

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МЕМБРАН МГА-95 И ESPA МЕТОДОМ РЕНТГЕНОВСКОГО РАССЕЙВАНИЯ

С. И. Лазарев¹, Ю. М. Головин², Д. С. Лазарев¹,
В. Г. Казаков¹, И. В. Хорохина¹

*Кафедры: «Прикладная геометрия и компьютерная графика» (1),
«Физика» (2), ФГБОУ ВПО «ТГТУ»; geometry@mail.nnn.tstu.ru*

Ключевые слова: композиционная мембрана; малоугловое рентгеновское рассеяние; поровое пространство; самоаффинный фрактал; структура пор.

Аннотация: Проведены экспериментальные исследования структуры порового пространства мембран МГА-95 и ESPA методом малоуглового рентгеновского рассеяния. Установлены величины численных значений радиусов пор как параметров, формирующих скелет порового пространства обратноосмотических композиционных мембран. В области вектора рентгеновского рассеяния $0,171 < s < 0,538 \text{ нм}^{-1}$ установлены три типа рассеивающих пор (сфера, диск, цилиндр) и определены их средние радиусы инерции. Выявлена структура пор мембран МГА-95 и ESPA, которая может быть описана концепцией самоаффинного фрактала. В области вектора рассеяния $0,245 < s < 0,342 \text{ нм}^{-1}$ (средние поры с размерами $9,2 < r < 12,8 \text{ нм}$) структура пор соответствует модели «уложенных сфер» с протяженными прямыми каналами с фрактальными индексами 1,2 и 1,3. Поры $r \sim 20 \text{ нм}$ образуют извилистые каналы, фрактальные индексы которых равны 2,1 и 2,8 соответственно. Рассеяние в области $0,391 < s < 0,538 \text{ нм}^{-1}$ ($5,8 < r < 8,0 \text{ нм}$) происходит на монопорах компактной формы с гладкой поверхностью и фрактальным индексом $D = 3,9$ (режим Порода $D = 4$).

Введение

Исследования структуры порового пространства в полупроницаемых мембранах до настоящего времени остаются весьма актуальными [1 – 5]. Существует несколько подходов, объясняющих перенос веществ через поровое пространство полупроницаемых мембран. Исследованы структурные характеристики мембран с позиций влияния свойств ацетатцеллюлозных растворов на формирования наноструктурированных фильтрационных мембран [1]; кинетические закономерности формирования пористой структуры мембран методом инверсии фаз [2]; влияние состава формовочных смесей, приготовленных на основе диацетата целлюлозы, на поровые и реологические свойства мембран на основе целлюлозы [3]. В работе [4] проведен анализ практического применения методов мембранной технологии для разделения промышленных растворов методом гидродинамической проницаемости растворителя и растворенного вещества через поровое пространство мембран. Исследование роли связанной и капиллярной воды в порах мембраны выполнены авторами работы [5], которые отмечают, что в мембране существуют

кристаллические и аморфные области, причем поры расположены в аморфных областях и влияют на перенос воды и растворенного вещества. Молекулы воды, проникая в аморфные области порового пространства, связываются водородными связями с функциональными группами полимера. Образующийся слой связанной воды имеет упорядоченную структуру и не обладает растворяющей способностью. Образование прочных водородных связей с поверхностными ионами пор в аморфных областях и дефектах кристаллитов мембраны ведет, в той или иной степени, к нарушению надмолекулярной структуры полимерной мембраны.

Обзор данных, представленных в работах [1 – 5], позволяет говорить о необходимости проведения исследования структуры и морфологии порового пространства полупроницаемых обратноосмотических мембран. Это позволит объяснить и более детально физически описать механизм переноса ионов и молекул веществ через поровое пространство обратноосмотических мембран. В данной работе проведено исследование структуры порового пространства и морфологии пор полупроницаемых мембран МГА-95 и ESPA методом малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР).

