

СВОЙСТВА ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН НА ОСНОВЕ ПОЛИЭТИЛЕННАФТАЛАТА

*С.Н. Акименко¹, Т.И. Мамонова¹, О.Л. Орелович¹, Я. Маекава²,
М. Йошида², П.Ю. Апель¹*

¹Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н. Флерова, Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская обл., Россия

²Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment, JAERI, Gunma, Japan

Представлены результаты исследования основных характеристик трековых мембран, изготовленных на основе полиэтиленнафталата – сложного полиэфира диметилнафталата и этиленгликоля. Полиэтиленнафталат обладает рядом свойств, обуславливающих перспективность его использования в качестве материала для трековых мембран (механическая прочность, высокие тепловые характеристики, химическая стойкость). Определены следующие характеристики полиэтиленнафталатных трековых мембран: производительность по воде и воздуху, прочность, смачиваемость, содержание экстрагируемых веществ. Структура поверхности и пор исследована при помощи сканирующей электронной микроскопии. Установлено, что форма пор в полиэтиленнафталатных трековых мембранах близка к цилиндрической. Проницаемость по воздуху и воде хорошо описывается известными законами. Прочностные характеристики полиэтиленнафталатных трековых мембран близки к таковым для полиэтилентерефталатных трековых мембран. Полиэтиленнафталатные трековые мембраны можно отнести к умеренно-гидрофильным. При экстракции кипящей водой полиэтиленнафталатные мембраны выделяют на порядок меньше веществ, чем полиэтилентерефталатные мембраны. Установлены температуры фазовых переходов (температура стеклования, кристаллизации и плавления) исходного и облученного ускоренными ионами полиэтиленнафталата.

Ключевые слова: полиэтиленнафталат, трековые мембраны.

Basic characteristics of track membranes made of polyethylene naphthalate (which is a polyester synthesized from dimethyl naphthalate and ethylene glycol) are studied and presented. Polyethylene naphthalate possesses some properties (mechanical strength, thermal and chemical stability), which make this polymer a promising material for the production of track membranes. Water flow rate and air flow rate characteristics, burst strength, wettability, and amount of extractables are determined. Surface structure and pore structure are examined using scanning electron microscopy. It is found that the pores in the membranes are cylindrical in shape. The measured water and air flow rates follow known theoretical relations for the transport in narrow capillaries. The burst strength of polyethylene naphthalate membranes is found to be similar to that of polyethylene terephthalate track membranes. Polyethylene naphthalate track membranes can be categorized as moderately hydrophilic. Being treated with boiling water, polyethylene naphthalate membranes release a small amount of extractables (2–4 mg/m²) which is approximately one order of magnitude lower than that for polyethylene terephthalate membranes. Phase transitions temperatures (glass transition, crystallization and melting) are determined for pristine and ion-irradiated polyethylene naphthalate.

Keywords: polyethylene naphthalate, track membranes.

Введение

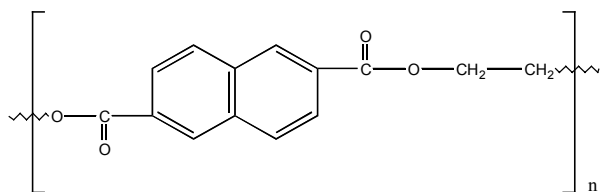
Пленки на основе сложных полиэфиров хорошо зарекомендовали себя как материалы для трековых мембран. Они обладают высокой прочностью, химической стойкостью, стабильностью механических свойств в широком диапазоне температур [1].

Трековые мембраны (ТМ) на основе поликарбонатных (ПК) и полиэтилентерефталатных

(ПЭТФ) пленок широко известны и хорошо изучены на сегодняшний день.

В настоящее время стали доступны пленки на основе полиэтиленнафталата (ПЭНФ) [2, 3]. ПЭНФ представляет собой сложный полиэфир, получаемый двухступенчатой поликонденсацией нафталин-2,6-дикарбоновой кислоты или ее эфира с этиленгликолем в присутствии в качестве катализаторов ацетатов различных металлов, тетраалкилоксититана или оксида сурьмы [4, 5].

Структурная формула полимера имеет следующий вид [6]:



Жесткость цепной молекулы ПЭНФ, определяемая жесткостью остатка нафталиндикарбоновой кислоты и не компенсируемая для этого полимера гибкостью соседних коротких алифатических частей молекулы $\sim\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}\sim$, обуславливает высокую механическую и термическую прочность, тепло- и морозостойкость, а также химическую устойчивость пленок на основе ПЭНФ.

