

УДК 533.92+544.558

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТНЫХ ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН С НАНОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ В КАЧЕСТВЕ ЭКСПЛАНТОДРЕНАЖА

Т.В. Рязанцева, Л.И. Кравец*

Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского

E-mail: tvroko@gmail.com

*Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна

Представлены результаты исследований по применению полимерных трековых мембран с наноструктурированной поверхностью в качестве эксплантодренажа для хирургического лечения рефрактерной глаукомы. Для наноструктурирования поверхностного слоя мембран применена обработка в плазме неполимеризующихся газов. Показано, что имплантация предлагаемого эксплантодренажа позволяет добиться стойкой нормализации внутриглазного давления и длительного сохранения сформированных путей оттока внутриглазной жидкости.

Ключевые слова:

Полимерные трековые мембраны, обработка в плазме, наноструктурированная поверхность, рефрактерная глаукома.

Key words:

Polymer track membranes, plasma treatment, nanostructured surface, refractory glaucoma.

Введение

Глаукома является одним из самых тяжелых глазных заболеваний, протекающих хронически, часто бессимптомно, и приводящих к значительному снижению зрительных функций вплоть до полной и необратимой слепоты даже при соответствующем лечении. В последнее время в литературе стали выделять особую форму глаукомы под общим названием рефрактерная (невосприимчивая) глаукома (РГ), которая объединяет множество самых разнообразных клинических видов. Для РГ, являющейся наиболее трудноизлечимой нозологической формой глаукомы, характерно особое упорство течение болезни и частое отсутствие успеха от традиционного хирургического и медикаментозного лечения. Основная причина отсутствия стойкого гипотензивного эффекта при лечении РГ заключается в рубцевании вновь созданных путей оттока внутриглазной жидкости. Учитывая резистентность РГ к традиционному лечению, длительная сохранность гипотензивного эффекта обеспечивается имплантацией различного типа дренажей [1]. В практике отечественной и зарубежной офтальмологии сделаны многочисленные попытки имплантации дренажей для предупреждения блокады сформированных путей оттока внутриглазной жидкости. Ведущим направлением в хирургии рефрактерных глауком является поиск биосовместимых материалов для создания эксплантодренажей, изготовленных из различных полимерных материалов медицинского класса чистоты [2, 3].

Наибольший интерес вызывает использование в качестве эксплантодренажа небиологического типа пористых мембран на основе полимеров различной природы. Так, в работе [4] в качестве эксплантодренажа были использованы трековые мембраны из полиэтилентерефталата. Технология изготовления этих мембран такова, что позволяет получать в исходных полимерных пленках поры

цилиндрической формы строго калиброванного диаметра [5], что является основным их достоинством. Кроме того, мембраны данного типа не подвергаются биодеструкции и могут находиться в интрасклеральной полости в течение нескольких лет. Однако, как показали проведенные исследования [4, 6], они имеют следующие недостатки: 1) на их поверхности адсорбируется белок, элементы крови, экссудата, которые рано или поздно приводят к закупориванию пор в дренаже; 2) вокруг дренажа образуется соединительно-тканная капсула, состоящая из плотных коллагеновых волокон; 3) в отдаленном периоде блокируется просвет между дренажом и фиброзно-измененной капсулой, окружающей его, что приводит к повышению внутриглазного давления и необходимости выполнения повторного хирургического вмешательства.

В этой связи работы по поиску новых форм эксплантодренажа для хирургического лечения рефрактерной глаукомы является весьма актуальной задачей. На наш взгляд, перспективным направлением создания биосовместимого эксплантодренажа для антиглаукоматозных операций заключается в модификации поверхности пористых полимерных материалов. Для этого могут быть использованы различные методы на основе физико-химического воздействия. Наибольшее распространение для этой цели получил метод обработки мембран в низкотемпературной плазме [7], важным преимуществом которого является возможность модификации свойств тонкого поверхностного слоя мембран, приводящего к изменению целого ряда их свойств — адсорбционных, транспортных и селективных. Основная масса матрица мембраны при этом не изменяется, что, несомненно, важно с точки зрения сохранения их механических и физико-химических свойств.