Экспериментальная часть

Исследования выполнены на установке, схема которой приведена на рис 1, основным элементом которой является питающий аппарат ДРОН-3 1. Образец мембраны помещался в камеру малоуглового гониометра КРМ-1 2 со щелевой схемой коллимации первичного пучка $\text{CuK}\alpha$ -излучения и Ni-фильтром, которая затем вакуумировалась. Рассеянное рентгеновское излучение регистрировалось счетчиком БДС-6 3, а усиленный электрический сигнал передавался в персональный компьютер (ПК) 4. Запись осуществлялась в режиме автоматического сканирования по точкам с шагом одна минута и временем экспозиции 100 с. Измерения проведены в диапазоне значений углов рассеяния $(0,34 \dots 1,8) \cdot 10^{-2}$ рад. На рисунке 2 представлены зависимости интенсивности $I(\epsilon)$ МУРР экспериментальных и модельных дифрактограмм мембран МГА-95 и ESPA в угловых координатах.

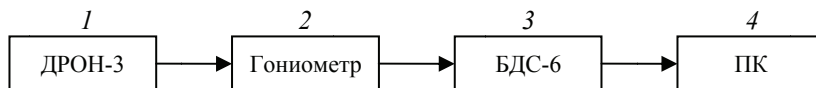


Рис. 1. Схема установки для исследования порового пространства мембран методом малоуглового рентгеновского рассеяния

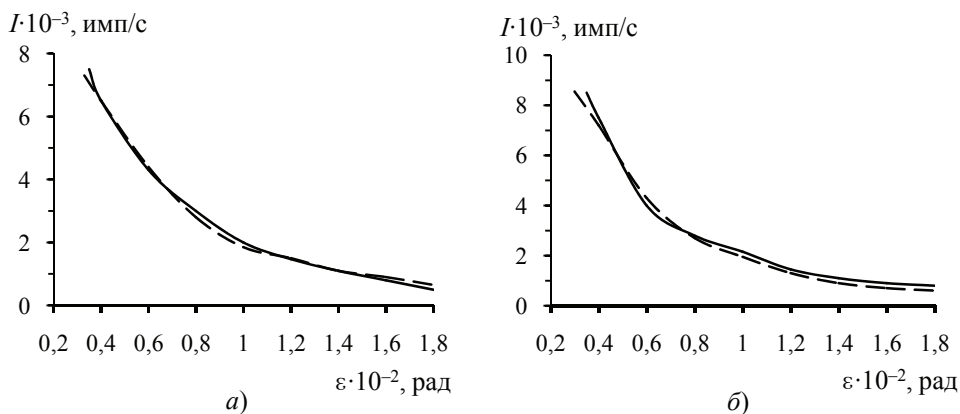


Рис. 2. Дифрактограммы мембран МГА-95 (а) и ESPA (б): сплошная линия – экспериментальные; пунктирная – модельные

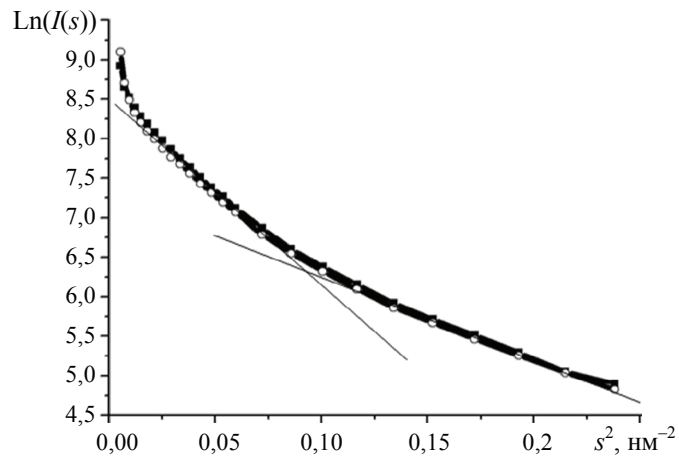
Экспериментальные кривые интенсивности МУРР обрабатывались с использованием аналитической программы ORIGIN 6.0. В качестве координаты брали величину модуля вектора рассеяния $s = (4\pi/\lambda)\sin\theta$, где θ – угол рассеяния, $\lambda = 0,1542$ нм – длина волны медного рентгеновского излучения. Зависимость интенсивности $I(s)$ рассеяния рентгеновского излучения строили в интервале значений вектора рассеяния $s = 0,171\dots 1,0$ нм⁻¹, что позволило получить достоверную информацию в прямом пространстве о размерах пор диапазона фиксируемых размеров 21, 3...3,14 нм согласно формуле Брегга–Вульфа ($sr = \pi$) [6, 7].

