УДК 66.087

А.М.Акимхан, Д.Лисюков

Достижения и перспективы в области получения полимерных нановолокон методом электроспиннинга

*Проведен анализ современных достижений в области разработки полимерных волокон методом электроспиннинга. Приведены передовые достижения в направлении получения различных материалов методами электроспиннинга из раствора и расплава полимера. Описаны технологические параметры получения нановолокон с желаемой морфологией и диаметром. Отмечены мировые тренды использования полимерных волокон в медицинской практике*.

*Ключевые слова: электроспиннинг, нановолокно, формование, полимеры, нановолоконные мембраны*

Электроспиннинг – универсальный метод получения непрерывных волокон с диаметром от нескольких нанометров до микро-метров из растворов или расплавов полимеров [1]. Эта техника применима практически к каждому из растворимых или плавких полимеров. Полимеры могут быть химически модифицированы различными добавками, начиная от простых частиц сажи, комплексных соединений, до ферментов, вирусов и бактерий. На первый взгляд электроспиннинг кажется простым, но это довольно сложный процесс, который зависит от множества молекулярных процессов и технических параметров [2]. Данный метод обеспечивает доступ к совершенно новым материалам, которые могут иметь сложную химическую структуру. В настоящее время электроспиннинг находится в центре не только интенсивных академических исследований, но и применяется во многих технологических областях. Классическая схема установки приведена на рис.1.



Рис.1. Типичное устройство электроспиннинга [3]

Интерес к технологии электроформования (электроспиннинга), впервые в мире созданной в лаборатории И. В. Петрянова остается огромным. Сотни лабораторий в мире интенсивно занимаются разработкой новых волокнистых материалов из различных (их уже более сотни) полимеров для тех или иных приложений (медицина, катализ, конструкционные материалы, сорбция и др.). Электроспиннинг стал чрезвычайно популярным в последнее время. Произошло это благодаря развитию нанотехнологий. Оказалось, что с его помощью можно получать нановолокна из самых разных материалов – полимеров, композитов, полупроводников, металлов, даже керамики. Более того, используя различные конструкции и модификации аппаратуры, можно in situ формировать ансамбли нановолокон, расширяющие возможности применения. Электроспиннинг заинтересовал и нанобиотехнологов, в частности, для производства волокон медицинского назначения.

Для синтеза углеродных нановолокон с наночастицами Pd японские и корейские ученые модифицировали методику следующим образом [3]. Они добавили в раствор полимерного прекурсора (полиакрилонитрила) хлорид палладия. Полученные нановолокна стабилизировали термообработкой на воздухе. Стабилизация на воздухе – важный шаг для превращения органических волокон в углеродные без нарушения морфологии волокна. Катионы палладия, захваченные волокном при его формировании в процессе электроспиннинга, при этом превращаются в наночастицы оксида палладия диаметром менее 10 нм. Затем проводили термообработку в атмосфере аргона, которая приводит к появлению на внешней поверхности волокон равномерно распределенных круглых наночастиц металлического палладия (100- 200 нм). Данные сканирующей электронной микроскопии для нановолокон на разных стадиях синтеза приведены на рис.2.

|  |  |
| --- | --- |
|   | electrosp2.jpgРис.2. Микрофотографии полученных нановолокон (а,b); нановолокон после стабилизации на воздухе (c,d) и после термообработки в атмосфере аргона(e-h).   |

Такой способ получения нановолокон, декорированных наночастицами металла, имеет ряд преимуществ перед обычным синтезом нановолокон или нанотрубок на катализаторах: 1) не нужно удалять частицы катализатора, 2) нановолокна могут быть получены в виде тонкой ткани, 3) частицы Pd частично внедрены в волокно и поэтому прочно связаны с его внешней поверхностью.

