

УДК 544.421.032.4

*А.А. Машенцева^{1,2}, Д.С. Оразбаева², Е.Г. Горин¹, А.Ю. Антонов², М.В. Здоровец^{1,2}¹Астанинский филиал Института Ядерной Физики НЯЦ РК, Казахстан, Астана²Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Казахстан, Астана

*E-mail: mashentseva.a@gmail.com

Расчет полуэмпирического уравнения объемной скорости травления полимерных трековых мембран в стационарном и динамическом режимах

Одна из наиболее актуальных и остросоциальных проблем экологической безопасности Казахстана – это обеспечение населения всех регионов страны высококачественной питьевой водой. Разработка фильтрационных элементов на основе ядерных трековых мембран может рассматриваться в качестве одного из наиболее приемлемых вариантов решения указанной проблемы. В статье рассчитаны значения объемной скорости травления и энергии активации процесса с учетом влияния температуры, концентрации раствора травления. Изучено влияние фактора интенсивного перемешивания. В результате проведенных экспериментальных и теоретических исследований получено полуэмпирическое уравнение объемной скорости травления $V_B = 3,4 \cdot 10^{12} \cdot C^{2,07} \cdot \exp(-0,825/kT)$ для ПЭТФ полимерной пленки толщиной 12 мкм, облученной ионами $^{84}\text{Kr}^{15+}$ (энергия 1,75 МэВ/нуклон) на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 Астанинского филиала Института Ядерной Физики НЯЦ РК.

Ключевые слова: травление, ПЭТФ трековые мембраны, объемная скорость травления, температура, стационарный режим, динамический режим, концентрация, полуэмпирическое уравнение.

A.A. Mashentseva, D.S. Orazbayeva, E.G. Gorin, A.Yu. Antonov, M.V. Zdorovets

Calculation of bulk etch rate's semi-empirical equation for polymer track membranes in stationary and dynamic modes

One of the most urgent and extremely social problems in environmental safety area in Kazakhstan is providing the population of all regions of the country with quality drinking water. Development of filter elements based on nuclear track-etch membranes may be considered as one of best solutions this problem. The values of bulk etch rate and activation energy were calculated in view the effect of temperature, alkaline solution concentration as well as stirring effect. The semi-empirical equation of the bulk etch rate for PET track membranes was calculated. As a result of theoretical and experimental studies a semi-empirical equation of the bulk etch rate $V_B = 3,4 \cdot 10^{12} \cdot C^{2,07} \cdot \exp(-0,825/kT)$ for 12 microns PET film, irradiated by ions $^{84}\text{Kr}^{15+}$ (energy of 1.75 MeV/nucleon) at the heavy ion accelerator DC-60 in Astana branch of the INP NNC RK, was obtained.

Keywords: etching, PET track-etch membranes, bulk etch rate, temperature, stationary mode, dynamic mode, concentration, semi-empirical equation.

А.А. Машенцева, Д.С. Оразбаева, Е.Г. Горин, А.Ю. Антонов, М.В. Здоровец

Стационарлық және динамикалық режимде полимерлік тректік мембраналарды өңдеудің көлемдік жылдамдығын жартылай эмпириялық теңдеумен есептеу

Қазақстанның экологиялық қауіпсіздігіндегі ең өзекті әрі өткір мәселелердің бірі – Қазақстанның барлық аймақтарындағы халықтарды сапалы ауыз сумен қамтамасыз ету. Ядролық тректік мембраналар мен фильтрациялауды аталған мәселені шешудің сапалы бір варианттары ретінде қарастыруға болады. Мақалада температураның және химиялық ерітінді концентрациясының көлемдік жылдамдық пен активациялық энергияға әсерін қарастырдық. Экспериментте келтірілген нәтижелер мен теориялық зерттеулер арқылы Ядролық физика институтының Астанадағы филиалындағы ауыр иондарды үдететін ДС-60 үдеткішінде $^{84}\text{Kr}^{15+}$ ионымен (энергиясы 1,75 МэВ/нуклон) атқылған қалыңдығы 12 мкм ПЭТФ полимерлі пленкісінен болған тректік мембрананың көлемдік жылдамдығының келесі түрдегі жартылай эмпириялық теңдеуін алдық: $V_B = 3,4 \cdot 10^{12} \cdot C^{2,07} \cdot \exp(-0,825/kT)$.