Анализ результатов экспериментальных исследований

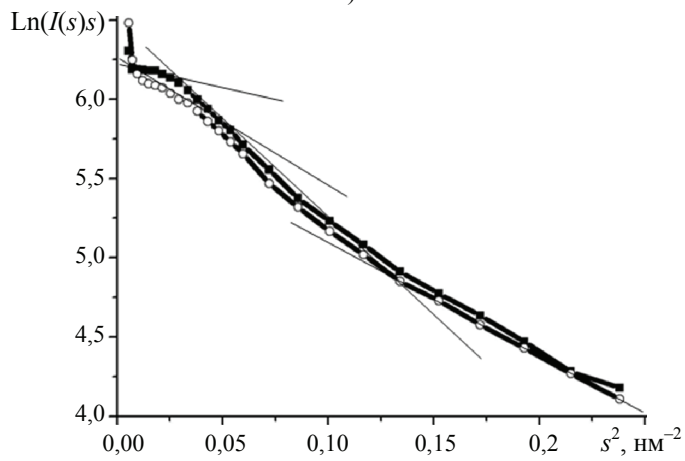
Приступая к интерпритации экспериментальных данных отметим, что кривые $I(\epsilon)$ интенсивности рассеяния рентгеновского излучения монотонно убывают с увеличением угла рассеяния. Такое поведение МУРР на локализованных электронных плотностях указывает на отсутствие интерференции, вызванной межчастичными взаимодействиями [6 – 8]. При сравнительном анализе экспериментальных и модельных кривых интенсивности $I(\epsilon)$ МУРР легко заметить их несовпадение (см. рис. 2). Если считать, что модельные экспоненты – идеальные кривые рассеяния монодисперсных систем со сферически однородными порами, то экспериментальные кривые можно рассматривать, как суперпозицию минимум двух идеальных экспонент. Это позволяет предположить, что мембраны состоят из пор разных размеров – от малых, дающих вклад в рассеяние при больших значениях угла рассеяния, до больших, определяющих рассеяние при малых [8]. Кроме того, наблюдается резкий спад хода кривых рассеяния при малых углах и медленный – при больших, что свидетельствует о нерегулярном распределении пор в объеме мембран. Поскольку поровое пространство – свободный объем полимерных мембран, который организован надмолекулярной структурой ацетатцеллюлозных молекул, то, очевидно, поры имеют не только различные радиусы, но и формы. Поэтому, кривые МУРР на первом этапе могут дать только качественные сведения о формах пор (сферических, дискообразных и стержневых – цилиндрических).

Для этого кривые интенсивности $I(s)$ МУРР мембран МГА-95, ESPA, представленные как $I(s) \sim \exp(-(sR)^2/3)$, $I(s) \sim s^{-1} \exp(-(sR)^2/2)$ и $I(s) \sim s^{-2} \exp(-(sR)^2)$, строились в полулогарифмическом масштабе в виде $\text{Ln}(I(s)) = f(s^2)$, $\text{Ln}(I(s)s) = f(s^2)$, $\text{Ln}(I(s)s^2) = f(s^2)$ (рис. 3).

