

Окисление пероксидом водорода как эффективный способ повышения реакционной способности ПЭТФ трековых мембран в реакциях фотоиницированной полимеризации

^{1,2}Корольков И.В.*, ²Талтенов А.А.,
^{1,2}Машенцева А.А., ³Güven O.

¹Институт ядерной физики,
г. Алматы, Казахстан

²Евразийский национальный университет
имени Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

³Hacettepe University, г. Анкара, Турция

*E-mail: korolkovelf@gmail.com

В данной статье представлены результаты функционализации трековых мембран на основе полиэтилентерефталата (ПЭТФ ТМ) путем окисления с использованием современных методов на основе перекиси водорода и последующей УФ-иницированной прививочной полимеризации акриловой кислоты с целью повышения химической активности поверхности и расширения практического применения. Среди современных окислительных систем, система H₂O₂ под УФ-облучением была выбрана для максимально эффективного получения концевых COOH-групп на поверхности мембраны. УФ-иницированная полимеризация была проведена одновременно с двух сторон мембраны, что привело к формированию слоя полиакриловой кислоты, как на поверхности, так и внутри пор ПЭТФ ТМ. Эффект влияния кислород-насыщенной поверхности на адсорбционную способность бензофенона (инициатора прививочной полимеризации) и на эффективность прививочной полимеризации был изучен методом ЭПР спектроскопии. Полученные образцы были изучены методами УФ-, ИК-, РФЭ-спектроскопий, а также сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Ключевые слова: трековые мембраны; полиэтилентерефталат; окисление; прививочная полимеризация; акриловая кислота; ЭПР; модификация ПЭТФ ТМ

Сутек асқын тотығымен тотықтыру фотоиницирленген полимерлеу реакцияларындағы ПЭТФ тректік мембраналарының реакциялық қабілетін арттырудың тиімді әдісі ретінде

^{1,2}Корольков И.В.*, ²Талтенов А.А.,
^{1,2}Машенцева А.А., ³Güven O.

¹Ядролық физика институты,
Алматы қ., Қазақстан

²Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық
Университеті, Астана қ., Қазақстан

³Hacettepe University, Анкара қ., Түркия

*E-mail: korolkovelf@gmail.com

Мақалада полиэтилентерефталат (ПЭТФ ТМ) негізіндегі тректік мембраналардың сутек асқын тотығының негізінде заманауи әдістерді пайдалана отырып тотықтыру және беттің белсенділігін арттыру, практикада қолданылу аясын кеңейту үшін акрил қышқылды УК-иницирленген егу полимерлеу арқылы функциялау нәтижелері көрсетілген. Заманауи тотықтыру жүйелерінің ішінде H₂O₂ жүйесін УК-сәулелендіру астында тотықтыру мембрана бетінде COOH топтарын алуда максималды тиімді болып таңдалынды. УК-иницирленген полимерлеу мембрананың екі жағында жүргізілді, нәтижесінде ПЭТФ ТМ бетінде және кеуек ішінде полиакрил қышқылының қабаты пайда болды. Оттекті қаныққан беттің бензофенонның (егу полимерлеу инициаторы) адсорбциялық қабілетіне және егу полимерлеу қарқындылығы ЭПР спектроскопия әдісімен зерттелінді. Алынған үлгілер УК-, ИК-, РФЭ-спектроскопия және сканерлеуші электронды микроскопия (СЭМ) әдістерімен зерттелінді.

Түйін сөздер: тректік мембраналар; полиэтилентерефталат; тотығу; егу полимерлеу; акрил қышқылы; ЭПР; ПЭТФ ТМ түрленуі.

The oxidation of PET track-etched membranes by hydrogen peroxide as an effective method to increase efficiency of UV-induced graft polymerization

^{1,2}Korolkov I.V.*, ²Taltenov A.A.,
^{1,2}Mashentseva A.A., ³Güven O.

¹Institute of Nuclear Physics,
Almaty, Kazakhstan

²L.N. Gumilyov Eurasian National
University, Astana, Kazakhstan

³Hacettepe University, Ankara, Turkey

*E-mail: korolkovelf@gmail.com

In this article, we report on functionalization of track-etched membrane based on poly(ethylene terephthalate) (PET TeMs) oxidized by advanced oxidation systems and by grafting of acrylic acid using photochemical initiation technique for the purpose of increasing functionality thus expanding its practical application. Among advanced oxidation processes (H₂O₂/UV) system had been chosen to introduce maximum concentration of carboxylic acid groups. Benzophenone (BP) photo-initiator was first immobilized on the surfaces of cylindrical pores which were later filled with aq. acrylic acid solution. UV-irradiation from both sides of PET TeMs has led to the formation of grafted poly(acrylic acid) (PAA) chains inside the membrane nanochannels. Effect of oxygen-rich surface of PET TeMs on BP adsorption and subsequent process of photo-induced graft polymerization of acrylic acid (AA) were studied by ESR. The surface of oxidized and AA grafted PET TeMs was characterized by UV-vis, ATR-FTIR, XPS spectroscopies and by SEM.