ПЭНФ пленки сохраняют свою работоспособность при температурах от -60 до 210°C продолжительное время (ПЭТФ пленки от -60 до 150°C [7]) [8].

ПЭНФ по ряду характеристик превосходит ПЭТФ, некоторые из них приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что ПЭНФ можно рассматривать как перспективный материал для изготовления ТМ.

Целью данной работы является исследование основных характеристик и структуры ПЭНФ ТМ, а также сравнение полученных данных с характеристиками ПЭТФ ТМ.

Таблица 1. Свойства ПЭНФ и ПЭТФ [3, 6, 9]

Свойства	ПЭНФ	ПЭТФ
Температура стеклования, $^\circ\text{C}$	120	70
Температура плавления, $^\circ\text{C}$	273	264
Теплостойкость, $^\circ\text{C}$	180	130
Плотность		
• Кристаллической фазы, $\text{г}/\text{см}^2$	1,407	1,445
• Аморфной фазы, $\text{г}/\text{см}^2$	1,325	1,331
Кристалличность, %	40–60	40–60
Прочность на разрыв, $\text{кг}/\text{мм}^2$	30	26–28
Удлинение при разрыве, %	80–90	130–140
Модуль упругости, МПа	5000	4000
Усадочная деформация (190° , 5мин), %	$< 0,8$	> 2
Паропроницаемость за 24 ч, $\text{г}/\text{м}^2$	3,6	20
Атмосферостойкость, ч	1500	500

Основные характеристики, определенные для ПЭНФ ТМ:

- степень гидрофильности,
- структура пор и поверхности,
- газо- и водопроницаемость,
- количество экстрагируемых веществ,
- прочность.

В работе также были определены температуры фазовых переходов (температура стеклования, кристаллизации и плавления) исходного и облученного ускоренными ионами ПЭНФ.

Методика эксперимента

Трековые мембраны были изготовлены на основе ПЭНФ пленки *TeonexTM* фирмы *Teijing Ltd* толщиной 12 мкм. В некоторых экспериментах использовали ПЭНФ пленку *KaladexTM* фирмы *Du Pont*. Пленки облучали ускоренными ионами криптона с энергией 250 МэВ на циклотроне У-400 Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований. Варьируя флюенс ионов при облучении и продолжительность последующей химической обработки, получили набор мембран с различными значениями плотности и диаметров пор. При этом плотность пор изменялась таким образом, чтобы пористость была примерно одинаковой (5–8%). При таком уровне пористости образцы мембран являются достаточно прочными и практически не содержат кратные (перекрывающиеся) поры.

Степень гидрофильности пленок и мембран определяли путем измерения краевого угла смачивания: каплю свежеперегнанной дистиллированной воды наносили на исследуемую поверхность с некоторой высоты от пленки (мембраны) таким образом, чтобы в момент отрыва капли от иглы шприца она не касалась образца. По форме капли определяли величину угла смачивания.

Размер и поверхностную плотность пор определяли, фо-

тографируя образцы под сканирующим электронным микроскопом JSM-840 (JEOL).

Производительность мембран по воздуху определяли при перепаде давления 0,01 МПа, пропуская газ через мембрану площадью 1 см². По величине газопроницаемости рассчитывали эффективный диаметр пор, пользуясь алгоритмом, предложенным в [10].

Производительность мембран по воде определяли при перепаде давления 0,1 МПа, пропуская предварительно очищенную фильтрацией через ТМ с диаметром пор 0,1 мкм свежеперегнанную дистиллированную воду, на образцах площадью 17,35 см² и 2,54 см².

Количество экстрагируемых веществ определяли следующим образом. В дистиллированной воде кипятили образцы ПЭНФ ТМ в течение 1 часа. Полученные растворы анализировали на спектрофотометре Spesord M-40. Работали в ультрафиолетовой области спектра ($\lambda = 220\text{--}330$ нм). В результате были получены спектры веществ, выделившихся при экстракции из мембран с различной плотностью пор. При расчетах количества выделившихся веществ использовали установленный в ходе эксперимента молярный коэффициент поглощения нафталата натрия, который составил $\varepsilon = 0,61 \times 10^5$ л/(моль×см) при $\lambda = 242$ нм.

Прочностные свойства ПЭНФ ТМ определяли, измеряя перепад давления, при котором образец, помещенный в держатель с круглым отверстием площадью 1 см², разрушается.