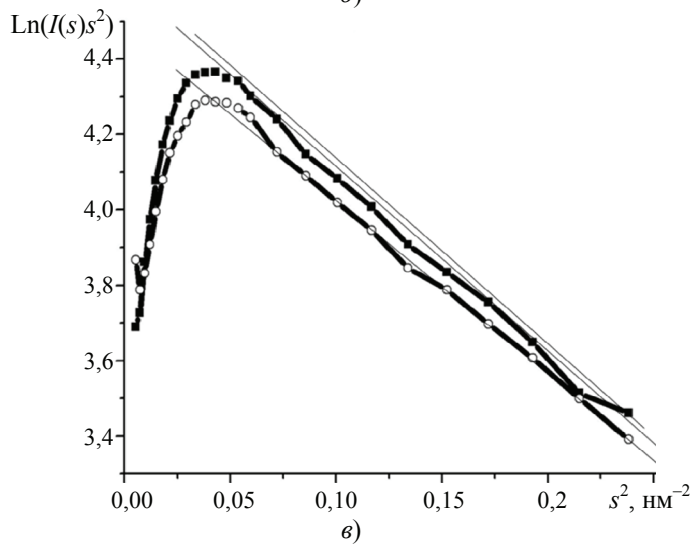
В таком представлении для сферических и дискообразных структур (см. рис. 3, а, б) экспериментальные данные демонстрируют линейные участки с различными наклонами. На кривых (см. рис. 3, а) можно выделить два прямолинейных участка в интервалах, нм⁻¹ (нм): $0,171 < s < 0,269$ ($11,7 < r < 18,4$), $0,318 < s < 0,465$ ($6,8 < r < 9,9$) – для МГА-95; $0,171 < s < 0,293$ ($10,7 < r < 18,4$), $0,342 < s < 0,489$ ($6,4 < r < 9,1$) – для ESPA; на кривых (см. рис. 3, б) участки, нм⁻¹ (нм): $0,171 < s < 0,122$ ($14,3 < r < 18,4$), $0,245 < s < 0,415$ ($7,8 < r < 12,8$), $0,44 < s < 0,489$ ($6,4 < r < 7,1$) – для мембраны МГА-95; $0,171 < s < 0,25$ ($12,6 < r < 22$), $0,18 < s < 0,253$ ($12,4 < r < 17,4$), $0,346 < s < 0,487$ ($6,4 < r < 9,1$) – для мембраны ESPA. Используя приближение Гинье [8], по тангенсу угла наклона прямых, соответствующих данным интервалам s , определяли средние радиусы инерции R_g рассеивающих элементов из отношения: $R_g = 1,73\sqrt{\text{tg}\alpha}$ – для сферы и $R_g = 1,41\sqrt{\text{tg}\alpha}$ – для диска. Резкое возрастание интенсивности рассеяния при $s < 0,141$ нм⁻¹ (см. рис. 3, а, б) указывает на наличие еще более крупных пор $r > 22,4$ нм [6].



a)



б)



в)

Рис. 3. Зависимости интенсивности рассеяния:
 а – $\text{Ln}(I(s)) = f(s^2)$; б – $\text{Ln}(I(s)s) = f(s^2)$; в – $\text{Ln}(I(s)s^2) = f(s^2)$;

■ – МГА-95; ○ – ESPA

**Размеры радиусов пор r, r_1, r_2, r_3
и радиусов инерции R_{g1}, R_{g2}, R_{g3} , нм**

Форма Объект	Сфера				Диск						Цилиндр			
	R_{g1}	r_1	R_{g2}	r_2	R_{g1}	r_1	R_{g2}	r_2	R_{g3}	r_3	R_{g1}	R_{g2}	R_{g3}	r
МГА-95	3	8	14	16	6	21	2	14,4	2	8	3	4,2	6	10
ESPA	3	8	12	15	6	21	3	15,6	2	8	3	3,8	5	9,1

Построенные зависимости $\text{Ln}(I(s)s^2) = f(s^2)$ (см. рис. 3, в) представляют собой несимметричные куполообразные кривые, как минимум с двумя максимумами и одним прямолинейным ниспадающим участком в интервалах, нм^{-1} (нм): $0,224 < s < 0,47$ ($6,7 < r < 14$) – для мембраны МГА-95; $0,265 < s < 0,5$ ($6,3 < r < 11,8$) – для мембраны ESPA. Прямолинейный участок на кривой (см. рис. 3, в) указывает на наличие в мембранах пор цилиндрической (вытянутой) формы.