Keywords: track-etched membranes; poly(ethylene terephthalate); oxidation; graft polymerization; acrylic acid; ESR; modification of PET TeMs.



Окисление пероксидом водорода как эффективный способ повышения реакционной способности ПЭТФ трековых мембран в реакциях фотоиницированной полимеризации

^{1,2}Корольков И.В. *, ²Талтенов А.А., ^{1,2}Машенцева А.А., ³Güven O.

¹Институт ядерной физики Республики Казахстан, г. Алматы, Казахстан

²Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, г. Астана, Казахстан

³Nacettepe University, г. Анкара, Турция

*E-mail: korolkovelf@gmail.com

1. Введение

В настоящее время ведутся интенсивные исследования по разработке простых и технологичных методов модификации поверхности трековых мембран, позволяющих придать им требуемые гидрофильные свойства, и таким образом не только получить мембраны с уникальными технологическими характеристиками, но и значительно расширить диапазон их применения в современном материаловедении. Функционализация наноканалов ПЭТФ ТМ может быть достигнута прививочной полимеризацией разнообразных мономеров [1] различными методами, такими как химическая [2], фотохимическая [3], радио- [4] или плазмо- [5] инициированная прививка.

Фотоиницированная прививочная полимеризация (ФПП) в отличие от других методов существенно не воздействует на субстрат, изменяя его механические и эксплуатационные свойства, так как энергия излучения является низкой, прививка проходит в мягких условиях и при низкой температуре. ФПП широко используется для модификации поверхности разнообразных полимеров. Данный метод основан на формировании радикалов на поверхности полимера при помощи фото-инициаторов, генерирующих радикалы при УФ-облучении или же сенсibilизаторов, способных отрывать атом водорода с полимерной цепочки после перехода их в возбужденное состояние. Образовавшиеся радикалы на поверхности образуют центры зарождения полимерной цепи по радикальному механизму [6].

Ранее [7] нами были показаны очевидные преимущества использования окислительных систем на основе пероксида водорода для проведения гидрофиллизации поверхности и каналов ПЭТФ ТМ. В данной работе было проведено систематическое исследование процесса ФПП в каналы и на поверхность травленной и окисленной ПЭТФ ТМ с конечной целью модификации не только поверхности ТМ, но и внутренних стенок наноканалов. Детальное изучение данного процесса, несомненно, позволит в будущем создать «умные» мембраны, изменяющие свои фильтрационные параметры в зависимости от pH среды и катализаторы на их основе.

2. Эксперимент

2.1 Материалы и методы исследования

Акриловая кислота, бензофенон (БФ), перекись водорода, метиленовый синий производства Sigma Aldrich (Германия), а также все остальные используемые химические реактивы имели чистоту ч.д.а или х.ч., и использовались без дополнительной очистки.

Во всех экспериментах применялась деионизированная вода (18,2 МΩ), которая была получена с помощью установки Аквилон-D-301.

2.2 Объекты исследования

Объектом исследования служила ПЭТФ пленка торговой марки Hostaphan® RNK-12,0 производства фирмы «Mitsubishi Polyester Film» (Германия). Номинальная толщина пленки составляла 12,0 мкм, плотность материала – 1,4 г/см³. Образцы ПЭТФ пленок облучали ионами ⁸⁴Kr¹⁵⁺

(энергия 1,75 МэВ/нуклон) на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60. После химического травления в 2,2 М NaOH при 85°C получали мембраны с диаметром пор 400 нм. После облучения образцы хранились на воздухе при комнатной температуре.

2.3 Окисление ПЭТФ ТМ

В чашку Петри емкостью 100 мл помещали исследуемый образец ПЭТФ размерами 5×7,5 см, приливали пероксид водорода (37% об.), в количестве, необходимым для получения конечной концентрации, pH=3,0 поддерживали добавлением 3,0 М раствора HCl.

2.4 Модификация ПЭТФ ТМ путем прививочной полимеризации акриловой кислоты

Фотоиницированная прививочная полимеризация была проведена в два этапа. На первом этапе была проведена сорбция инициатора на поверхность, для этого, 5% раствор БФ в EtOH пропускали через мембрану с помощью перистальтического насоса в течение 2 ч, затем выдерживали в этом же растворе в течение 48 ч. Вторым этапом было проведение прививочной полимеризации в специальных кварцевых кюветках в 10% водном растворе акриловой кислоты. Облучение проводили УФ-лампами (190 W, 254 нм) в течение 30-180 мин. После облучения образцы промывали в воде в течение 2 ч при 80°C.

2.5 Количественная оценка концентрации концевых функциональных групп

Образец ПЭТФ ТМ размером 1 см² помещали в 10 мл щелочного раствора (NaOH, pH=10) толуидинового синего (ТС) концентрацией 5·10⁻⁴ М и непрерывно встряхивали на шейкере в течение 3 ч, обеспечивая таким образом наиболее полную сорбцию красителя на поверхность мембраны [8]. По окончании встряхивания образец промывали в растворе NaOH (pH=10) и дважды – в деионизированной воде, после чего высушивали на фильтровальной бумаге на воздухе. Десорбцию окрашенных образцов проводили в 5 мл 50% раствора уксусной кислоты в течение 10 мин при интенсивном встряхивании на шейкере. Оптическую плотность полученного окрашенного раствора определяли при длине волны 633 нм, концентрацию концевых карбоксильных групп определяли по калибровочному графику.