Целью настоящей работы являлось исследование процессов взаимодействия ВЧ-разряда в среде неполимеризующихся газов с поверхностью поли-

этилентерефталатных трековых мембран (ПЭТФ ТМ), изучение поверхностных свойств модифицированных в плазме мембран и химической структуры их поверхностного слоя, а также проведение экспериментальных (доклинических) исследований по применению ПЭТФ ТМ с модифицированной (наноструктурированной) поверхностью в качестве эксплантодренажа для хирургического лечения рефрактерной глаукомы.

Материалы и методы

В экспериментах использовали трековые мембраны с эффективным диаметром пор 0,2 мкм (плотность пор $2 \cdot 10^8 \text{ см}^{-2}$) и 0,4 мкм (плотность пор $5 \cdot 10^7 \text{ см}^{-2}$), которые получали облучением пленок из полиэтилентерефталата (лавсан, Россия) толщиной 10,0 мкм ускоренными на циклотроне У-400 ионами криптона с энергией $\sim 1 \text{ МэВ/нуклон}$ с последующей физико-химической обработкой по стандартной методике [5]. Обработку мембран в плазме проводили на плазмохимической установке с использованием ВЧ-разряда переменного тока с частотой 13,56 МГц. Образцы мембран размерами $10 \times 10 \text{ см}$, закрепленные на плоском держателе, размещали в вакуумной камере установки в зоне действия плазмы. Воздействию плазмы подвергали обе стороны мембран. В качестве плазмообразующего газа применяли азот, воздух и смесь азота с кислородом в различном соотношении. Параметры разряда (давление газа в вакуумной камере, мощность разряда) и длительность воздействия плазмы варьировали. Методика обработки и схема плазмохимической установки подробно описаны в работе [8].

Характеристики исходных мембран и мембран, модифицированных в плазме, определяли при помощи ряда взаимодополняющих методик. Изменение толщины мембран регистрировали с помощью электронного измерителя толщины «Tesa Unit» (Австрия), точность измерений составляла $\pm 0,1 \text{ мкм}$. Газопроницаемость мембран (поток воздуха, прошедший через мембрану) измеряли при заданном перепаде давления с помощью поплавкового расходомера. На основании полученных значений, используя формулу Хагена-Пуазейля [9], рассчитывали эффективный диаметр пор (погрешность 3 %). Исследование микроструктуры образцов, а также определение диаметра пор на поверхности мембран проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа «JSM-840» (JEOL) с разрешением 10 нм. Перед просмотром на образцы напыляли в вакууме тонкий слой золота.

Изменения в поверхностном слое мембран изучали с помощью метода многократного нарушенного полного внутреннего отражения ИК-спектроскопии. В эксперименте использовали призмы из Ge и стекла KRS-5 с углами 45 и 55° и числом отражений соответственно 24 и 14. Использовали спектрофотометр «Specord M-80» (Carl Zeiss Jena). Отнесение полос поглощения проводили согласно [10]. Измерение краевого угла смачивания опреде-

ляли методом сидящей капли с помощью горизонтального микроскопа, снабженного гониометром, по методике [9]. Для измерений использовали воду (бидистиллят), точность измерений составляла $\pm 1^\circ$. Водопроницаемость измеряли при заданном перепаде давления с помощью стандартной фильтрационной установки ФМО-2 (Россия) на образцах мембран площадью 254 мм^2 . Использовали предварительно очищенную фильтрацией через ПЭТФ ТМ с диаметром пор 50 нм дистиллированную воду. До начала фильтрации мембраны выдерживали в водном растворе в течение 20 мин. Заряд поверхности пор мембран определяли методом потенциала течения [9] при фильтрации 10^{-3} М раствора хлорида калия под действием созданного на мембране перепада давления.