Этим методом, по мнению ученых, могут быть получены материалы на основе углеродных волокон с наночастицами различных металлов (например, Au, Ag, Pt, Ru, Rh, Os, Ir), которые без дальнейшей обработки могут использоваться как эффективные электроды (нано-Pt), в био/газовых сенсорных (нано- Au) и противомикробных (нано-Ag) устройствах, в качестве фильтров и др. Таким образом, возможные области применения не ограничиваются физикой, химией, материаловедением и технологией, но также включают медицину и биологию

Хотя в электроспиннинговом процессе не всегда используется стационарный режим струйного течения прядильных растворов, достаточно очевидно, что он более предпочтителен в качестве наиболее простого и понятного эталона как при теоретическом анализе этого процесса, так и в промышленной технологии, обеспечивая ей большую управляемость и предсказуемость желаемых свойств волокнистой продукции. Поэтому начальным шагом в теории процесса электроспиннинга должно быть определение условий, при которых капельное течение раствора из дозирующего капиллярного сопла переходит в стационарную струю [4]. Однако на данный момент не существует единой теории, позволяющей рассчитать оптимальные параметры для процесса электроспиннинга. Как правило, условия синтезирования нанонитей подбираются эмпирическим путем. Используя процесс электроспиннинга полимеров, можно получать неорганические нановолокна. Можно выделить два главных метода получения неорганических нановолокон: 1) в прядильный раствор (т. е. раствор полимера) вводят неорганические наночастицы, например, углеродные нанотрубки, 2) в формовочный раствор вводят раствор неорганического материала. После получения волокон из таких растворов проводят их термохимическую обработку, в результате которой из волокон удаляется органическая составляющая и остается неорганическая. Затем при необходимости проводят высокотемпературную кристаллизацию полученных неорганических нановолокон. Недостатками первого метода являются ограничения, накладываемые на электропроводность вводимых наночастиц и их концентрацию. Недостатком второго метода является сложность приготовления однородного устойчивого раствора. Для получения однородного формовочного раствора желательно использовать металлоорганические соединения, однако эти соединения, как правило, чувствительны к влаге или кислороду, что сильно усложняет процесс 105 106 О.Я. Березина, Д.А. Кириенко, Н.П. Маркова, А.Л. Пергамент получения бескислородных нановолокон. При получении же нановолокон оксидных соединений эти проблемы перестают быть доминирующими. Благодаря этому в последнее время методом электроспиннинга полимеров получено большое количество нановолокон оксидных соединений.

На процесс электроспиннинга оказывают влияние параметры раствора, установки и окружающей среды. Первый тип параметров включает в себя вязкость, проводимость, поверхностное натяжение, молекулярную массу полимера, дипольный момент и диэлектрическую проницаемость раствора. К параметрам установки относятся скорость подачи раствора, напряженность электрического поля, расстояние между иглой и подложкой, конструкцию иглы, состав и геометрия подложки. И наконец, параметры окружающей среды — это температура, влажность и скорость движения воздуха

Процесс формирования нити при электроспиннинге можно разделить на три стадии: формирование струи жидкого раствора в сопле иглы шприца; дрейф, расщепление и отверждение струи; формирование волокнистого слоя на подложке

Вторая стадия электроспиннинга, включающая в себя расщепление струи жидкости, является важной компонентой процесса. Расщепление струи позволяет формовать нанонити при меньших деформационных нагрузках и формирует спектр радиусов генерируемых волокон. Необходимым условием расщепления струи является превышение электрического давления на поверхности струи над капиллярным.

На финальном этапе электроспиннинга происходят фазовые превращения, включающие в себя молекулярную диффузию растворителя к поверхности нити, испарение растворителя, образование твердой фазы волокнообразующего полимера. Определение оптимальных параметров тепломассообменных процессов (соотношение между разностью потенциалов и расстоянием между иглой и подложкой) происходило эмпирически.