Түйін сөздер: өңдеу, ПЭТФ тректік мембраналар, өңдеу көлемдік жылдамдығы, температура, стационарлық режимі, динамикалық режимі, концентрация, жартылай эмпириялық теңдеуі.

Введение

Анализ литературных данных и патентной документации в области очистки воды с применением ядерных трековых мембран (ТМ) указывают на значительный потенциал и неограниченные возможности данной технологии [1-3]. Необходимо отметить, что на данный момент на территории Казахстана нет ни одного предприятия осуществляющего полный производственный цикл производства трековых мембран. Таким образом, в данном секторе наукоемких технологий не существует альтернатив импортозамещению и запросы потребительского рынка Казахстана восполняются продукцией зарубежных компаний. При этом рыночная цена импортируемых фильтров на основе ТМ десятикратно превышает их реальную себестоимость.

Актуальность создания мембранных фильтров с «казахстанским брендом» обусловлена не только экономической привлекательностью и перспективностью потребительской активности, но и, прежде всего, острой необходимостью решения проблемы обеспечения населения Республики Казахстан высококачественной питьевой водой. По данным Министерства здравоохранения Республики Казахстан, современное состояние систем водоотведения обусловили недостаточное санитарно-эпидемиологическое благополучие населения Республики Казахстан. Так, качество воды из открытых водоемов 1-категории, используемых для централизованного водоснабжения населения в целом по республике по санитарно-химическим показателям по сравнению с 2009 годом ухудшилось, из 1989 проб воды, не отвечало нормативам 151 или 7,6%, по микробиологическим показателям – 4,5% [4]. По-прежнему, в Кызылординской области остается высокий уровень загрязненности водоемов - 95,8%, Западно-Казахстанской области - 22,4%, Акмолинской - 16,9%, Южно-Казахстанской - 8,5%. Так, в Акмолинской, Алматинской, Западно-Казахстанской, Костанайской областях обеспеченность городского и сельского населения качественной питьевой водой по данным статистики составляет менее 50% потребности водопотребления. Существует ряд правительственных программ, направленных на решение данной проблемы, которая приобретает нацио-

нальные масштабы. Так, в 2002-2010 гг. выполнялась отраслевая программа по обеспечению населенных пунктов питьевой водой «Питьевые воды». В 2011 г. Министерством экономического развития и торговли РК была разработана отраслевая программа «Ак-Булак» на 2011-2020 гг. по обеспечению населенных пунктов питьевой водой. При этом разработчики государственных программ указывают, что одним из наиболее доступных и действенных методов улучшения качества воды является применение индивидуальных очистителей, мобильных и стационарных фильтров очистки воды [5].

Высокотехнологичные мембранные способы разделения могут рассматриваться логичным решением проблем, возникающих в процессе подготовки питьевой, технической и особо чистой воды. Это обусловлено рядом преимуществ мембранных технологий по сравнению с традиционными системами водоочистки: стабильность качества очистки даже при существенных колебаниях состава исходной воды, компактность оборудования, высокий уровень его автоматизации, низкие эксплуатационные затраты [6]. Мембранная технология позволяет получать питьевую воду не только безопасную в химическом и микробиологическом отношении, но и физиологически полноценную в отношении макро- и микроэлементного состава [7].

Исследование оптимального состава травящего раствора и выбор условий процесса химического травления треков высокоэнергетичных ионов является одной из значимых задач в технологическом процессе создания полимерных трековых мембран (ТМ) [8].

Форма образующейся «трековой» поры определяется в основном двумя величинами – скоростью травления латентного трека частицы V_T и скоростью травления необлученного полимерного материала V_B (рисунок 1а). Для получения высококачественных фильтрационных мембран, имеющих цилиндрические поры с минимальной дисперсией диаметров по величине, необходимо, чтобы скорость V_T была на несколько порядков выше скорости V_B , т.е. чтобы избирательность травления треков (параметр b) представляла собой значительную величину (рисунок 1б), данное условие реализуется подбором соответствующих условий травления - температуры, концентрации химического реагента [9,10].