Экспериментальные исследования по применению ПЭТФ ТМ с наноструктурированной поверхностью в качестве эксплантодренажа для антиглаукоматозных операций проводили на базе клиники Саратовского государственного медицинского университета им. В.И. Разумовского. Для этого образцы мембран предварительно стерилизовали в кипящей дистиллированной воде или в автоклаве при температуре 150°C . После этого дренаж через роговичный разрез на 12-и часах [11] размером $1 \times 2 \text{ мм}$ имплантировали в переднюю камеру глаз кроликов породы шиншилла и в интрасклеральный карман, сформированный в 3 мм от лимба, с последующим наложением швов на края раны. Воспалительную реакцию глаза оценивали по шкале Л.С. Чабровой [11].

В эксперименте проводили определение токсического действия эксплантодренажа на окружающие ткани. Наличие белков во влаге передней камеры при этом моделировало реакцию тканей в организме, а прозрачность тканей позволяла оценить контакт белков с поверхностью имплантата. Исследование цитотоксичности дренажей проводили на клеточной культуре фибробластов мышей линии 3ТЗ клона SC-1. В качестве экстрагирующих сред использовали стерильный раствор натрия хлорида и питательную среду Игла с добавлением эмбриональной телячьей сыворотки. Клетки фибробластов высевали в чашки Петри в концентрации 40 тыс./мл, инкубировали в течение суток при температуре 37°C . Затем каждый экстракт вносили на монослой фибробластов. Спустя 24 ч оценивали лизис клеток, их морфологию и количество.

Морфологическое исследование тканей глаз, полученных в эксперименте, проводили на 30 кроликах породы шиншилла. Вторичную глаукому моделировали введением 1 % раствора Януса зеленого в переднюю камеру глаза. Глаукома развивалась в течение одного месяца. Средний уровень внутриглазного давления до операции составлял $35 \pm 3 \text{ мм рт.ст.}$. Антиглаукоматозное вмешательство выполняли с имплантацией дренажа у кроликов породы шиншилла (30 глаз). При последующем гистологическом исследовании серийные срезы глаз окрашивали гематоксилин-эозином по Ван-Гизон.

Методом ретроспективного анализа в контрольной группе исследовано 42 глаза 21 кролика породы шиншилла, которым после моделирования вторичной глаукомы проводили имплантацию дренажа из ПЭТФ ТМ с немодифицированной поверхностью. Эти животные были прооперированы с 1993 по 1996 гг. Результаты исследований подробно изложены в [6].

Результаты и их обсуждение

Исследование процесса воздействия плазмы воздуха на полиэтилентерефталатные трековые мембраны обоих типов позволили установить следующий ряд закономерностей. Во-первых, при обработке ПЭТФ ТМ в плазме ВЧ-разряда в воздухе происходит травление как внешней поверхности мембран, так и поверхности пор, сопровождающееся уменьшением толщины мембран и увеличением их эффективного диаметра пор (табл. 1). Результат газоразрядного травления пор трековых мембран иллюстрируется рис. 1, на котором представлены микрофотографии поверхностей исходной и обработанной в плазме воздуха мембран. Можно видеть, что диаметр пор на поверхности модифицированной мембраны выше в сравнении с контрольным образцом. Как показывают эксперименты, скорость травления зависит от величины параметров разряда (давления плазмообразующего газа и мощности разряда) — при увеличении параметров разряда скорость травления возрастает (табл. 1).