Экспериментальные исследования влияния концентрации полимера, скорости подачи жидкости, разности потенциалов и расстояния между иглой и подложкой накачественные (отсутствие дефектов, капель) и количественные (диаметр и длина) характеристики нанонитей были проведены с использованием рассчитанных критериев. После процесса электроспиннинга и непосредственного синтеза нитей для удаления полимера производится их отжиг в атмосфере влажного азота. После термической обработки диаметр волокон составляет от 80 до 600 nm и зависит от продолжительности и темпера- туры отжига.

Ультратонкие волокна нашли свое применение во многих областях и используются для производства различного рода резин – технических изделий, в качестве фильтровальных и электроизоляционных материалов, для изготовления спецодежды, а также для производства волокон медицинского назначения [5,6,7]. Значительно расширяется применение волокон, обладающих специфическими свойствами: высокая удельная поверхность, бактерицидные свойства, способность к ионообмену и др. В настоящее время исследования в области получения волокон развиваются преимущественно в направлении получения модифицированных и структурированных волокон, синтеза новых полимеров для получения волокон. [8,9]. На характеристики формируемых волокон влияют: параметры раствора (вязкость, проводимость, молекулярный вес, поверхностное напряжение), параметры получения волокон (приложенное электрическое поле, расстояние от наконечника до коллектора, скорость подачи) и параметры окружающей среды (температура, влажность) [10]. Манипулируя технологическими параметрами можно получать нановолокна с желаемой морфологией и диаметром.

Методом электроспининга формовали нановолокна на неподвижной пластине коллектора, в результате чего получали мембраны или маты, которые состоят из хаотически расположенных волокон [11]. Поскольку нановолокна собирались в нетканые листы, взаимодействия между ними были очень слабыми. Нановолокна могли легко просочиться между собой, следовательно, нановолоконные мембраны, полученные данным методом, как правило, обладают плохими механическими свойствами.

 Для получения нановолоконных мембран был использован метод электроспининга с вращающимся коллектором и его применили для изготовления ПИ (полиимид) и МУНТ (многостенные углеродные нанотрубки) / ПИ мембран (рис.3).

****

Рисунок 3. Установка электроспининга с вращающимся коллектором

Для того чтобы продемонстрировать метод с высокоскоростным вращающимся коллектором, с помощью которого можно производить мембраны с выровненными нановолокнами. Для сравнения свойств нановолокон на основе ПАК (полиакриловая кислоты) были собраны на стационарной алюминиевой фольге и на вращающемся коллекторе. Как показано на рис. 4, мембрана, собранная на не вращающемся коллекторе состояла из хаотически ориентированных нановолокон (рис. 4 а), в то время как нановолокна, собранные с помощью метода вращающемся коллектора, выровнены (рис.2б). Также стоить отметить, что поверхность нановолокон, полученных на вращающемся коллекторе была гладкой и на ней практически отсутствовали дефекты (таких как шарики). В процессе электроформования, на вращающемся коллекторе подключенному к отрицательному электроду (напряжение около -5 кВ), для контроля размещения и выравнивания нановолокон отслеживались линии электрического поля приложенного к отрицательно заряженному коллектору. Некоторые нановолокна были запутаны и не могут быть дифференцированы по отдельности или разделены (как показано на рис.4 с). Вероятно, из-за быстрой струи нановолокон и тяги вращающегося коллектора, некоторые из нановолокон контактируют и запутываются друг с другом во время электроформования, кроме того, нановолокна могут быть частично слиты во время (последующего) высокотемпературного процесса имидизации, что также может привести к запутыванию нановолокон. [10]



Рисунок 4. СЭМ микрофотографии аккуратные полиимидных мембран, состоящих из (а) не выровненные нановолокон; (б) выровненные нановолокна под малым увеличением; (с) выровненные нановолокна при большом увеличении; (d) выровненные нановолокна после испытаний на растяжение.

Методом электроспиннинга из водного раствора смеси хлорокиси циркония с поливиниловым спиртом получены волокна, диаметром 100…200 нм, которые после отжига при температуре выше 800 °C содержат только диоксид циркония. Исследовано изменение морфологии керамических нановолокон при изменении температуры отжига [12].