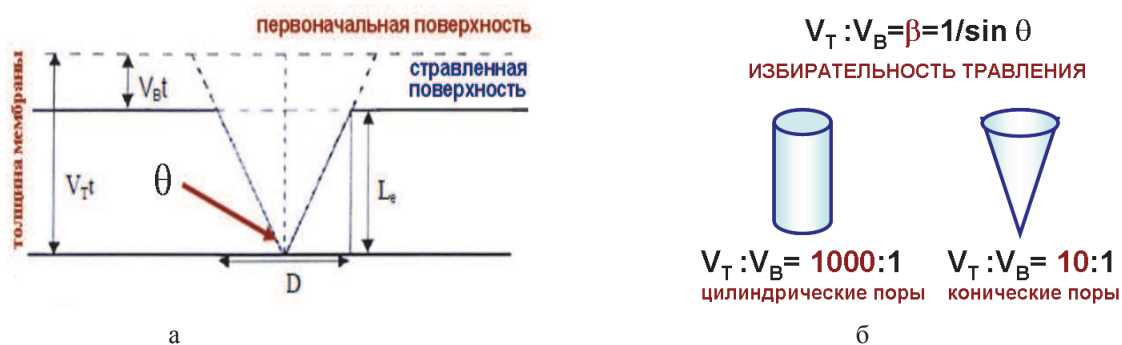


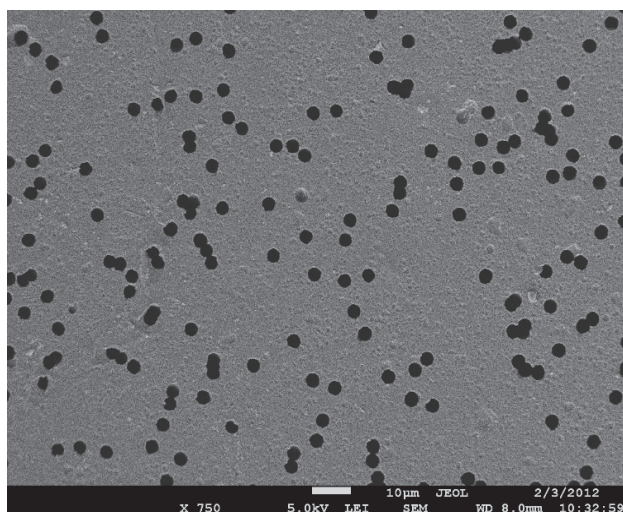
Рисунок 1 – Схема травления (а) и параметры геометрии пор (б) полимерных ТМ

Для определения каждого из указанных выше видов скорости травления в доступной литературе приводится несколько методик. Так, например, для определения V_B используются расчетные методы, основанные на измерении толщины протравленной пленки, изменении диаметра пор или массы образца в процессе травления [11,12]. Скорость V_T определяется как скорость, с которой травится область латентного трека, полученного в результате облучения заряженными частицами. Скорость травления V_T зависит от потерь энергии налетающей частицы, температуры и концентрации травителя.

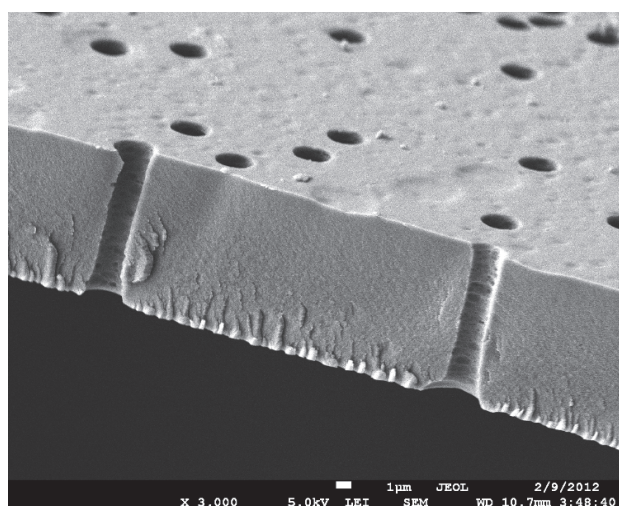
Наиболее расширенно теоретические исследования кинетики травления представлены в монографии Митрофанова А.В. [13]. Автором предлагаются расчетные формулы кинетических

характеристик процесса травления для модельных систем ТМ с учетом как плотности облучения, так и геометрии пор.