На величину скорости травления также влияет изменение состава плазмообразующего газа. Так, замена воздуха на азот снижает скорость травления — эффективный диаметр пор мембран, полученных травлением в плазме азота, как правило, на 15...20 % меньше диаметра пор аналогичных мембран, образуемых в плазме воздуха. Скорость травления, оцененная из графика зависимости эффективного диаметра пор от времени травления (рис. 2), в плазме воздуха равна $2,9 \cdot 10^{-3}$ мкм/мин, в плазме азота вдвое ниже — $1,0 \cdot 10^{-3}$ мкм/мин (измерения проведены при давлении газа 22,5 Па и мощности разряда 250 Вт). Варьирование соотношения азота и кислорода в составе плазмообразующего газа показывает, что при повышении концентрации кислорода происходит увеличение скорости травления. Введение кислорода в состав газа, таким образом, повышает активность плазмы. Использование в качестве плазмообразующего газа чистого кислорода позволяет значительно повысить скорость травления, что дает возможность интенсифицировать процесс газоразрядного травления (рис. 2).

Во-вторых, воздействие плазмы неплатимизирующихся газов на трековые мембраны приводит к образованию асимметричных мембран — форма пор мембран, образуемых в процессе газоразрядного травления, изменяется. При этом, как показали результаты ранее проведенных исследований [8, 12], в зависимости от выбранных параметров разряда травление можно производить либо в части

канала, либо по всей длине каналов пор. В обоих случаях образуются трековые мембраны, имеющие асимметричную форму пор. Наибольший интерес представляют мембраны, у которых травлению подверглась только часть каналов пор. В результате газоразрядного травления в слое таких мембран формируются конусообразные углубления, увеличивающие объемную пористость, что отражается на поведении мембран в процессе фильтрации — производительность по воде асимметричных мембран выше в сравнении с исходной мембраной (табл. 1). Незатронутый в процессе травления слой, структура которого остается без изменения, определяет селективные свойства мембран. Незначительные изменения в данном слое при обработке в плазме не вызывают заметного снижения селективности разделения.

Таблица 1. Изменение характеристик мембран* в процессе обработки в плазме воздуха. Длительность воздействия плазмы 10 мин

Режим обработки		Толщина, мкм	Краевой угол смачивания, град	Эффективный диаметр пор, мкм		Водопроницаемость при $\Delta P=4 \cdot 10^4$ Па, мл/мин·см ²	
Давление газа, Па	Мощность разряда, Вт			Мембрана I	Мембрана II	Мембрана I	Мембрана II
—	—	10,0	65	0,220	0,395	2,2	5,4
0,15	70	9,9	20	0,230	0,405	2,7	6,7
0,25	70	9,8	25	0,235	0,425	3,1	7,6
4,0	70	9,4	30	0,245	0,445	3,6	8,4
10,5	70	9,0	35	0,255	0,460	4,1	9,1

*Мембрана с диаметром пор: I — 0,2; II — 0,4 мкм.

В-третьих, воздействие плазмы неплатимизирующихся газов на ПЭТФ ТМ приводит к изменению свойств их поверхностного слоя. Это подтверждается данными ИК-спектроскопии обработанных в плазме образцов мембран (табл. 2). При анализе ИК-спектров обработанных в плазме воздуха образцов мембран, записанных с использованием призмы из германия, средняя глубина проникновения ИК-излучения в образец 0,69 мкм, обнаружено увеличение интенсивности полосы поглощения 1720 см^{-1} , связанной с валентными колебаниями карбонила (C=O) карбоксильных групп. При варьировании параметров плазменного разряда наблюдается изменение концентрации поверхностных групп: повышение мощности разряда и давления плазмообразующего газа вызывает образование большего числа функциональных групп.

Обработка в плазме воздуха, таким образом, приводит к повышению содержания в поверхностном слое мембран карбоксильных групп, образование которых может быть объяснено следующим. При воздействии активных частиц плазмы происходит деструкция полимерных цепей на поверхности, причем преимущественно в аморфной фазе, обладающей меньшей плотностью и потому более подверженной окислению [13]. Увеличение содер-