Производство нетканных материаллов, получаемых с использованием метода электроспиннинга уже реальность. Различные материалы, фильтры, полученные и использованием технологий, основанных на электроспиннинге применяются в медицине, сельском хозяйстве. Есть данные о получении нитей из природных белков с помощью электроспиннинга. Из них можно получать биосовместимые перевязочные и ранозаживляющие материалы.

Использование полимеров в медицинской практике является мировым трендом. В настоящее время из полимеров изготавливается более трех тысяч различных видов медицинских изделий. Успехи в этой области определяются сотрудничеством физиков, химиков, медиков. Химическая промышленность выпускает различные полимерные материалы, но специальных полимеров для применения в медицине пока еще недостаточно. Полимеры и имплантируемые изделия медицинского назначения должны обладать определенными физико-химическими свойствами, не оказывать вредного действия на организм человека и сохранять свои свойства при постоянном разрушительном воздействии ферментативных систем живого организма [13].

В настоящее время направленная тканевая регенерация (НТР) с использование мембран, полученных методом электроспининга привлекла широкое внимание, потому что значительное количество зубов может быть сохранено от удаления при заболеваниях пародонта [14]. Мембрана, используемая в технике НТР обеспечивает генерацию новых альвеол и периодонтальной связки тканей, путем выделения поврежденной области от окружающей соединительной ткани[15]. Мембрана для медицинских целей должна обладать специальными свойствами: биосовместимость, механическая стабильность и клиническая работоспособность [16]. НТР мембраны должны дополнительно иметь важную функцию, которая поощряет регенерацию тканей пародонта[17].

В последние годы, различные методы, такие как волоконная связка [18], литье растворителя (solvent-casting technology) [19], фазовая сепарация и выщелачивание [20] были применены для изготовления пористых мембран в качестве перспективного метода регенерации ткани, а также для изготовления волокнистых каркасов из биополимеров для тканевой инженерии, которая восстанавливает и поддерживает биологическую функцию в тканях хозяина [21]. Волокнистые материалы, полученные методом электроспининга, могут обеспечить сверхвысокое поверхностное крепление клеток и высокую пористость биополимеров для внеклеточной регенерации [22].

Электроспиннинг из растворов, имеет ряд недостатков, обусловленных использованием растворителя. А именно, в процессе формования растворитель испаряется и выбрасывается в окружающую среду, что приводит к ее загрязнению и значительно увеличивает себестоимость конечной продукции. Нетканый материал содержит в себе остаточный растворитель, что ограничивает его применение в областях, требующих высокой химической чистоты продукта (например, в медицине). Из–за нерастворимости значительного числа полимеров в «обычных» растворителях значительно сужается диапазон выпускаемой продукции (в ряде случаев полимеры растворимы лишь в малораспространенных и дорогих растворителях при высокой температуре).

 Расплавная технология лишена этих недостатков. Волокна, полученные методом электроспиннинга из расплава имеют ряд преимуществ и представляют высокий интерес для промышленности в связи с высокой рентабельность производства и минимальными расходами по сравнению с технологией из раствора. Отказ от растворителя приводит к более однородной структуре полимерного волокна, полученного с использованием расплавной технологии. Значительно увеличивается производительность технологического процесса. За счет подбора исходного материала и условий процесса формования, а также включения различных добавок можно создавать материалы, обладающие комплексом специфических свойств и предназначенные для решения конкретных промышленных задач. В «расплавном» методе на первый план выходят проблемы, связанные с высокой вязкостью расплавов, которая превышает вязкость растворов полимеров. Высокая вязкость расплава затрудняет расщепление волокон и требует применения более мощных электрических полей. В результате средняя толщина микроволокон получается большей, чем при использовании растворного метода.