В рамках выполнения подпроекта «Создание фильтрационных материалов и металлических наноструктур на основе трековых мембран», в рамках реализации «Проекта Коммерциализации Технологий», поддерживаемого Всемирным Банком и Правительством Республики Казахстан в Астанинском филиале Института Ядерной Физики Национального Ядерного центра РК (АФ ИЯФ НЯЦ РК) проводятся исследования по созданию трековых мембран (рисунок 2) с заданными параметрами геометрии пор, с последующей разработкой инновационных фильтрационных устройств на их основе.



2а



б

Рисунок 2 – Микрофотография поверхности (а) и бокового склона (б) трековой мембраны на основе ПЭТФ

Основной целью исследования являлся расчет полуэмпирического уравнения объемной скорости травления V_B полимерной трековой мембраны на основе полиэтилентерефталата (ПЭТФ) при изменении концентрации раствора травления, температуры, а также с учетом интенсивного перемешивания.

Эксперимент

Объектом исследования служила ПЭТФ пленка марки Hostaphan® RNK-12,0 производства фирмы «Mitsubishi Polyester Film» (Германия). Номинальная толщина пленки составляла 12,03 мкм, плотность материала - 1,4 г/см³, что соответствует 54% кристалличности. Образцы ПЭТФ пленок облучали ионами ⁸⁴Kr¹⁵⁺ (энергия 1,75 МэВ/нуклон) на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 АФ ИЯФ НЯЦ РК. Флюенс ионов соответствовал плотности треков 10⁶ пор/см². После облучения образцы хранились на воздухе при комнатной температуре. Предварительную sensibilization образцов осуществляли в течение 30 минут с каждой стороны в УФ-ртутной лампе ЛЭ-30, имеющей максимум излучения в интервале длин волн 310-320 нм. Травление образцов размером 5×5 см проводили в стационарном и

динамическом (интенсивное перемешивание, 3000 об/сек) режимах, в диапазоне температур 45-75°C в течение 10 мин в растворах гидроксида натрия различной концентрации в 6-ти параллельных экспериментах, при этом стандартное отклонение всех измерений не превышало 10% от среднего.

Результаты и Обсуждение

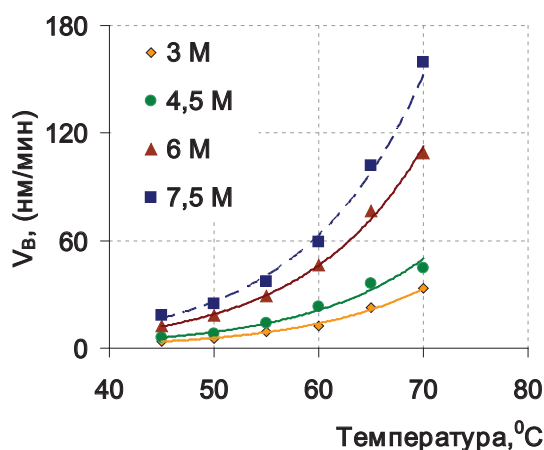
Для расчетов V_B использовали стандартную методику [14] и выражали в единицах нм/мин.

$$V_B = \frac{\Delta m}{2S \cdot \rho \cdot t}$$

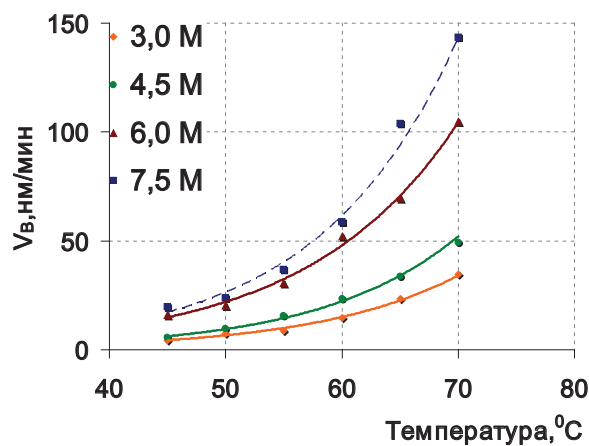
Где Δm – изменение массы образца ПЭТФ до и после травления, S - площадь образца, ρ - плотность полимера и t - время травления (мин).