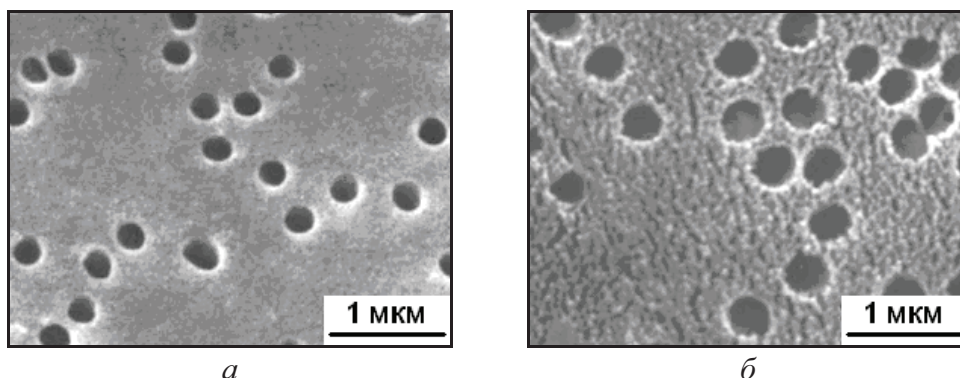


Рис. 1. Электронные микрофотографии поверхностей исходной ПЭТФ ТМ с эффективным диаметром пор 0,2 мкм (а) и обработанной в плазме воздуха мембраны (б); параметры разряда: давление газа в вакуумной камере 0,25 Па, мощность разряда 100 Вт, длительность воздействия 10 мин

жания карбоксильных групп в поверхностном слое мембран приводит к повышению отрицательного заряда пор. Действительно, измерение методом потенциала течения поверхностного заряда пор мембран, обработанных в плазме воздуха, показывает, что на их поверхности в водных растворах образуется больший отрицательный заряд в сравнении с исходной мембраной. Для примера укажем следующее. Если величина заряда поверхности пор исходной ПЭТФ ТМ с диаметром пор 0,4 мкм составляет $1,17 \cdot 10^{-2}$ Кл/м², то для модифицированной в плазме воздуха (при давлении газа в вакуумной камере 13,5 Па и мощности разряда 300 Вт) мембраны эта величина составляет $1,62 \cdot 10^{-2}$ Кл/м².

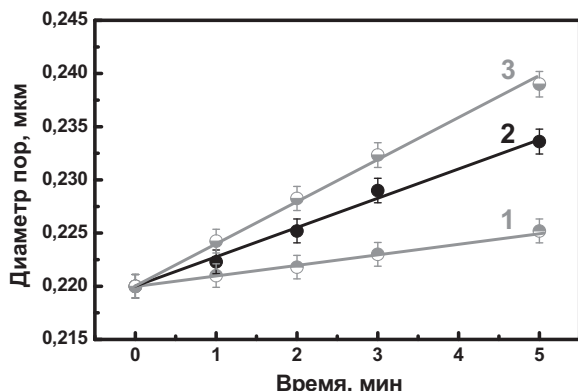


Рис. 2. Зависимость эффективного диаметра пор ПЭТФ ТМ с диаметром пор 0,2 мкм от времени травления в плазме азота (1), воздуха (2) и кислорода (3); параметры разряда: давление газа 22,5 Па, мощность разряда 250 Вт

Для характеристики структурных изменений, возникающих в мембранах при их обработке в плазме, были рассчитаны соотношения интенсивностей I полос поглощения при 1473 и 1455, 1343 и 1370, 973 и 1043 см⁻¹. Полосы поглощения при 1473 и 1343 см⁻¹ характеризуют деформационные колебания СН₂-групп в транс-конформации, а 1455 и 1370 см⁻¹ — деформационные колебания в гош-конформации. Полосы поглощения 973 и 1043 см⁻¹ относят к колебаниям всей цепи кристаллической и аморфной фазы соответственно. Измерения по-

казывают (табл. 2), что в результате обработки в плазме воздуха при низких значениях давления газа в вакуумной камере разряда происходит аморфизация поверхностного слоя мембран вследствие деструкции полимерных цепей. При увеличении давления в газовой фазе наблюдается ориентация на поверхности полимера. При сравнении ИК-спектров модифицированных мембран и исходной, записанных обычным способом и с использованием призмы KRS-5 (средняя глубина проникновения ИК-излучения в образец — около 1,5 мкм), не обнаруживается каких-либо изменений — сигнал от объемного слоя образца в этом случае перекрывает слабый сигнал от поверхностного слоя. Это указывает на то, что изменения при обработке ПЭТФ мембран в плазме исследуемого газа происходят в тонком поверхностном слое, не затрагивая объема полимерной матрицы.