2.6 FTIR-ATR – спектроскопическое исследование

ИК-спектры были сняты на ИК-Фурье спектрометре Cary 600 Series производства Agilent Technologies (США) с использованием приставки однократного отражения на алмазе Gladiatr производства PIKE (США). Все измерения проводили при разрешении 2,0 см⁻¹ и температуре 21°C, количество сканирований составляло не менее 32. Полученные спектры были обработаны в программной оболочке Agilent Resolution Pro.

2.7 Исследование состава поверхности методом РФЭС

Состав поверхности образцов определяли методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на интегрированном РФЭ спектрометре K-Alpha

фирмы «Thermo Scientific» (США) в Национальном нанотехнологическом центре UNAM (Анкара, Турция). Спектры регистрировали в режиме CAE (Pass Energy 200,0 эВ) с шагом 1,0 эВ. Спектры высокого разрешения (C, N, O) регистрировали в аналогичном режиме с Pass Energy, равной 30,0 эВ и с шагом 0,1 эВ. Обработку полученных данных выполняли при помощи программного обеспечения Advantage.

2.8 Исследование методом СЭМ

Анализ полученных данных проводили методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на электронном микроскопе высокого разрешения японской фирмы JEOL JSM-7500F с «холодным» (автоэмиссионным) катодом.

Поверхности исследовали в режиме вторичных электронов, ускоряющее напряжение составляло 1 кВ в режиме GB-H (Gentle Beam), торможение электронов перед образцом и снижение энергии первичного пучка до 100 В.

Напыление проводили в магнетроне JFC-1600, в качестве материала для напыления использовали золото, толщину напыленного слоя (не более 15-20 нм) определяли по стандартному калибровочному графику путем подбора тока и времени напыления.

2.9 Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР)

ЭПР спектры были сняты на приборе ESP 300 E Bruker Spectrometer с частотой 9,47 ГГц при комнатной температуре. Параметры, выставленные на приборе – магнитное поле 9,51 Г, развертка магнитного поля 150 Г, мощность 2,01 мВ в зависимости от интенсивности сигнала. Для обработки и накопления спектров использовали программу WinEPR. Количество сканирований – 10.

3. Результаты и обсуждение

Прививочную полимеризацию проводили в две стадии. На первой стадии происходила адсорбция фотосенсибилизатора (БФ) на поверхность и внутренние стенки пор ТМ путем прокачки спиртового раствора БФ сквозь поры мембраны с помощью перельстатического насоса, на второй стадии проводили прививочную полимеризацию под УФ-облучением в растворе мономера в кварцевых кюветках. Изучали процесс прививки на травленную и окисленную ПЭТФ ТМ. Общая схема представлена на рисунке 1.

Степень прививки также устанавливали колориметрическим методом измерения COOH-групп. Графики кинетических кривых прививочной полимеризации на травленную и окисленную ПЭТФ ТМ представлены на рисунке 2.

Наблюдается резкое повышение карбоксильных групп в зависимости от времени облучения, однако было обнаружено, что прививка на окисленную ПЭТФ ТМ протекает намного эффективнее, чем на травленную ПЭТФ ТМ, это может быть связано, главным образом, с различной адсорбционной способностью БФ травленных и окисленных мембран.

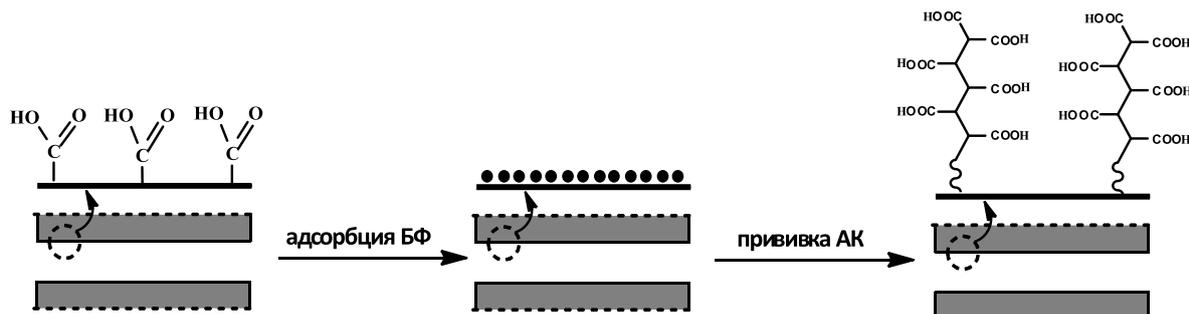


Рисунок 1 – Схематичное отображение процесса фотоиницированной прививочной полимеризации акриловой кислоты на ПЭТФ ТМ