Зависимость поверхностной скорости травления ТМ от температуры $V_B = f(t)$ для всех рассматриваемых концентраций NaOH (рисунок 3) описывали уравнением Аррениуса (1), из логарифмической формы которого строили график в системе координат $\ln V_B = f(1/T)$.

$$V_B = A \cdot e^{-\frac{E_a}{kT}} \quad (1)$$



а



б

Рисунок 3 – Зависимость объемной скорости травления от температуры для стационарного (а) и динамического (б) режимов

Линейная зависимость ($\ln k - 1/T$) позволяет определить энергию активации E_a по тангенсу наклона прямой и предэкспоненциальный множитель A по отрезку, отсекаемому прямой на оси ординат, когда $1/T=0$. Для стационарного режима было рассчитано значение E_a равное $0,825 \pm 0,015$ эВ, значение множителя A составило $1,33 \cdot 10^{14}$ мин⁻¹. Для режима травления при интенсивном перемешивании значения E_a и A получены $0,773 \pm 0,032$ эВ и $1,44 \cdot 10^{13}$ мин⁻¹ соответственно.

В облуженных тяжелыми ионами полимерах диаметр и длина латентных треков обычно варьируются в диапазоне 10-20 нм и 10-100 мкм соответственно [15]. Высокая вязкость растворов травления препятствует конвективному переносу продуктов гидролиза полимера на первой стадии травления ионного трека. Реакция гидролиза ПЭТФ в водных щелочных растворах протекает на поверхности раздела фаз практически в мономолекулярном слое. Конечными продуктами щелочного водного гидролиза являются соль терефталевой кислоты (ТФК) и этиленгликоль (ЭГ), реакция протекает на поверхности раздела фаз, практически в мономолекулярном слое [16]. Исследование влияния количества ТФК и ЭГ, накапливаемых в результате гидролиза, на скорость травления показало, что увеличение концентрации терефталат-ионов не оказывает заметного влияния на процесс щелочного травления. Несколько иная ситуация наблюдается в случае накопления ЭГ в растворе травления: в результате взаимодействия ЭГ с гидроксид-ионами образуются высокоосновные алколюлят-ионы, под действием которых и происходит расщепление макромолекул ПЭТФ [17].

Интенсивное перемешивание 3М раствора NaOH увеличивает объемную скорость V_B в среднем на 3-11% по сравнению со стационарным режимом травления. При минимальной концентрации щелочи в растворе травления практически все OH^- группы расходятся в реакции образования алколюлят-ионов и скорость травления в данной точке будет максимальной при условии постоянного обмена приповерхностного слоя продуктов гидролиза полимера (создается на

основе ЭГ, как базовой среды и содержит какое-то количество соли ТФК) на усредненный слой реакционной смеси. Под воздействием механического перемешивания он может смазываться, сдвигаться и, в конечном счете, замещаться на слой менее вязкий, но содержащий щелочь реакционной смеси [18]. В этом случае щелочной реагент будет поступать не из дальнего объема, а из приповерхностного слоя. Если в усредненной реакционной смеси концентрация гидроксид-ионов достаточно высока, то процесс гидролиза будет протекать очень быстро.