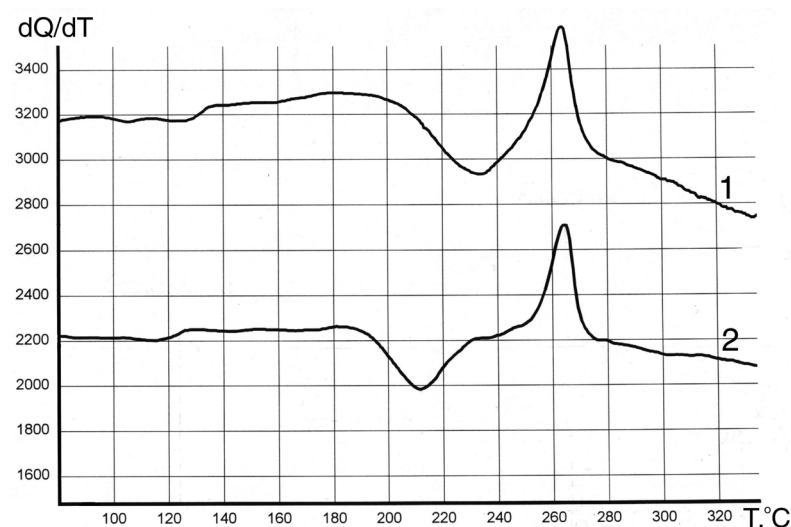


Рис. 1. Термограмма ДСК: 1 – облученная ПЭНФ пленка, 2 – необлученная ПЭНФ пленка (скорость нагрева 16 град/мин)

Для определения температур фазовых переходов ПЭНФ образцы пленок Teonex™ (исходной и облученной ускоренными ионами) исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) [11]. Исследование проводили с помощью дифференциального сканирующего калориметра ДСК-Д. Образцы нагревали от 20 до 400°C. Процедуру повторяли несколько раз.

Результаты и их обсуждение

1. Температуры фазовых переходов исходного и облученного ПЭНФ

На рис. 1 приведена термограмма ДСК для исходного (необлученного) и облученного ионами Kr образцов ПЭНФ пленки Teonex™.

По термограмме ДСК (рис. 1) установлены температуры фазовых переходов (табл. 2). Увеличение температур стеклования и кристаллизации облученного образца ПЭНФ пленки позволяет сделать вывод, что облучение влечет за собой изменение в структуре полимера. Эти изменения могут быть связаны с частичным сшиванием молекул полимера в местах образования треков. Как показали исследования, приведенные в [9], ПЭНФ является сшивающимся полимером.

2. Степень гидрофильности ПЭНФ пленок и ТМ

Исследуемыми образцами служили:

- 1) необлученные пленки различной толщины,
- 2) облученные пленки с различной плотностью треков,
- 3) образцы мембран.

Результаты эксперимента на необлученных пленках различной толщины сведены в табл. 3.

Как видно из табл. 3, необлученные ПЭНФ пленки являются умеренно-гидрофильными (относительно смачиваемыми), величина краевого угла $\Theta < 90^\circ$. Тонкие ПЭНФ пленки являются менее гидрофильными, чем толстые.

Измерение краевого угла смачивания на облученных ПЭНФ пленках Teonex™ с раз-

Таблица 2. Температуры фазовых переходов ПЭНФ

№	Параметры	ПЭНФ	
		необлученный	облученный
1	Температура стеклования, °С	125	130
2	Температура кристаллизации, °С	215	235
3	Температура плавления, °С	265	265

Таблица 3. Краевой угол смачивания необлученных ПЭНФ пленок различной толщины

№	Название пленки	Толщина пленки, мкм	Краевой угол смачивания Θ , °
1	<i>Teonex™</i>	6	78±2,0
2	<i>Teonex™</i>	25	75±2,0
3	<i>Kaladex™</i>	25	75±1,0
4	<i>Kaladex™</i>	75	66±1,0

Таблица 4. Краевой угол смачивания на облученных ПЭНФ пленках с различной плотностью треков

№	Плотность треков, см ⁻²	Краевой угол смачивания Θ , °	
		сторона <i>a</i>	сторона <i>b</i>
1	Контрольный образец	74,8±0,5	74,3±0,9
2	1,5×10 ⁶	72,0±0,6	70,9±1,0
3	7,9×10 ⁶	72,8±0,5	72,4±1,1
4	6,3×10 ⁷	71,5±0,8	71,9±0,8
5	1,7×10 ⁸	71,3±0,7	68,8±0,7
6	6,1×10 ⁸	73,1±1,0	70,9±0,6

личным флюенсом проводили с двух сторон: *a* – внешняя сторона, *b* – внутренняя сторона пленки в исходном рулоне. В качестве образца сравнения (контрольный образец) брали исходную необлученную ПЭНФ пленку.