На основании вышеизложенного можно заключить, что обработка ПЭТФ ТМ в плазме воздуха приводит к образованию на их поверхности тонкого модифицированного слоя с нарушенной структурой, содержащего деструктированные макромолекулы с окисленными группами в местах разрыва химических связей. Воздействие плазмы вызывает, кроме того, значительные морфологические изменения поверхности. На первоначально гладкой полимерной поверхности появляются многочисленные кратеры — окисленно-деструктированные области, возникновение которых объясняется различием скоростей травления аморфных и кристаллических областей полимера [13]. Поверхность мембран становится шероховатой (рис. 1, б). Размеры кратеров при варьировании условий обработки и длительности воздействия разряда изменяются.

Развитие эрозии поверхности мембран и их гидрофилизация обуславливают повышение смачиваемости — величина краевого угла смачивания мембран существенно уменьшается (табл. 1). Сравнительный анализ данных табл. 1 показывает, что изменение параметров разряда влияет на величину предельного значения краевого угла смачивания. Уменьшение давления плазмообразующего газа при определенной мощности разряда и длительно-

сти обработки способствует достижению меньшего значения величины краевого угла смачивания. Проведенные аналогичные исследования позволили установить, что увеличение мощности разряда также способствует достижению предельного значения величины краевого угла смачивания за более короткое время воздействия. Увеличение содержания карбоксильных групп в поверхностном слое мембран, вызывающее повышение отрицательного заряда пор в растворе, а также развитие шероховатости поверхности и приводят к положительному результату – уменьшению адсорбции белков и других составляющих внутриглазной жидкости (их диаметр около 0,2 мкм), а также клеток крови [14]. Данный результат обусловлен отталкиванием молекул белков, имеющих в водном растворе также отрицательный заряд.

Таблица 2. Результаты ИК-спектрофотометрического исследования модифицированных в плазме воздуха ПЭТФ ТМ с диаметром пор 0,2 мкм

Режим обработки*		Увеличение концентрации СООН-групп, %	Соотношение интенсивностей полос			Изменения в структуре поверхности мембран
Давление воздуха, Па	Мощность разряда, Вт		I_{1473}/I_{1455}	I_{1343}/I_{1370}	I_{973}/I_{1043}	
–	–	–	4,0	5,15	2,10	–
0,15	70	4	3,85	4,95	2,00	Аморфизация
0,25	70	7	3,75	4,75	1,95	Аморфизация
4,0	70	19	3,55	4,5	1,80	Аморфизация
10,5	70	28	4,35	5,65	2,45	Кристаллизация

*Длительность воздействия плазмы 10 мин.

Экспериментальные исследования ПЭТФ ТМ с наноструктурированной поверхностью в качестве экплантодренажа приводят к следующим результатам. При определении токсического действия экплантодренажа на окружающие ткани после имплантации его в переднюю камеру глаз кроликов опытной группы воспалительная реакция у животных соответствовала 0 степени воспаления в 25 случаях и в 5 случаях – 1 степени (слабо выраженная реакция), и полностью купировалась на 7 день после стандартного противовоспалительного лечения. Во всех случаях определялись плоские разлитые фильтрационные подушечки. Слизистая оболочка над фильтрованной подушкой была хорошо васкуляризирована. Не было выявлено избыточного рубцевания или формирования псевдокистозных полостей. Спустя две недели уровень внутриглазного давления составил $17,6 \pm 2,6$ мм рт. ст. Эта тенденция сохранялась в течение 12 месяцев. В то же время в контрольной группе животных уровень внутриглазного давления составил $19,1 \pm 2,3$ мм рт. ст., что на 8,5 % выше по сравнению с опытной группой животных.