Для учета влияния концентрации на скорость щелочного травления ТМ воспользуемся на основании закона действующих масс уравнением поверхностной скорости травления, которое в зависимости от концентрации травящего агента можно представить в виде:

$$V_B = a \cdot C_{NaOH}^n \quad (2)$$

Коэффициенты k и n (порядок реакции щелочного гидролиза по NaOH) в уравнении (2) определяли графически и конечное полуэмпирическое уравнение объемной скорости травления (1) представляли следующим образом (3):

$$V_B = a \cdot \ln C^n \cdot e^{-\frac{E_a}{kT}} \quad (3)$$

Для подтверждения корректности проведенных вычислений с экспериментальными данными нами рассчитаны теоретические значения V_B по полученным полуэмпирическим уравнениям объемной скорости травления для стационарного режима (уравнение 4) и при интенсивном перемешивании (уравнение 5):

$$V_B = 3,4 \cdot 10^{12} \cdot C^{2,07} \cdot \exp \frac{-0,825}{kT}$$

Построение кинетических кривых $V_B = f(t)$, представленных на рисунке 4, подтверждает высокую сходимость теоретических и экспериментальных данных и корректность предлагаемого нами уравнения поверхностной скорости травления.

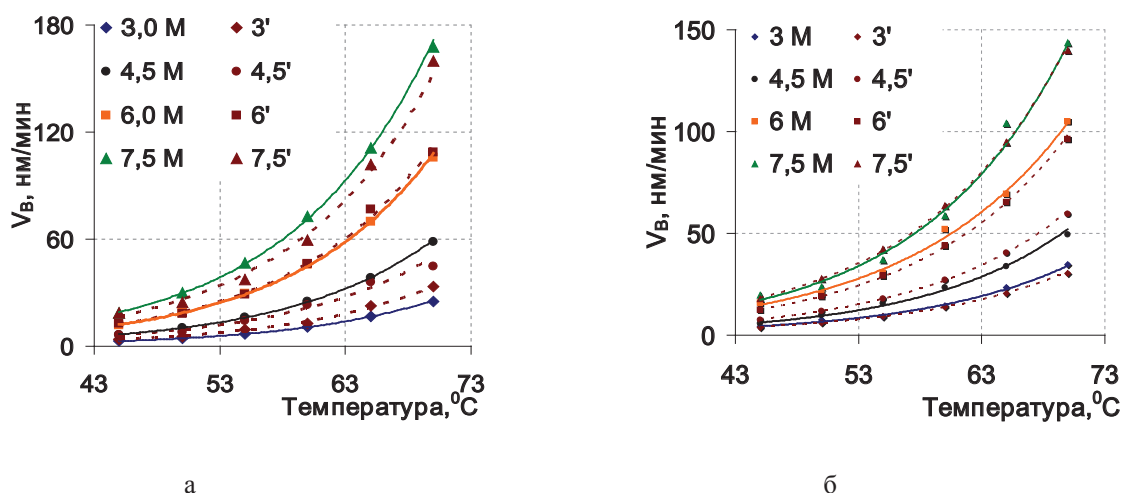


Рисунок 4 – Корреляция экспериментальных и теоретических значений $V_B=f(t)$ для стационарного (а) и динамического (б) режимов

Заключение

Таким образом, на основании проведенного эксперимента было изучено влияние температуры и концентрации раствора травления, а также фактора интенсивного перемешивания на скорость травления V_B ПЭТФ полимерной трековой мембраны. Было рассчитано полуэмпирическое уравнение объемной скорости травления $V_B = 3,4 \cdot 10^{12} \cdot C^{2,07} \cdot \exp(-0,825/kT)$ для

ПЭТФ полимерной пленки толщиной 12 мкм, облученной ионами $^{84}\text{Kr}^{15+}$ (энергия 1,75 МэВ/нуклон) на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 Астанинского филиала Института Ядерной Физики НЯЦ РК.

Использование полученных нами уравнений позволяет быстро и достоверно производить оценку объемной скорости травления, имея в наличии только значения температуры и концентрации раствора травления.

Исследования выполнены в рамках подпроекта «Создание фильтрационных материалов и металлических наноструктур на основе трековых мембран», финансируемого в рамках Проекта Коммерциализации Технологий, поддерживаемого Всемирным Банком и Правительством Республики Казахстан.