Расчет их радиусов инерции R_g производился по формуле $R_g = \sqrt{3}/s_m$, полученной из исследования функции $y = s^2 I(s)$ на экстремум, где s_m – вектор рассеяния, при котором наблюдается максимум функции [6, 7]. Анализ формы кривой осуществляли разложением ее на составляющие. В качестве аппроксимирующей функции использовали функцию Гаусса. Установлено, что наилучшим образом кривую рассеяния для мембраны МГА-95 можно описать суперпозицией трех функций Гаусса с максимумами при s_m равном 0,62; 0,4; 0,28 нм^{-1} , а для мембраны ESPA – с максимумами при s_m равном 0,6; 0,45; 0,33 нм^{-1} . Значения радиусов инерции приведены в табл. 1.

Отметим, что проведенная выше интерпретация экспериментов позволяет сделать следующий вывод: поровое пространство мембран образовано однородными порами разных размеров и форм. Однако согласно теории переноса растворов через полупроницаемые мембраны [9], коэффициенты проницаемости зависят не только от размеров пор, но и от морфологии их поверхности, влияющей на силовое поле внутри поры. Поэтому, на втором этапе анализа экспериментальные данные перестраивались в двойном логарифмическом масштабе $\text{Ln}(I(s)) \sim \text{Ln}(s)$ (рис. 4).

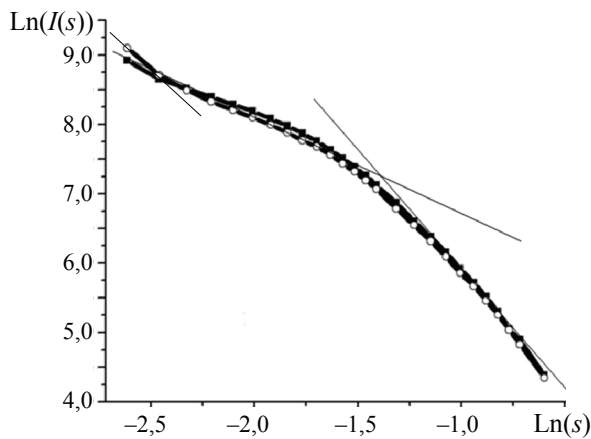


Рис. 4. Зависимость интенсивности рассеяния в двойных логарифмических координатах $\text{Ln}(I(s)) \sim \text{Ln}(s)$:

—■— МГА-95; —○— ESPA

Как видно из рисунка 4, кривые МУРР демонстрируют три ниспадающих линейных участка с различными углами наклона и степенной зависимостью $I(s) = As^{-D}$, что соответствует рассеянию на агрегатах представляющих собой фрактал [10, 11]. Первый – в диапазоне $0,38 < s < 0,5 \text{ нм}^{-1}$ ($6,3 < r < 8,3 \text{ нм}$) с индексом рассеяния $D = -3,9$ для обеих мембран. На втором участке в интервале $0,232 < s < 0,293 \text{ нм}^{-1}$ ($10,7 < r < 13,5 \text{ нм}$) и $0,234 < s < 0,342 \text{ нм}^{-1}$ ($9,2 < r < 13,4 \text{ нм}$) с индексами рассеяния $D = -1,2; -1,3$. На третьем участке $0,171 < s < 0,2204 \text{ нм}^{-1}$ ($14,0 < r < 18,4 \text{ нм}$) и $0,171 < s < 0,2204 \text{ нм}^{-1}$ ($14,0 < r < 18,4 \text{ нм}$) с индексами рассеяния $D = -2,1; -2,8$. Отметим что, при индексе рассеяния $D = -4$ возникает так называемый режим Порода, когда падающий поток рентгеновского излучения начинает взаимодействовать с отдельными частицами агрегата и обычно рассеивается их поверхностью. Поэтому истинную структурную организацию пор мембран, учитывая их полидисперсных характер, можно представить в концепции самоаффинного фрактала, то есть не самоповторяющихся структур. Согласно [10, 11], если фрактальная размерность лежит в интервале $1 < D < 3$, то данное структурное образование классифицируется как пространственный фрактал. В данном случае, вероятнее всего мембраны имеют рассеивающие центры в виде протяженных прямых и извилистых каналов, сформированных из цепочек сфер (пор) – модель «уложенных сфер». Полученные данные показывают, что поровое пространство мембран МГА-95 и ESPA организовано порами фрактальной структуры разных радиусов и геометрических форм, при этом оказалось, что структура может быть описана в концепции самоаффинного фрактала. Поры со средним радиусом $r \sim 20 \text{ нм}$ образуют по модели «уложенных сфер» протяженные извилистые каналы с фрактальной размерностью (по модулю) 2,1; 2,8. Поры среднего радиуса $r \sim 11 \text{ нм}$ образуют прямые каналы с $D = 1,2; 1,3$. Поры с радиусом $r \sim 7 \text{ нм}$ можно отнести к монопорам компактной формы поверхности с индексом $D = 3,9$.

