республика Беларусь). E-mail: 999250@gmail.com.

Куявский Войцех – д-р хим. наук, профессор, заведующий кафедрой. Университет им. Николая Коперника в Торуне (ул. Гагарина, 7, 87-100, Торунь, Польша). E-mail: wkujawski@umk.pl.

Information about the authors

Burts Katsiaryna S. – Junior researcher, Postgraduate student. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: katyaburt@gmail.com.

Plisko Tatiana V. – Ph. D. (Chemistry), Associate professor, Head of the Laboratory. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: plisko.v.tatiana@gmail.com.

Bildyukevich Alexandr V. – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Director. Institute of Physical Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: uf@ifoch.bas-net.by.

Li Guoqiang – Postgraduate student. Nicolaus Copernicus University in Torun (7, Gagarin Str., 87-100, Torun, Poland). E-mail: grantli@doktorant.umk.pl.

Kujawa Joanna – D. Sc. (Chemistry), Associate professor. Nicolaus Copernicus University in Torun (7, Gagarin Str., 87-100, Torun, Poland). E-mail: joanna.kujawa@umk.pl.

Shishonok Margarita V. – Ph. D. (Chemistry), Associate professor. Belarussian State University (14, Leningradskaya Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: 999250@gmail.com.

Kujawski Wojciech – D. Sc. (Chemistry), Professor, Head of the Department. Nicolaus Copernicus University in Torun (7, Gagarin Str., 87-100, Torun, Poland). E-mail: wkujawski@umk.pl.