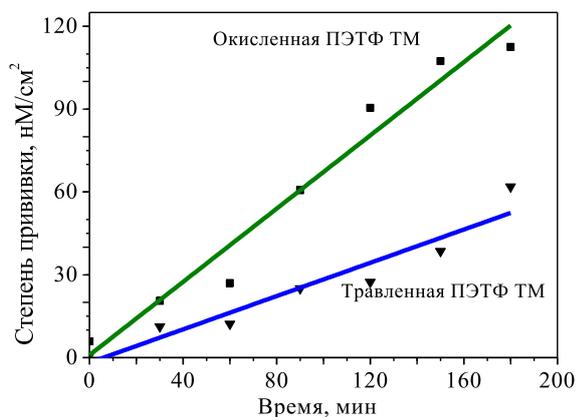


Рисунок 2 – График зависимости степени прививки АК от времени облучения

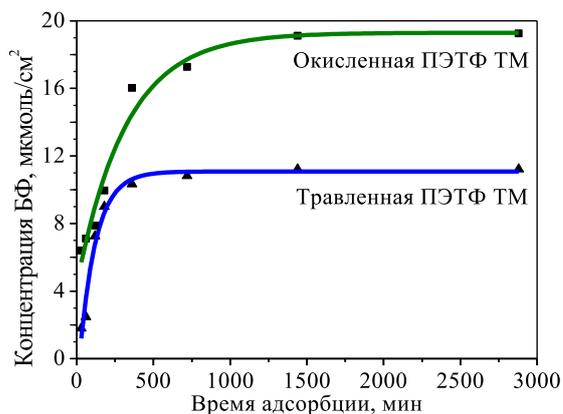


Рисунок 3 – График зависимости количества адсорбируемого БФ на травленную и окисленную ПЭТФ ТМ в зависимости от времени сорбции

В подтверждении данной гипотезы, адсорбирующая способность травленной и окисленной ПЭТФ ТМ была исследована УФ и ЭПР спектроскопией. На рисунке 3 представлены кривые адсорбции БФ, количественное содержание которого было определено при 253 нм.

Спектрофотометрические исследования показывают, что окисленная мембрана адсорбировала почти в два раза больше БФ, чем травленная. Известно, что взаимодействие БФ с поверхностью полимера происходит за счет электростатических и Ван-дер-Ваальсовых сил и зависит от гидрофильно-гидрофобных и кристаллично-аморфных свойств полимера [9]. Гидрофильный полимер может образовывать более упорядоченные и прочные связи с БФ. Теми же авторами было также показано, что молекулы БФ способны проникать в аморфную фазу полимера, тогда как в кристаллических полимерах остаются только на поверхности. Окисление травленных ПЭТФ ТМ приводит к снижению кристалличности ПЭТФ ТМ, увеличению гидрофильности, в совокупности это повышает адсорбцию БФ. Повышение концентрации БФ на поверхности ПЭТФ ТМ приводит к формированию большего количества активных центров, приводящие в свою очередь к более эффективной прививки акриловой кислоты. Так, максимальная

концентрация БФ была достигнута после 48 ч адсорбции из спиртового раствора и составила 19 мкм/см². Авторами [10] сообщалось о БФ иммобилизации на PES пленки и показано максимальное количество адсорбированного БФ 0,7 мкм/см².

ЭПР спектроскопия позволяет определить концентрацию образующихся радикалов и также время их жизни. С этой целью были сняты ЭПР спектры БФ-травленной (БФТ) и БФ-окисленной (БФО) ПЭТФ ТМ непосредственно после УФ-облучения и в зависимости от времени отжига.

ЭПР спектры образцов после УФ-облучения (рисунок 4) представляют собой ассиметричный синглет с g-фактором 2,011 для БФО ПЭТФ ТМ и 2,006 для БФТ ПЭТФ ТМ. Также для сравнения были сняты ЭПР спектры травленной и окисленной ПЭТФ ТМ без БФ, представленные на рисунке 5. ЭПР спектр травленной ПЭТФ ТМ состоит из 11 низкоинтенсивных линий, подобный спектр был записан после γ -облучения монокристалла этиленгликоля дибензоата [11]. Тогда как ЭПР спектр окисленной ПЭТФ ТМ представляет собой синглет высокой интенсивности, вероятно, данный сигнал вызван образующимися в ходе окисления алкокси-радикалами.

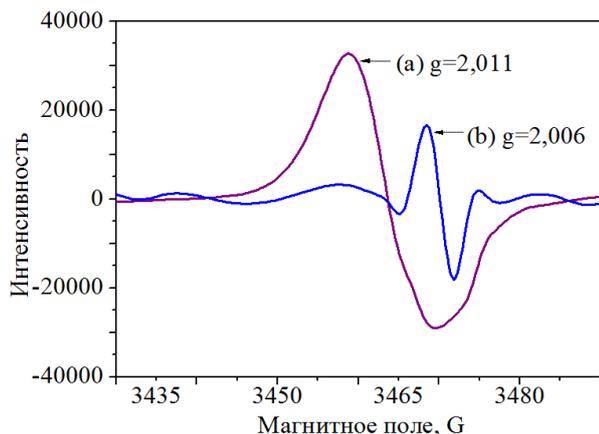


Рисунок 4 – ЭПР спектр БФО ПЭТФ ТМ (а); БФТ ПЭТФ ТМ (б)