Результаты эксперимента сведены в табл. 4.

По экспериментальным данным (табл. 4) видно, что облучение пленок влечет за собой небольшое снижение краевого угла смачивания: с 74° (необлученный образец) до 69–73° (облученные образцы). Облучение ускоренными ионами приводит к повышению гидрофильности ПЭНФ, вероятно, за счет пострадиационного окисления полимера и появления на поверхности полярных групп. Достоверной зависимости краевого угла смачивания от плотности треков

не установлено. Различие краевого угла смачивания по сторонам незначительно.

Полученные данные позволяют сделать вывод, что облучение способствует увеличению смачиваемости ПЭНФ пленок.

В ходе эксперимента установили краевой угол смачивания необлученной ПЭТФ пленки толщиной 12 мкм, который составил 73°. ПЭНФ пленки являются менее смачиваемыми, чем ПЭТФ (табл. 3, 4).

При нанесении на поверхность ПЭНФ ТМ капли дистиллированной воды краевой угол составил 62° – эта величина ниже, чем для облученной ПЭНФ пленки ($\Theta = 69–73^\circ$). Снижение величины краевого угла смачивания после щелочного травления

ПЭНФ пленки связано с гидрофилизацией поверхности мембраны. При травлении пленки в полимере происходит разрыв сложноэфирных связей и образование карбоксилатных группировок (~COONa), обуславливающих увеличение смачиваемости ПЭНФ ТМ по сравнению с нетравленными пленками.

3. Структура пор и поверхности ПЭНФ ТМ

Метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) позволяет установить структуру пор, поверхностную плотность пор и оценить качество поверхности ТМ. СЭМ изображения ПЭНФ ТМ с различными плотностью и диаметрами пор приведены на рис. 2.

На рис. 2 видно, что поры на поверхности ПЭНФ ТМ имеют круглую форму, близкую к

правильной окружности. По приведенным изображениям (рис. 2) определяли диаметр пор на поверхности ПЭНФ ТМ и плотность пор. Полученные данные сведены в табл. 5, откуда видно, что размер пор варьируется в зависимости от плотности пор.

ПЭНФ ТМ имеют шероховатую поверхность. Это свидетельствует о том, что исходная ПЭНФ пленка содержит мелкодисперсный наполнитель, который в процессе изготовления мембран вымывается (вытравливается). Наиболее наглядным является изображение мембраны с $n = 1,5 \times 10^6 \text{ см}^{-2}$ и $d = 1,94 \text{ мкм}$ (рис. 2, изображение 5). Мембрана подвергалась длительному

травлению, поэтому на поверхности отчетливо видны следы удаленных частиц наполнителя. Количество содержащегося наполнителя невелико, так как на поверхности мембраны (рис. 2, изображение 5) подобных впадин немного.

4. Производительность мембран по воздуху и по воде

4.1. Производительность ПЭНФ ТМ по воздуху

Газопроницаемость ПЭНФ ТМ определяли на образцах с различными диаметрами и плотностью пор. Полученные данные приведены в табл. 5.