При морфологическом исследовании ПЭТФ ТМ с наноструктурированной поверхностью было

установлено, что в тканях, окружающих имплантат, отсутствовали выраженные реактивные воспалительные изменения. Вокруг дренажа формировалась тончайшая соединительно-тканная капсула с единичными фибробластами и фиброцитами. При имплантации дренажей, обработанных в плазме кислорода, между имплантатом и склерой капсула отсутствовала. Определялись лишь единичные участки нежной волокнистой соединительной ткани и свободное пространство на всем протяжении. Анализ экспериментальных данных также показал, что наибольшая бактерицидная активность выявлена у образцов, имеющих максимально развитый рельеф. Корреляция результатов исследования заряда и анализ данных позволяют утверждать, что один из механизмов, по которому протекает взаимодействие наноструктурированной поверхности имплантата с микроорганизмами связан с электростатическим взаимодействием, а интенсивность второго механизма связана со степенью дисперсности наноструктурированной поверхности.

Заключение

Воздействие плазмы ВЧ-разряда в неполимеризующихся газах на полиэтиленерефталатные трековые мембраны приводит к образованию асимметричных трековых мембран с повышенной производительностью, структура и химический состав поверхностного слоя которых изменены – наноструктурированы. Наличие наноструктурированного слоя на поверхности мембран вызывает изменение целого ряда свойств ПЭТФ ТМ. Увеличение содержания карбоксильных групп в поверхностном слое мембран приводит к повышению степени их гидрофильности. Развитие эрозии поверхности мембран и их гидрофилизация обуславливают повышение смачиваемости ПЭТФ ТМ, величина которой зависит от интенсивности разряда и длительности его воздействия.

Увеличение содержания карбоксильных групп в поверхностном слое мембран, вызывающее повышение отрицательного заряда пор в растворе, а также развитие шероховатости поверхности мембран позволяют избежать формирования вокруг них грубой соединительно-тканной капсулы и добиться длительного сохранения сформированных путей оттока внутриглазной жидкости при проведении антиглаукоматозных операциях. Разработанный дренаж не обладает местно-раздражающим, сенсibilизирующим действием и соответствует требованиям, предъявляемым к изделиям, постоянно контактирующим с внутренней средой глаза. Полученные результаты показывают, что ПЭТФ ТМ с наноструктурированной поверхностью может быть успешно использован в качестве дренажа при хирургическом лечении рефрактерной глаукомы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тахчиди Х.П., Чеглаков В.Ю. Дренажи в хирургии рефрактерной хирургии // Рефракционная хирургия и офтальмология. – 2009. – Т. 9. – № 3. – С. 11–15.
2. Чеглаков Ю.А. Эффективность глубокой склерэктомии с эксплантодренированием в лечении поствоспалительной и посттравматической глаукомы // Офтальмохирургия. – 1989. – № 3–4. – С. 34–38.
3. Паштаев Н.П., Горбунова Н.Ю. Отдаленные результаты применения сетчатого дренажа из дигеля в хирургическом лечении рефрактерных глауком // Офтальмохирургия. – 2006. – № 2. – С. 11–15.
4. Сапрыкин П.И., Рязанцева Т.В. Эксплантодренирование в хирургии вторичной глаукомы // Офтальмохирургия. – 1995. – № 3. – С. 22–25.
5. Флеров Г.Н. Синтез сверхтяжелых элементов и применение методов ядерной физики в смежных областях // Вестник АН СССР. – 1984. – № 4. – С. 35–48.
6. Рязанцева Т.В. Эксплантодренирование ядерной мембраной в хирургии некоторых форм вторичной глаукомы (клинико-экспериментальное исследование): дис. ... канд. мед. наук. – Самара, 1996. – 120 с.
7. Кравец Л.И., Дмитриев С.Н., Гильман А.Б. Модификация свойств полимерных мембран под воздействием низкотемпературной плазмы // Химия высоких энергий. – 2009. – Т. 43. – № 3. – С. 227–234.
8. Dmitriev S.N., Kravets L.I., Sleptsov V.V. Modification of track membrane structure by plasma etching // Nucl. Instr. and Meth. B. – 1998. – V. 142. – № 1–2. – P. 43–49.
9. Мулдер М. Введение в мембранную технологию / Пер. с англ. под ред. Ю.П. Ямпольского, В.П. Дубяги. – М.: Мир, 1999. – 513 с.
10. Беллами Л. Инфракрасные спектры сложных молекул. – М.: Иностран. лит-ра, 1963. – 590 с.
11. Национальное руководство по офтальмологии / под ред. С.Э. Аветисова, Е.А. Егорова, Л.К. Мошетовой, В.В. Нероева, Х.П. Тахчиди. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2008. 940 с.
12. Kravets L.I., Dmitriev S.N., Sleptsov V.V., Elinson V.M. Production of asymmetric track membranes by gas-discharge method // Surf. Coat. Technol. – 2003. – V. 174–175. – P. 821–825.
13. Чалых А.Е., Петрова И.И., Василенко Ж.Г., Герасимов В.И., Брусенцова В.Г. Применение метода газоразрядного травления для изучения структуры кристаллических полимеров // Высокомолекулярные соединения. – 1974. – Т. 16А. – № 6. – С. 1289–1295.
14. Kamath S., Bhattacharyya D., Padukudru C., Timmons R.B., Tang L. Surface chemistry influences implant-mediated host tissue responses // J. Biomed. Mater. Res. Part A. – 2008. – V. 86. – № 3. – P. 617–626.