Заключение

1. Выполнены экспериментальные исследования по определению структуры порового пространства мембран МГА-95 и ESPA методом малоуглового рентгеновского рассеяния. Установлены величины численных значений радиусов пор как параметров, формирующих скелет порового пространства обратноосмотических композиционных мембран. В области вектора рентгеновского рассеяния $0,171 < s < 0,538 \text{ нм}^{-1}$ установлено три типа рассеивающих пор (сфера, диск, цилиндр) и определены их радиусы инерции.

2. Выявлена структура порового пространства мембран МГА-95 и ESPA, которая может быть описана концепцией самоаффинного фрактала. В области вектора рассеяния $0,244 < s < 0,342 \text{ нм}^{-1}$ (средние поры с размерами ($19,2 < r < 12,8 \text{ нм}$)) структура пор соответствует модели «уложенных сфер», вытянута в цепочку с фрактальной размерностью $D = 1,2; 1,3$, а крупные поры с размерами $r \sim 21 \text{ нм}$ образуют извилистые протяженные каналы с размерностью $D = 2,1; 2,8$. Рассеяние в области $0,391 < s < 0,538 \text{ нм}^{-1}$ ($r \sim 7,0 \text{ нм}$) происходит на монопорах компактной формы с гладкой поверхностью и фрактальной размерностью $D = 3,9$ (режим Порода).

Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания №2014/219, код проекта 1222.

Список литературы

1. Структура и свойства ацетатцеллюлозных растворов для формирования наноструктурированных фильтрационных мембран / В. М. Седелкин [и др.] // Вестн. Сарат. гос. техн. университета. – 2013. – № 1 (70). – С. 98 – 105.
2. Фенько, Л. А. Кинетические закономерности формирования пористой структуры мембран методом инверсии фаз / Л. А. Фенько, Н. Г. Семенкевич, А. В. Бильдюкевич // Мембраны и мембр. технологии. – 2011. – Т. 1, № 1. – С. 66 – 76.
3. Структура и свойства полупроницаемых мембран на основе модифицированных диацетатов целлюлозы / В. М. Седелкин [и др.] // Мембраны и мембр. технологии. – 2014. – Т. 4, № 2. – С. 114 – 128.
4. Baker, R. W. Membrane Technology and Applications / R. W. Baker. – Chichester : Wiley, 2004. – 552 p.
5. Шиповская, А. Б. Фазовый анализ систем эфир целлюлозы – мезофазогенный растворитель : дис. ... д-ра хим. наук : 02.00.04 / Шиповская Анна Борисовна. – Саратов, 2009. – 458 с.
6. Порай-Кошиц, М. А. Практический курс рентгеноструктурного анализа. В 2 т. Т. 2 / М. А. Порай-Кошиц. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1960. – 532 с.
7. Свергун, Д. И. Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние / Д. И. Свергун. – М. : Наука, 1986. – 279 с.
8. Гинье, А. Рентгенография кристаллов : пер. с фр. / А. Гинье. – М. : Физматгиз, 1961. – 604 с.
9. Свицов, А. А. Введение в мембранную технологию / А. А. Свицов. – М. : Дели принт, 2007. – 208 с.
10. Жюльен, Р. Фрактальные агрегаты / Р. Жюльен // Успехи физ. наук. – 1989. – Т. 157, вып. 2. – Р. 339 – 357.
11. Олемский А. И., Флат А. Я. Использование концепции фрактала в физике конденсированной среды // Успехи физ. наук. – 1993. – Т. 163, вып. 12. – С. 1 – 50.