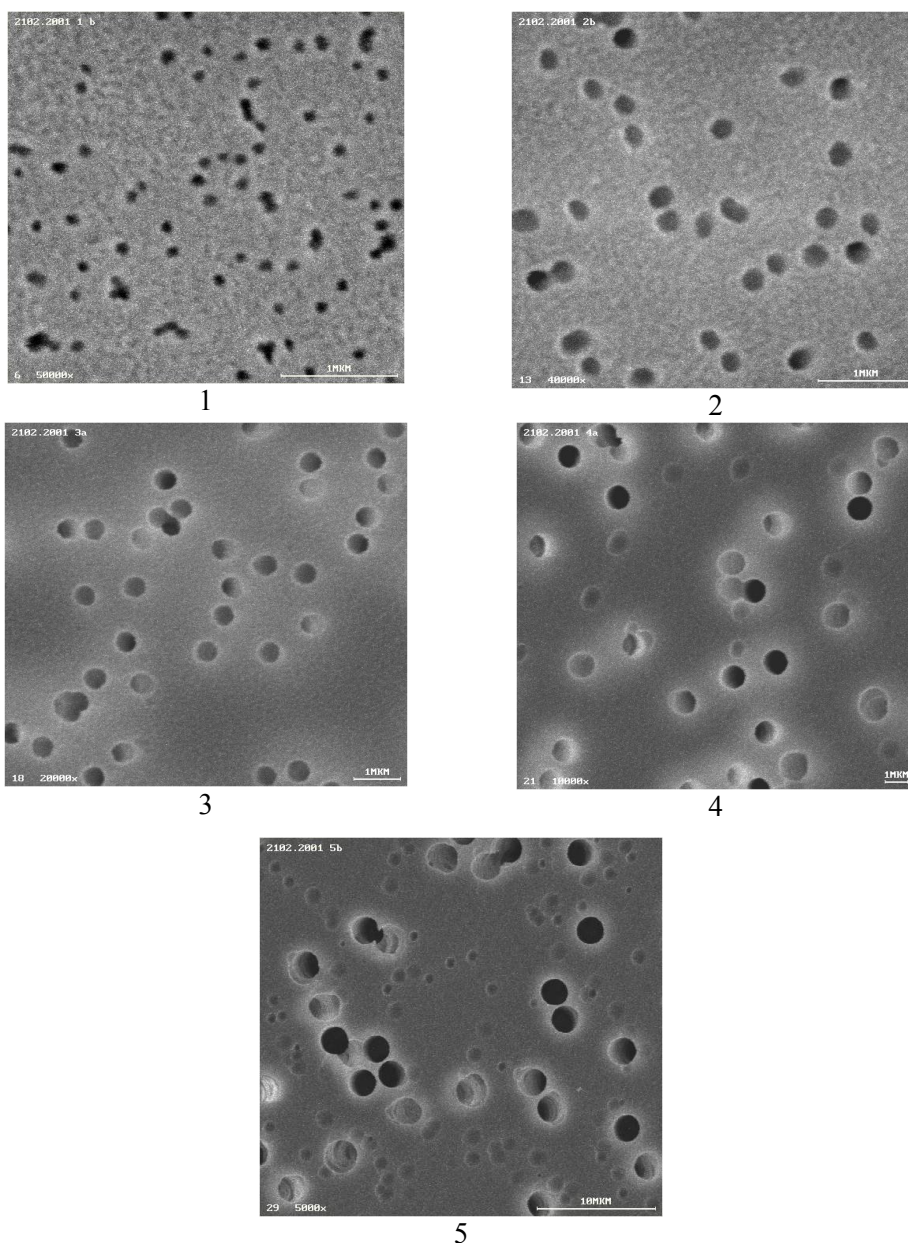


Рис. 2. СЭМ фотографии ПЭНФ ТМ: номера образцов соответствуют приведенным в табл. 5

Таблица 5. Характеристики ПЭНФ ТМ

№	Плотность пор, см ⁻²	Пористость, %	Диаметр пор по СЭМ, мкм	Эффективный диаметр пор, мкм	Производительность по воздуху, мл/мин	Производительность по воде, мл/мин	Количество экстрагируемых веществ, мг/м ²
1	6,1×10 ⁸	5,2	0,090±0,003*	0,103±0,001	2,6	0,7	4,1
2	1,7×10 ⁸	5,3	0,17±0,01	0,199±0,004	6,1	2,9	3,6
3	6,3×10 ⁷	7,9	0,40±0,01	0,42±0,01	31,4	11,2	3,1
4	7,9×10 ⁶	6,2	0,90±0,04	1,02±0,01	85,2	55,8	2,3
5	1,5×10 ⁶	4,7	1,94±0,08	2,28±0,07	364	76,3	2,2

* Величина ошибки показывает доверительные границы возможных отклонений от среднего и соответствует значению ±1,96σ (где σ – среднее квадратичное отклонение) при доверительной вероятности 0,95.

Эффективные диаметры пор, определенные по газопроницаемости, имеют незначительное отклонение от величины диаметра пор по СЭМ. Это может быть связано с возможными неучтенными систематическими погрешностями. Соответствие в размерах пор, установленных разными способами, указывает, что поры в полиэтиленнафталатных трековых мембранах имеют цилиндрическую форму.

4.2. Производительность мембран по воде

Полученные данные по водопроницаемости ПЭНФ ТМ приведены в табл. 5. С целью более подробного исследования транспортных характеристик ПЭНФ ТМ была изготовлена серия образцов с увеличивающимся диаметром пор в пределах одной плотности пор. Для этого брали ТМ с наибольшими плотностями пор 6,1×10⁸

см⁻² и 1,7×10⁸ см⁻². Размер пор изменяли путем увеличения времени травления. При этом пористость варьировалась в пределах 3–21% при плотности пор 6,1×10⁸ см⁻² и в пределах 7–32% при плотности пор 1,7×10⁸ см⁻².