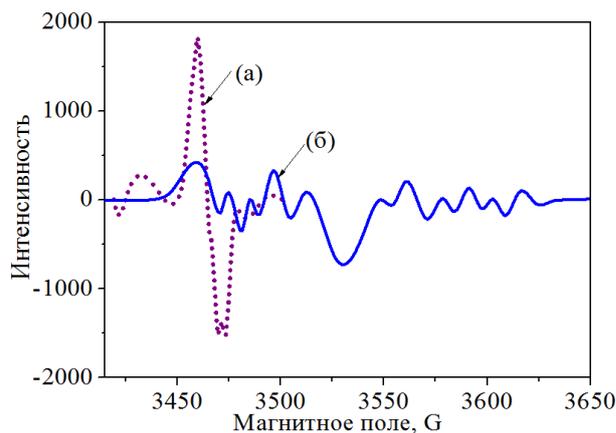


Рисунок 5 – ЭПР Спектры окисленная ПЭТФ ТМ (а), травленная ПЭТФ ТМ (б)

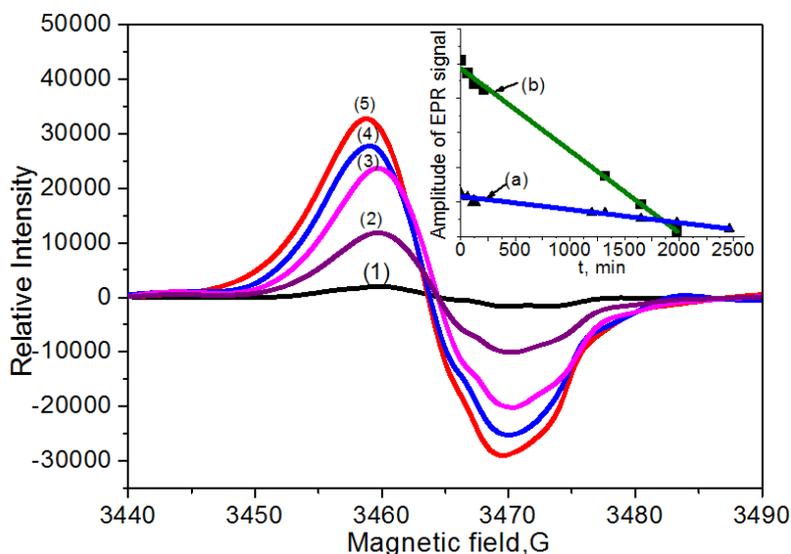


Рисунок 6 – ЭПР спектры БФО ПЭТФ ТМ до (1), сразу после облучения (5), 2 ч после облучения (4), 4 ч после облучения (3), 33 ч прошедшее после облучения (2)

Незначительный ЭПР сигнал был зарегистрирован для БФО ПЭТФ ТМ до УФ-облучения, как это видно из рисунка 6. После 30 мин УФ-облучения был достигнут максимум амплитуды сигнала, далее с ростом времени отжига (прошедшего после УФ-облучения), амплитуда медленно уменьшалась и вернулась в исходное положение после 41 ч отжига в результате рекомбинации первоначально образующихся радикалов.

На рисунке 6 также представлены кинетические кривые времени жизни радикалов на БФТ и БФО ПЭТФ ТМ. Радикалы, образованные на БФО ПЭТФ ТМ, оказались менее стабильными, чем радикалы, образованные на БФТ ПЭТФ ТМ, это, в первую очередь, связано с высокой концентрацией радикалов и их быстрой рекомбинацией.

Основное различие между спектрами исследованных образцов (рисунок 7) связано с увеличением интенсивности

поглощения при 1715 cm^{-1} ($\nu \text{ C=O}$) и при $3632\text{-}3100 \text{ cm}^{-1}$ ($\nu \text{ OH}$), происходящее за счет возрастания концентрации карбоксильных и гидроксильных групп в связи с образованием слоя ПАК на стенках пор мембраны. Площади под пиками модифицированной после травления мембраны равны $4,01 \text{ (} 1715 \text{ cm}^{-1}\text{)}$ и $0,61 \text{ (} 3632\text{-}3100 \text{ cm}^{-1}\text{)}$, однако, после модификации окисленной ПЭТФ ТМ равны $5,73 \text{ (} 1715 \text{ cm}^{-1}\text{)}$ и $5,52 \text{ (} 3632\text{-}3100 \text{ cm}^{-1}\text{)}$.

Для доказательства того, что фотоиницированная прививочная полимеризация акриловой кислоты произошла не только на поверхности, но и на внутренних стенках нанопор мембраны, были проведены измерения разности диаметра поры до и после модификации окисленных ПЭТФ ТМ методами СЭМ, газопроницаемости, также была измерена концентрация карбоксильных групп только внутренних стенок каналов.