X-ray Scattering for the Study of Pore Space of MGA-95 and ESPA Composite Membranes

S. I. Lazarev¹, Yu. M. Golovin², D. S. Lazarev¹,
V. G. Kazakov¹, I. V. Khorokhorina¹

*Department of Applied Geometry and Computer Graphics (1),
Department of Physics (2), TSTU; geometry@mail.nnn.tstu.ru*

Keywords: composite membrane; pore space; pore structure; self-affine fractal; small-angle X-ray scattering.

Abstract: The paper describes the results of the experimental study of the structure of the pore space of MGA-95 and ESPA membranes by small-angle X-ray scattering. We found the numerical values of the pore radii as the parameters that form the skeleton of the pore space of reverse osmosis composite membranes. In the region of X-ray scattering vector $0.171 < s < 0.538 \text{ nm}^{-1}$, we found three types of scattering pores (sphere, disc, cylinder) and their average radii of gyration. The pore structure of MGA-95 and ESPA membrane can be described by the concept of self-affine fractal. In the region of X-ray scattering vector $0.245 < r < 0.342 \text{ nm}^{-1}$ (medium-sized pores

$9.2 < r < 12.8$ nm) the pore structure corresponds to the model of “stacked spheres” with long straight channels whose fractal indexes are 1.2 and 1.3, respectively. Pores with radius $r \sim 20$ nm form sinuous channels, whose fractal indices are 2.1 and 2.8, respectively. Scattering in the region $0.391 < s < 0.538$ nm⁻¹ ($5.8 < r < 8.0$ nm) occurs in monopores of compact shape with smooth surface, and a fractal index $D = 3.9$ (Porod’s model $D = 4$).

References

1. Sedelkin V.M., Potekhina L.N., Chirkova O.A., Mashkova D.A., Oleynikova E.V. [Structure and properties of cellulose acetate solutions for moulding nanostructured filtration membranes], *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Saratov State Technical University], 2013, no. 2 (70), pp. 98-105. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Fen'ko L.A., Semenkevich N.G., Bil'dyukevich A.V. [Kinetic laws of formation of the porous structure of membranes by phase inversion], *Membrany i membrannye tekhnologii* [Membranes and membrane technology], 2011, vol. 1, no. 1, pp. 66-76. (In Russ.)
3. Sedelkin V.M., Potekhina L.N., Chirkova O.A., Mashkova D.A., Oleynikova E.V. Structure and properties of semipermeable membranes based on modified cellulose diacetates, *Petroleum Chemistry*, 2014, vol. 54, no. 7, pp. 526-538.
4. Baker R.W. *Membrane Technology and Applications*, Chichester: Wiley, 2004. 552 p.
5. Shipovskaya A.B. *PhD Dissertation (Engineering)*, Saratov, 2009, 41 p. (In Russ.)
6. Porai-Koshits M. A. *Prakticheskii kurs rentgenostrukturnogo analiza* [A Practical Course of X-ray Structural Analysis], vol. 2 of 2, Moscow: Moscow University Press, 1960, 532 p. (In Russ.)
7. Svergun D.I. *Rentgenovskoe i neitronnoe malouglovoe rasseyanie* [X-ray and neutron small-angle scattering], Moscow: Nauka, 1986, 279 p.
8. Guinier A. *X-Ray Crystallographic Technology*, London: Hilger and Watts, 1952.
9. Svitsov A.A. *Vvedenie v membrannuyu tekhnologiyu* [Introduction to membrane technology], Moscow: Deli print, 2007, 208 p. (In Russ.)
10. Jullien R. Fractal Aggregates, *Comments on condensed matter physics*, 1987, vol. 13, no. 4, pp. 177-205.
11. Olemskoi A.I., Flat A.Ya. Application of fractals in condensed-matter physics, *Phys. Usp.*, 1993, vol. 36, issue 12, pp. 1087-1128.