В результате была построена зависимость водопроницаемости от эффективного диаметра пор при фиксированной плотности пор, приведенная на рис. 3.

Ламинарное течение жидкости через мембрану с цилиндрическими порами описывается уравнением Хагена-Пуазейля [12]:

$$Q = \frac{\pi \cdot d^4 \cdot n \cdot S \cdot \Delta P}{8 \cdot \mu \cdot L}$$

где d – диаметр пор; n – плотность пор; S – площадь мембраны; ΔP – перепад давления на мембране; μ – вязкость жидкости; L – толщина мембраны.

Набор экспериментальных точек аппроксимировался степенной функцией вида Q = a·d^b. Значения параметров a и b, при которых функция наилучшим образом описывает экспериментальную зависимость, таковы: при n = 6,1×10⁸ см⁻² a = 3589, b = 3,9; при n = 1,7×10⁸ см⁻² a = 1213, b = 3,88. Полученные значения параметра b близки к 4 – это говорит о том, что течение воды через ПЭНФ мембраны приближается к закону Хагена-Пуазейля и поры имеют цилиндрическую форму.

Таким образом, течение жидкости через ПЭНФ ТМ хорошо описывается известными закономерностями.

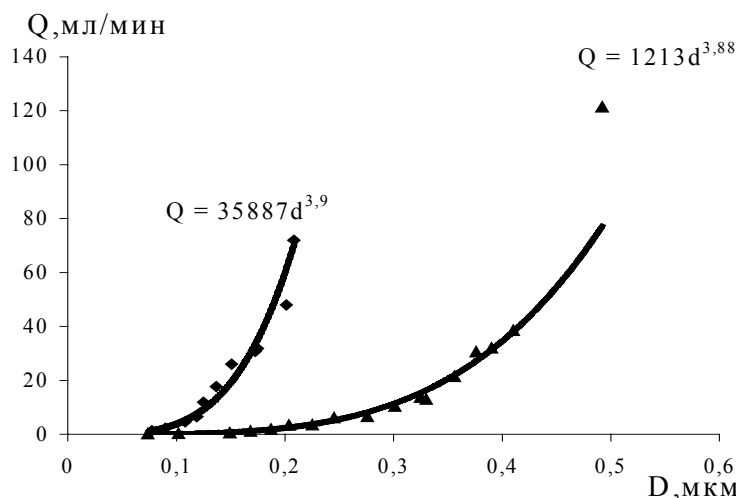


Рис. 3. Зависимость водопроницаемости ПЭНФ ТМ от эффективного диаметра пор: 1 – n = 6,1×10⁸ см⁻² (кривая увеличена в 10 раз), 2 – n = 1,7×10⁸ см⁻²

5. Количество экстрагируемых кипящей водой веществ

При экстракции водой из ПЭНФ ТМ выделяются соединения нафталинового ряда. Полученные спектры (рис. 4) характерны для соединений 2,6-нафталево́й кислоты (2,6-нафтала́та натрия, диэфиров 2,6-нафталево́й кислоты и т. д.) [13].

При увеличении плотности пор в ПЭНФ ТМ количество веществ, выделяющихся из мембраны, увеличивается. Это связано с тем, что ТМ с наибольшей плотностью пор имеет большую площадь (фронтальную и поверхностную), доступную для экстракции. Максимум

поглощения на приведенных спектрах наблюдается при $\lambda = 242$ нм.

По величине поглощения на приведенных спектрах (рис. 4) рассчитали количество веществ, экстрагируемых из ПЭНФ ТМ в пересчете на нафтала́т натрия (табл. 5).

Параллельно было определено количество веществ, экстрагируемых водой из ПЭТФ ТМ при тех же условиях. Как показал эксперимент, при экстракции водой ($T = 100^\circ\text{C}$) из ПЭНФ ТМ выделяется $2\text{--}4$ мг/м² – это значительно меньше, чем из ПЭТФ ТМ (толщиной 10 мкм), которые в аналогичных условиях выделяют $15\text{--}20$ мг/м² веществ (в пересчете на терефта́лат натрия).