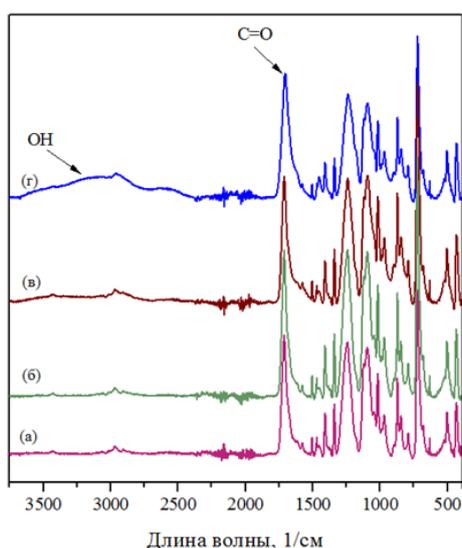
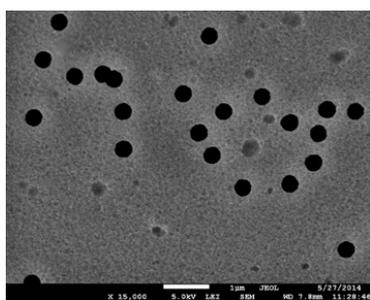
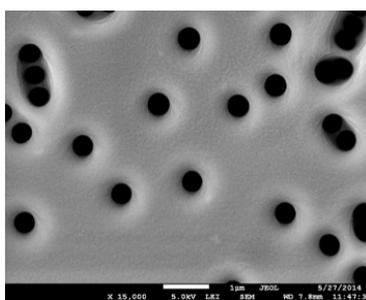


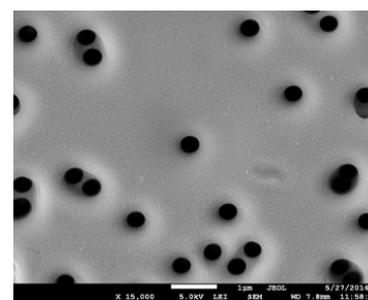
Рисунок 7 – ИК-спектры травленной ПЭТФ ТМ (а), окисленной ПЭТФ ТМ (б), модифицированная (травленная) (в) и (окисленная) (г) ПЭТФ ТМ



(а)



(б)



(в)

Рисунок 8 – СЭМ микрофотографии (а) травленной, окисленной (б), ПАК-г-ПЭТФ ТМ (180 мин) (в)

Измерение COOH -групп внутри каналов достигалось тем, что поверхность модифицированной мембраны была покрыта тонким слоем золота (50-60 нм), таким образом, краситель ТС не смог проникнуть сквозь слой золота. Исследование показало, что концентрация COOH групп в каналах составила $43,27 \text{ нМ/см}^2$, тогда как образец без напыления показал $119,15 \text{ нМ/см}^2$, напомним что исходное значение концентрации COOH -групп до модификации равнялось $6,00 \text{ нМ/см}^2$.

СЭМ микрофотографии травленной, окисленной и модифицированной ПЭТФ ТМ представлены на рисунке 8. Наблюдается сужение каналов в результате модификации акриловой кислотой с $0,440 \pm 0,026 \text{ мкм}$ до $0,405 \pm 0,032 \text{ мкм}$ (после 180 мин прививки), диаметры до и после прививки существенно не изменяются. Для более точного определения степени сужения каналов был использован метод газопроницаемости, который позволяет вычислить внутренний диаметр каналов по уравнению Хагена-Пуазейля. Зависимость диаметра пор от продолжительности прививки акриловой кислоты представлено на рисунке 9.

Наблюдается сужение пор на $41 \pm 15 \text{ нм}$ после 180 мин прививки АК.

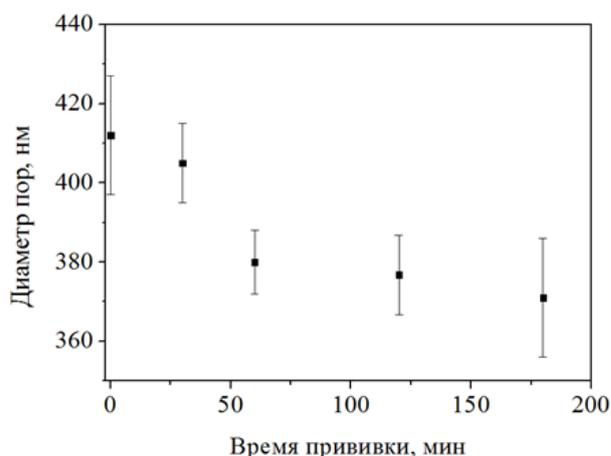


Рисунок 9 – График зависимости диаметра пор мембраны от времени прививки по методу газопроницаемости

На данный момент метод РФЭС является одним из самых информативных инструментальных методов качественного и количественного анализа поверхности в современном материаловедении.

РФЭС спектры высокого разрешения C_{1s} и O_{1s} до и после фотоинициированной прививки АК представлены на рисунке 10.

В спектре C_{1s} наблюдается три пика, которые

характерны для C–C/C–H групп (энергия связи ~ 284,6 эВ), C–OH/C–O–C групп (энергия связи ~ 286,2 эВ), COOH-группы (энергия связи ~ 288,6 эВ). O_{1s} спектр характеризуется двойным расщеплением, C=O группа проявляется при 533,5 эВ, тогда как C–O группы проявились при 531,4 эВ. Данные, полученные из анализа РФЭС спектров, представлены в таблице 1.