Литература

- 1 Волков В.В., Мchedlishvili Б.В., Ролдугин В.И. и др. Мембраны и нанотехнологии. // Российские нанотехнологии. – 2008. – Т.3. – №11-12. – С. 67-99.
- 2 Хартукова А. Использование мембранных технологий для очистки питьевой воды. // Водоснабжение и канализация. – 2009. – № 5-6. – С. 140-142.
- 3 Дзюбенко В.Г. Мембранные технологии в производстве питьевой воды. // Вода и водные технологии H_2O . – 2005. – №7. – С.10-12.
- 4 Постановление Правительства Республики Казахстан от 24 мая 2011 года № 570 «Об утверждении Программы «Ак бұлақ» на 2011-2020 годы» (с изменениями от 01.09.2011 г.). // Интернет-ресурс <http://kzvkr.kz/files/00000210.doc>.
- 5 Первов А.Г., Козлова Ю.В., Андрианов А.П. и др. Разработка технологии очистки поверхностных вод с помощью нано-фильтрационных мембран. // Крит. технол. Мембраны. – 2006. – № 29. – С. 20–33.
- 6 Lau W.J., Ismai A.F. et al. Polymeric nanofiltration membranes for textile dye wastewater treatment: Preparation, performance evaluation, transport modeling, and fouling controls – a review. // Desalination. – 2009. – Vol. 245. – P. 321–348.
- 7 Швецов В.Н. Теоретические и технологические аспекты применения биомембранных технологий глубокой очистки сточных вод // Водоснабжение и санитарная техника. – 2007. – № 1. – С. 10-13.
- 8 Булаев С.В., Жданов Г.С., Сотов М. И. Трековые мембранные технологии. // Нов. пром. технол. – 2004. – № 4. – С. 7–15.
- 9 P. Apel. Track etching technique in membrane technology //Radiation Measurements. – 2001. – Vol. 34. – P. 559–566.

- 10 Balestra S., Cozzi M., Giacomelli G. et al. Bulk etch rate measurements and calibrations of plastic nuclear track detectors // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. – 2007. – Vol. 254. – P. 254-258.
- 11 Виленский А.И., Березкин В.В., Соболев В.Д. и др. Формирование пор в полиимиде, облученном высокоэнергетическими ионами, и изучение свойств полученных мембран // *Коллоидный журнал*. – 2009. – Т. 71(№ 4). — С. 465-468.
- 12 Ковалев Ю.С., Левкович Н.В., Куклин А.И. К вопросу о механизме управления формой пор в трековых мембранах: исследование состояния поверхностно-активных веществ в растворах, применяемых при травлении треков. – М.: Дубна, 2009. – 12 с.
- 13 Митрофанов А.В. Кинетика травления трековых мембран с высокой пористостью. – М.: ФИАН, 2003. – 48 с.
- 14 Ghanim E.H., Hussein A., El-samman H.M. et al. Etching properties of polyethyleneterephthalate (PET) Melinex-E nuclear track detectors (NTDs) // *IX Radiation Physics & Protection Conference*. – Cairo, 2008. – P.323-332.
- 15 Spohr R. Etch hints for polymers with high track-etch-rate. // *European Research Training Network EuNITT*. – Darmstadt, 2001. – 9 p.
- 16 Ларичева Т.Е., Мачула А.А., Милинчук В.К. Исследование влияния продуктов щелочного гидролиза при производстве трековых мембран на основе пленок полиэтилентерефталата. // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. – 1999. – №2. – С.45-49.
- 17 Рудакова Т.Е., Моисеев Ю.В., Чалых А.Е., Заиков Г.Е. Кинетика и механизм гидролиза полиэтилентерефталата в водных растворах гидроксида калия. // *Высокомолек. соед. А*. – 1972. – Т.14(№2). – С. 449-453.
- 18 Иванов А.М., Харичкин А.С. Влияние природы щелочи и ее содержания в исходной реакционной смеси на макрокINETические характеристики глубокого гидролиза ПЭТФ в водных и спиртовых растворах. // *Пластические массы*. – 2008. – №6. – С. 9-12.