Одной из возможных причин уменьшения количества веществ, экстрагируемых водой из ПЭНФ ТМ, по сравнению с ПЭТФ ТМ, может быть различие в температурах стеклования обоих полимеров ($T_c^{\text{ПЭНФ}} = 120^\circ\text{C}$, $T_c^{\text{ПЭТФ}} = 70^\circ\text{C}$). Большая часть ПЭТФ ТМ при экстракции кипящей водой находилась в высокоэластичном состоянии, а ПЭНФ ТМ при экстракции не изменила своей фазовой структуры, поэтому количество экстрагируемых веществ отличается.

Представляет интерес дальнейшее исследование процесса экстракции ПЭНФ ТМ при более высоких температурах, превышающих температуру стеклования ПЭНФ, с использованием в качестве растворителей диоксана, диметилформаида и галогенпроизводных углеводородов.

6. Прочностные свойства ПЭНФ ТМ

Для установления прочностных характеристик ПЭНФ ТМ были изготовлены две серии образцов с фиксированными плотностями пор – $6,1 \times 10^8$ см⁻² и $1,7 \times 10^8$ см⁻².

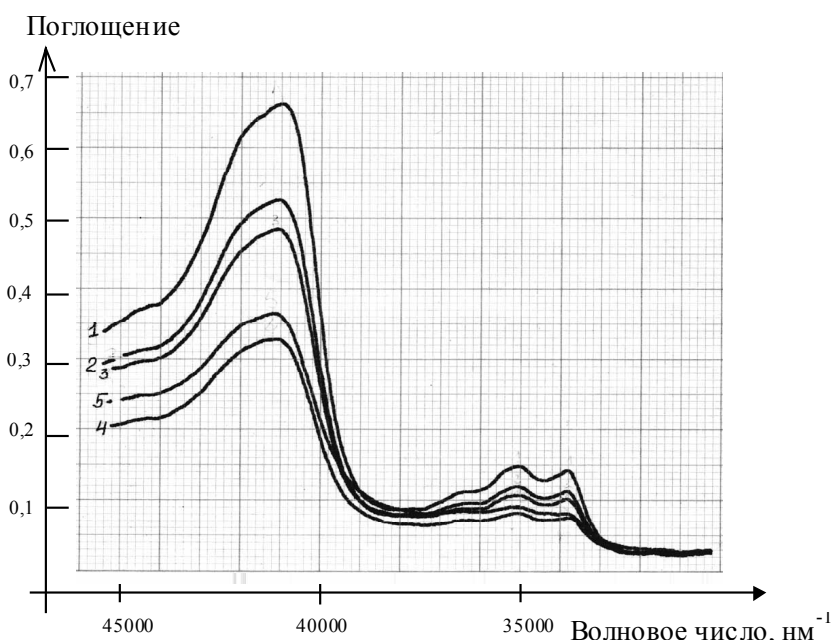


Рис. 4. Спектры водных экстрактов ПЭНФ ТМ: кривые 1–5 соответствуют образцам 1–5 в табл. 5

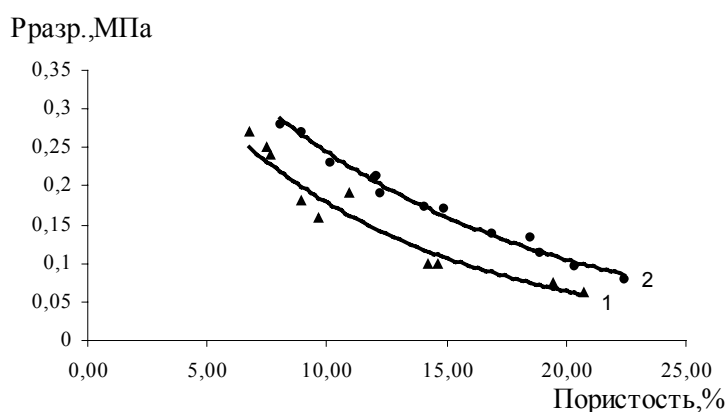


Рис. 5. Зависимости давления разрушения от пористости ПЭНФ ТМ: 1 – $n = 6,1 \times 10^8$ см⁻², 2 – $n = 1,7 \times 10^8$ см⁻²

Внутри каждой серии диаметр пор и, соответственно, пористость изменялись таким образом, чтобы их влияние на прочность могло быть прослежено достаточно достоверно. В результате был получен ряд точек, которые аппроксимировались экспоненциальной функцией $y = e^x$. Зависимости давления разрушения ПЭНФ ТМ от пористости приведены на рис. 5.