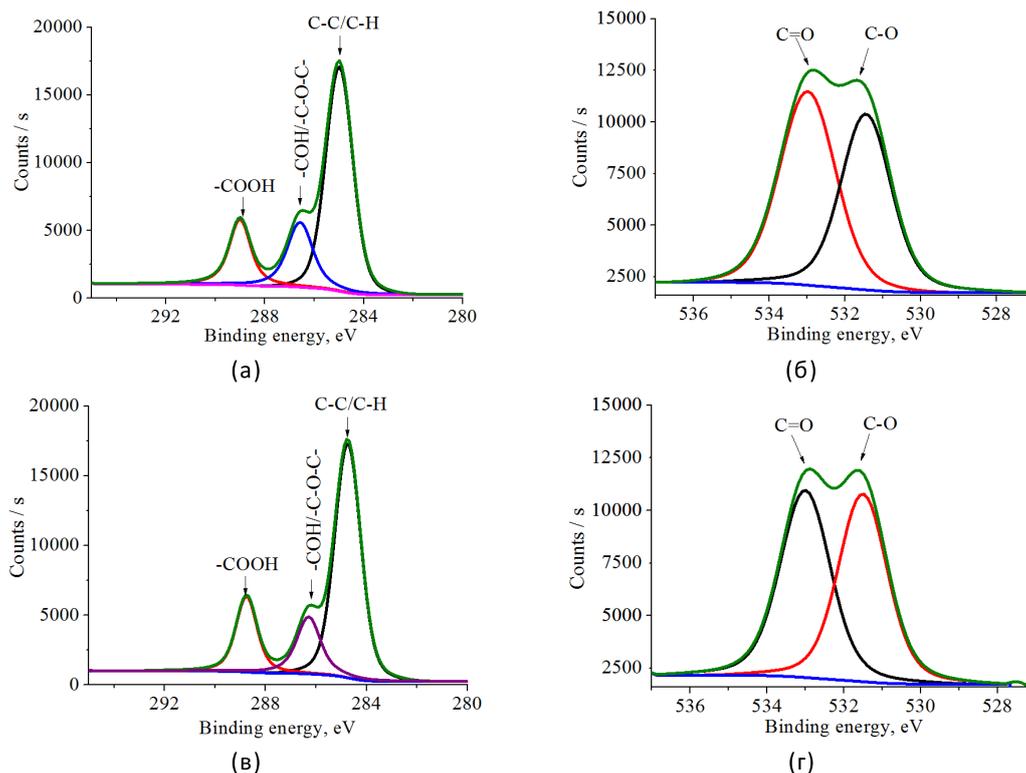


Рисунок 10 – РФЭС спектры C_{1s} и O_{1s} высокого разрешения окисленной ПЭТФ ТМ (а-б); ПАК-г-ПЭТФ ТМ (180 мин) (в-г)

Таблица 1 – Данные РФЭС анализа окисленной и ПАК-г-ПЭТФ ТМ

Элемент	Окисленная ПЭТФ ТМ		ПАК-г-ПЭТФ ТМ	
	пик, eV	ат.соот. %	пик, eV	ат. соот. %
Элементный состав, %				
O	533,03	26,33	532,77	28,90
C	285,55	73,67	285,21	71,10
C_{1s} – высокого разрешения				
-C-H	284,99	59,23	284,74	64,26
O=C-O	289,00	19,79	288,75	18,63
-C-OH	286,57	20,98	286,29	17,12
O_{1s} – высокого разрешения				
C-O	533,32	50,06	533,21	49,64
C=O	531,77	49,94	531,68	50,36

Наблюдается повышение содержания С-С и С-Н групп после процесса фотопрививки АК, вместе с тем, концентрации С=О и С-О связей в спектрах O_{1s} и C_{1s} остаются практически неизменными, что указывает на прививку акриловой кислоты, у которой соотношение С-С и С-Н связей больше, чем содержание кислородсодержащих групп.

4. Заключение

Таким образом, была достигнута равномерная фотоиницированная прививка акриловой кислоты как на поверхность, так и во внутренние стенки нанопор, причем эффективность прививки на окисленную ПЭТФ почти в два раза выше, чем на травленную ПЭТФ ТМ. Оптимальными условиями процесса являются: окисление ПЭТФ ТМ в системе в 300 мМ H_2O_2 (рН=3) под УФ-облучением в течение 180 мин; сорбция БФ в 5% спиртовом растворе в течение 48 ч; фотоиницированная прививка в 10% водном растворе АК (рН=2) в течение 180 мин.