References

- 1 Volkov V.V., Mchedlishvili B.V., Roldugin V.I. i dr. Membrany i nanotekhnologii. // *Rossiyskie nanotekhnologii*. – 2008. – Т.3. – №11-12. – С. 67-99.
- 2 Khartukova A. Ispol'zovanie membrannykh tekhnologiy dlya ochkistki pit'evoy vody. // *Vodosnabzhenie i kanalizatsiya*. – 2009. – №5-6. – С. 140-142.
- 3 Dzyubenko V.G. Membrannye tekhnologii v proizvodstve pit'evoy vody. // *Voda i vodnye tekhnologii H₂O*. – 2005. – №7. – С.10-12.
- 4 Postanovlenie Pravitel'stva Respubliki Kazakhstan ot 24 maya 2011 goda № 570 «Ob utverzhdenii Programmy «Ak bulak» na 2011-2020 gody» (s izmeneniyami ot 01.09.2011 g.). // Internet-resurs <http://kzvpk.kz/files/00000210.doc>.
- 5 Pervov A.G., Kozlova Yu.V., Andrianov A.P. i dr. Razrabotka tekhnologii ochkistki poverkhnostnykh vod s pomoshch'yu nanofil'tratsionnykh membran. // *Krit. tekhnol. Membrany*. – 2006. – № 29. – С. 20-33.
- 6 Lau W.J., Ismai A.F. et al. Polymeric nanofiltration membranes for textile dye wastewater treatment: Preparation, performance evaluation, transport modeling, and fouling controls – a review. // *Desalination*. – 2009. – Vol. 245. – P. 321-348.
- 7 Shvetsov V.N. Teoreticheskie i tekhnologicheskie aspekty primeneniya biomembrannykh tekhnologiy glubokoy ochkistki stochnykh vod. // *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*. – 2007. – № 1. – С. 10-13.
- 8 Bulaev S.V., Zhdanov G.S., Sotov M.I. Trekovye membrannye tekhnologii. // *Nov. prom. tekhnol.* – 2004. – № 4. – С. 7-15.
- 9 P. Apel. Track etching technique in membrane technology // *Radiation Measurements*. – 2001. – Vol. 34. – P. 559-566.
- 10 Balestra S., Cozzi M., Giacomelli G. et al. Bulk etch rate measurements and calibrations of plastic nuclear track detectors // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. – 2007. – Vol. 254. – P. 254-258.
- 11 Vilenskiy A.I., Bereskin V.V., Sobolev V.D. i dr. Formirovaniye por v poliimide, obluchennom vysokoenergeticheskimi ionami, i izucheniye svoystv poluchennykh membran. // *Kolloidnyy zhurnal*. – 2009. – Т. 71(№ 4). — С. 465-468.
- 12 Kovalev Yu.S., Levkovich N.V., Kuklin A.I. K voprosu o mekhanizme upravleniya formoy por v trekovykh membranakh: issledovaniye sostoyaniya poverkhnostno-aktivnykh veshchestv v rastvorakh, primenyaemykh pri travlenii trekov. – М.: Дубна, 2009. – 12 с.
- 13 Mitrofanov A.V. Kinetika travleniya trekovykh membran s vysokoy poristost'yu. – М.: FIAN, 2003. – 48 с.
- 14 Ghanim E.H., Hussein A., El-samman H.M. et al. Etching properties of polyethyleneterephthalate (PET) Melinex-E nuclear track detectors (NTDs) // *IX Radiation Physics & Protection Conference*. – Cairo, 2008. – P.323-332.
- 15 Spohr R. Etch hints for polymers with high track-etch-rate. // *European Research Training Network EuNITT*. – Darmstadt, 2001. – 9 p.
- 16 Laricheva T.E., Machula A.A., Milinchuk V.K. Issledovaniye vliyaniya produktov shchelochnoy gidroliza pri proizvodstve trekovykh membran na osnove plenok polietilentereftalata. // *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. – 1999. – №2. – С.45-49.
- 17 Rudakova T.E., Moiseev Yu.V., Chalykh A.E., Zaikov G.E. Kinetika i mekhanizm gidroliza polietilentereftalata v vodnykh rastvorakh gidrooksi kaliya. // *Vysokomolek. soed. А*. – 1972. – Т.14(№2). – С. 449-453.
- 18 Ivanov A.M., Kharichkin A.S. Vliyaniye prirody shchelochi i ee soderzhaniya v reaktzionnoy smesi na makrokineticheskie kharakteristiki glubokogo gidroliza PETF v vodnykh i spirtovykh rastvorakh. // *Plasticheskie massy*. – 2008. – №6. – С. 9-12.