Untersuchungen des Porenraumes der Kompositionsmembranen MGA-95 und ESPA von der Methode des Röntgenzerstreuung

Zusammenfassung: Es sind die experimentalen Forschungen der Struktur des Porenraumes der Membranen MGA-95 und ESPA von der Methode des Kleinwinkelröntgenzerstreuung durchgeführt. Es sind die Größen der numerischen Bedeutungen der Radien der Poren als die Parameter, die das Skelett des Porenraumes der rückosmotischen Kompositionsmembranen bilden, bestimmt. Auf dem Gebiet des Vektors des Röntgenzerstreuung $0,171 < s < 0,538$ nm⁻¹ sind drei Typen der

Zerstreusporen (die Sphäre, die Scheibe, der Zylinder) aufgestellt und es sind ihre mittleren Radien der Trägheit bestimmt. Es ist die Struktur der Poren der Membranen MGA-95 und ESPA, die von der Konzeption des Selbstaffinfraktals beschrieben werden kann, gezeigt. Auf dem Gebiet des Zerstreungsvektors $0,245 < s < 0,342 \text{ nm}^{-1}$ (die Mittelporen mit den Größen $9,2 < r < 12,8 \text{ nm}$) entspricht die Struktur der Poren der Modelle "der gelegten Sphären" mit den ausdehnenden geraden Kanälen mit den Fraktalindexen 1,2 und 1,3. Die Poren $r \sim 20 \text{ nm}$ bilden die gewundenen Kanäle, deren Fraktalindexe 2,1 und 2,8 dementsprechend gleich sind. Das Zerstreuen auf dem Gebiet $0,391 < s < 0,538 \text{ nm}^{-1}$ ($5,8 < r < 8,0 \text{ nm}$) geschieht auf den Monoporen der Kompaktforme mit der Glattoberfläche und mit dem Fraktalindex $D = 3,9$ (die Regime die Art $D = 4$).

Étude de l'espace des pores des membranes de composition MGA-95 et ESPA par la méthode de rayons X de dispersion

Résumé: Sont exécutées des études expérimentales de la structure de l'espace des pores des membranes MGA-95 et ESPA par méthode de diffusion des rayons X de petit angle. Sont établies les valeurs numériques, les valeurs des rayons des pores comme paramètres qui forment le squelette de l'espace des pores des membranes de composition à osmose inverse. Dans le domaine du vecteur de la diffusion des rayons X $0,171 < s < 0,538 \text{ nm}^{-1}$ sont établis trois types des pores de dispersion (sphère, disque, cylindre) et sont déterminés leurs rayons moyens d'inertie. Est déduite la structure des pores des membranes MGA-95 et de l'ESPA, qui peut être décrite par la conception de la fractale self-affine.

Авторы: *Лазарев Сергей Иванович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Прикладная геометрия и компьютерная графика»; *Головин Юрий Михайлович* – кандидат химических наук, доцент кафедры «Физика»; *Лазарев Дмитрий Сергеевич* – студент; *Казаков Вадим Геннадьевич* – аспирант кафедры «Прикладная геометрия и компьютерная графика»; *Хорохорина Ирина Владимировна* – кандидат технических наук, лаборант кафедры «Прикладная геометрия и компьютерная графика», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Кузнецов Михаил Александрович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная геометрия и компьютерная графика», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