Список литературы

- 1 Barsbay M., Güven O., Grafting in confined spaces: Functionalization of nanochannels of track-etched membranes // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2006. – Vol. 105. – P.26-30.
- 2 Delvaux M., Duchet J., Stavaux P.-Y., Legras R., Chemical and electrochemical synthesis of polyaniline micro- and nano-tubules // *Synthetic Metals*. – 2000. – Vol.113. – P.275-280.
- 3 Wu G., Li Y., Han M., Liu X., Novel thermo-sensitive membranes prepared by rapid bulk photo-grafting polymerization of N,N-diethylacrylamide onto the microfiltration membranes Nylon // *Journal of Membrane Science*. – 2006. – Vol.283. – P.13-20.
- 4 Espinoza S.L., Arbeitman C.R., Clochard M.C., Grasselli M. Functionalization of nanochannels by radio-induced grafting polymerization on PET track-etched membranes // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2014. – Vol.94 – P.72-75.
- 5 Gupta B., Plummer C., Bisson I., Frey P., Hilborn J. Plasma induced graft polymerization of acrylic acid onto poly(ethylene terephthalate) film characterization and human smooth muscle cell growth on grafted film // *Biomaterials*. – 2002. – Vol.23. – P.863-871.
- 6 Hong K.H., Liu N., Sun G., UV-induced graft polymerization of acrylamide on cellulose by using immobilized benzophenone as a photo-initiator // *European Polymer Journal*. – 2009. – Vol.45 – P.2443-2449.
- 7 Korolkov I.V., Mashentseva A.A., Niyazova D.T., Güven O., Barsbay M., Zdorovets M.V. The effect of oxidizing agents/systems on the properties of track-etched PET membranes // *Polymer Degradation and Stability*. – 2014. – Vol.107. – P.150-157.
- 8 Knittel D., Schollmeyer E. Functional group analysis on oxidized surfaces of synthetic textile polymers // *Talanta*. – 2008. – Vol.76. – P.1136-1140.
- 9 Mazeau K., Vergelati C. Atomistic modeling of the adsorption of benzophenone onto Cellulosic Surfaces // *Langmuir*. – 2002. – Vol.18. – P.1919-1927.
- 10 Ulbricht M., Riedel M., Marx U. Novel photochemical surface functionalization of polysulfone ultrafiltration membranes for covalent immobilization of biomolecules // *Journal of Membrane Science*. – 1996. – Vol.120. – P.239-259.
- 11 Ataki K., Campbell D., Turner D.T. ESR study of free radicals formed by γ -irradiation of poly(ethylene terephthalate) // *Polymer Letters*. – 1965. – Vol.3. – P.993-996.

References

- 1 Barsbay M, Güven O (2006) *Radiat Phys and Chem* 105:26-30. <http://dx.doi:10.1016/j.radphyschem.2014.05.018>
- 2 Delvaux M, Duchet J, Stavaux PY, Legras R (2000) *Synthetic Met* 113:275-280. [http://dx.doi:10.1016/S0379-6779\(00\)00226-5](http://dx.doi:10.1016/S0379-6779(00)00226-5)
- 3 Wu G, Li Y, Han M, Liu X (2006) *J Membr Sci* 283:13-20. <http://dx.doi:10.1016/j.memsci.2006.05.017>
- 4 Espinoza SL, Arbeitman CR, Clochard MC, Grasselli M (2014) *Radiat Phys and Chem* 94:72-75. <http://dx.doi:10.1016/j.radphyschem.2013.05.043>
- 5 Gupta B, Plummer C, Bisson I, Frey P, Hilborn J (2002) *Biomaterials* 23:863-871. [http://dx.doi:10.1016/S0142-9612\(01\)00195-8](http://dx.doi:10.1016/S0142-9612(01)00195-8)
- 6 Hong KH, Liu N, Sun G (2009) *Eur Polym J* 45:2443-2449. <http://dx.doi:10.1016/j.eurpolymj.2009.04.026>

На основе модифицированных ПЭТФ ТМ представляется возможным получение наночастиц каталитически активных металлов с целью осуществления нанокатализа в порах мембраны различных промышленно важных реакций. Модифицированные мембраны могут найти широкое применение в фильтрационных процессах, а также служить основой в создании smart-систем, которые способны изменять свои фильтрационные параметры в зависимости от рН-среды.

Благодарности

Данная работа была выполнена в рамках программы развития РБП 029 «Прикладные научные исследования технологического характера» мероприятие «Развитие комплексных научных исследований в области физики, химии и передовых технологий на базе ускорителя тяжелых ионов ДЦ-60» финансируемого Министерством энергетики Республики Казахстан

- 7 Korolkov IV, Mashentseva AA, Niyazova DT, Güven O, Barsbay M, Zdorovets MV (2014) Polym Degrad and Stab 107:150-157. <http://dx.doi:10.1016/j.polymdegradstab.2014.05.008>
- 8 Knittel D, Schollmeyer E (2008) Talanta 76:1136-1140. <http://dx.doi:10.1016/j.talanta.2008.05.036>
- 9 Mazeau K, Vergelati C (2002) Langmuir 18:1919-1927. <http://dx.doi:10.1021/la010792q>
- 10 Ulbricht M, Riedel M, Marx U (1996) J Membr Sci 120:239-259. [http://dx.doi:10.1016/0376-7388\(96\)00148-2](http://dx.doi:10.1016/0376-7388(96)00148-2)
- 11 Ataki K, Campbell D, Turner DT (1965) Polym Lett 3:993-996. <http://dx.doi:10.1002/pol.1966.150041022>