Увеличение пористости ПЭНФ ТМ приводит к уменьшению прочности на разрыв. ТМ становятся более хрупкими и менее прочными в связи с увеличивающимся диаметром пор и образованием перекрывающихся пор в пределах данных плотностей пор.

При наиболее часто используемой пористости 15% давление разрушения ПЭНФ ТМ с плотностью пор $6,1 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$ соответствует 0,12 МПа, а при $1,7 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$ – 0,17 МПа. Давление разрушения ПЭТФ ТМ (плотность пор $\sim 10^8 \text{ см}^{-2}$) при пористости 15% составляет 0,17 МПа [14]. Следовательно, ПЭНФ ТМ по прочности на разрыв не уступают ПЭТФ ТМ.

Выводы

Впервые получены и подробно исследованы в широком интервале диаметров пор трековые мембраны на основе полиэтиленнафталата. Исследованы основные характеристики полиэтиленнафталатных мембран: степень гидрофильности, структура пор и поверхности, производительность по воздуху и по воде, количество экстрагируемых веществ, прочность на разрыв.

- Полиэтиленнафталатные мембраны можно отнести к умеренно-гидрофильным. Угол смачивания водой найден равным $69\text{--}73^\circ$ и 62° , соответственно, для облученной и протравленной поверхности полиэтиленнафталата.

- Исследование производительности полиэтиленнафталатных трековых мембран по воздуху и воде в совокупности с данными СЭМ подтвердило, что структура мембран близка к идеальной, то есть состоящей из массива цилиндрических пор. Транспортные характеристики ПЭНФ ТМ хорошо описываются известными законами.

- При экстракции кипящей водой полиэтиленнафталатные трековые мембраны выделяют на порядок меньше веществ, чем традиционные полиэтилентерефталатные мембраны.

- Прочностные свойства трековых мембран на основе полиэтиленнафталата не хуже прочностных свойств широко используемых полиэтилентерефталатных трековых мембран.

По результатам данной работы можно сделать вывод, что полиэтиленнафталатные трековые мембраны по некоторым показателям не уступают традиционным полиэтилентерефталатным трековым мембранам, а по ряду превосходят ПЭТФ ТМ.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ИСПМ им. Н.С. Ениколопова РАН доктору Кузнецову А.А., аспирантам Бойко В.В. и Бузину П.В. за предоставленные данные по ДСК ПЭНФ пленок.

Литература

1. Николаев А.Ф. Синтетические полимеры и пластические массы на их основе. Л.: Химия. 1966, 768 с.
2. Kotaki Y., Tsujimura S. // J. Appl. Phys. 1976. No 47, p. 1355–1358.
3. Robertson F. // Eureka transfers technology. 1995, p. 61–62.
4. Wang C.S., Sun J.M. // Polym. Prepr. / Amer. Chem. Soc. 1994. V. 35, No 2, p. 723.
5. Cho B.H., Kim Y.W. Process for preparing PEN. Pat. 5294695 USA. SKC Ltd. No 31626.
6. Starosta W., Wawszczak D., Sartowska B., Buczkowski M. // Radiat. Meas. 1999. No 31, p. 149–152.
7. Энциклопедия полимеров. Т. 3. Ред. коллегия В.А. Кабанов и др. М.: Советская энциклопедия. 1977, стб. 1224.
8. Bhushan B., Ma Tiejun, Higashioji T. // J. Appl. Polym. Sci. 2002. V. 83, p. 2225–2244.
9. Saito T., Seguchi T., Nagano Sh., Omae I. Gamma-Ray Irradiation Effects of Poly(ethylene-2,6-naphthalate) and Poly(ethylene-terephthalate). Report JAERI-M 89-096, Japan.
10. Кузнецов В.И., Овчинников В.В., Селезнев В.Д., Акиншин В.Д. Определение радиуса пор мембран сетчатого типа газодинамическим способом. Сообщ. ОИЯИ 18-83-758, Дубна.
11. Мулдер М. Введение в мембранную технологию. М.: Мир. 1999, 513 с.
12. Дубяга В.П., Перепечкин Л.П., Катаевский Е.Е. Полимерные мембраны. М.: Химия. 1981, 232 с.
13. Cheung P.R., Roberts C.W., Wagener K.B. // J. Appl. Polym. Sci. 1979. V. 24, p. 1809–1830.
14. Кравец Л.И., Дмитриев С.Н., Анель П.Ю. Полипропиленовые трековые мембраны для микро- и ультрафильтрации химически агрессивных сред. Сообщ. ОИЯИ P18-2000-114, Дубна.