Поступила 10.11.2011 г.

УДК 62-729.3/.-732:629.63.6:66.046.1

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ И ПОДОГРЕВА ТОПЛИВА В МОБИЛЬНЫХ МАШИНАХ

Э.И. Удлер, П.В. Исаенко, Д.В. Халтурин, А.В. Лысунец

Томский государственный архитектурно-строительный университет
E-mail: dmitriihalturin@mail.ru

Предложены методы расчета системы подогрева и очистки топлива в топливных системах машин с дизельными двигателями. Адекватность теоретических представлений показана на примере конструкции фильтра для очистки и подогрева топлива в процессе эксплуатации машины при низких температурах.

Ключевые слова:

Дизельное топливо, эффективность очистки, фильтрация, подогрев.

Key words:

Diesel fuel, efficiency of purifying, filtration, heating.

Значительная часть современных мобильных машин оснащена двигателями, работающими на дизельном топливе. Для обеспечения требуемой чистоты по ГОСТ 305-87 стандартная топливная система машины имеет двух-, а иногда и трехступенчатую очистку с помощью последовательно установленных фильтров грубой (ФГО) и тонкой (ФТО) очистки. Однако на практике работоспособность машин зачастую нарушается из-за прекращения подачи топлива, вплоть до полной остановки машины. Характерной особенностью отказов, особенно в условиях пониженных температур, является изнашивание прецизионных деталей топливной системы вследствие проникновения в зазоры трущихся пар абразивных частиц и воды, циркулирующих с топливом [1–3].

Процесс изнашивания интенсифицируется при эксплуатации машин, не имеющих в топливной системе смесителей-подогревателей (как в иных машинах северного исполнения), но работающих в условиях низких температур. В этом случае происходит парафинизация топлива и образование в нем кристаллов льда, блокирующих поровую структуру ФТО. Вывод очевиден: защита топливной системы с помощью фильтров в штатном исполнении от изнашивания недостаточно эффективна [2].

Специалисты считают, чтобы решить существующую проблему, необходимо совершенствовать топливную систему машин путем замены агрегатов очистки топлива на другие, конструктивно отличающиеся от типовых, либо модернизировать