Первые волокна из расплавов полимеров методом электроспининга были получены в 1981 г. Так разработаны волокна из «раствора-расплава» полиэтилена в парафине и, что более важно из чистого расплава полипропилена. Диаметр этих волокон превышал 50 мкм. Тогда и было отмечено, что можно управлять размером полученных волокон, регулируя температуру расплава и прикладываемое напряжение, а также установлено, что вязкость является наиболее существенным параметром при получении волокон из расплава полимера [23].

Нановолокна, полученные методом электроспининга из расплава полимера представляют высокий интерес для проведения исследований. В них отсутствуют примеси высокотоксичных растворителей. Важно отметить и экономическую составляющую, поскольку в расплавной технологии исключается применение растворителей.

Электроспиннинг является перспективным методом изготовления кровеносных сосудов [24].

В современной реконструктивной хирургии сердца и сосудов широко используются имплантаты из полимеров, которые помимо биологической инертности, должны иметь высокую механическую прочность, определенную структуру, а главное – не вызывать образования тромбов на своей поверхности при контакте с кровью. Сосудистых протезов, удовлетворяющих всем перечисленным свойствам, в настоящее время нет. Поэтому в этом направлении ведутся интенсивные исследования. К примеру, исследования, проведенные по оптимизации параметров электроспиннинга для создания сосудистого графта из поликапролактама (PCL) показали, что лучшими свойствами обладает протез, изготовленный из 14 % полимера при 15 кВ [25]. Результаты эксперимента in vivo демонстрировали заселение стенок PCL-графта, изготовленного методом электроспиннинга, клетками с образованием новой ткани. Способность графта функционировать достаточно длительный период – до 10 месяцев, делает его перспективной основой для выращивания кровеносных сосудов.

На сегодняшний день тканеинженерные сосудистые графты малого диаметра являются перспективной альтернативой аутотрансплантатам для проведения шунтирующих операций. Так, проведена оценка физико-механических свойств, морфологии и диаметра волокон PCL (поликапролактон) -графтов, изготовленных при различных параметрах электроспиннинга. Кроме того, изучено влияние напряжения и концентрации полимера в растворе на структуру, прочность и эластичность полимерных матриксов. PCL-графт с внутренним диаметром 2 мм с оптимальными свойствами имплантировали в брюшную аорту крысы сроком на 10 месяцев. Мониторинг проходимости графтов осуществляли с помощью ультразвукового исследования с допплерометрией каждые 2 месяца. Исследование эксплантированных кондуитов свидетельствовало о сохранении проходимости и клеточной инфильтрации стенок с образованием внеклеточного матрикса. Однако было отмечено образование анастигматического тромба в просвете исследуемого графа, что приводит к необходимости его дальнейшей анти тромботической модификации.

Изучение PCL-графтов с помощью сканирующей электронной микроскопии показало изменение поверхности материала с увеличением концентрации полимера. Средний диаметр волокон при напряжении 15 кВ составил 446 нм, 1,78 мкм, 2,01 мкм,2,74 мкм и при 25 кВ – 84 нм, 1,12 мкм,2,62 мкм, 2,68 мкм для концентраций 10, 12, 14 и 16 % соответственно (Рис 1). Полученные результаты свидетельствовали об увеличении диаметра волокна с возрастанием концентрации раствора PCL.



Рис. 4. Зависимость диаметра волокна от концентрации PCL при напряжении электроспиннинга 15 и 25 кВ

\* – p<0,05 относительно 10 и 12% PCL при 15 и 25 кВ

\*\* – p<0,05 относительно 14% PCL при 15 кВ

Развитие методов изготовления кровеносных сосудов и модификации их поверхности позволит перейти к решению важнейших задач теоретической и практической медицины.

В качестве медицинских биополимеров различного назначения широко используются биодеградируемые полимерные материалы с высокой биосовместимостью, которые выполняют временную функцию и разлагаются в организме. Это делает их предпочтительным, а в отдельных случаях незаменимым материалом. Наибольшее применение в медицине нашли полилактид (PLA), поли-β-гидроксибутират-валерат (PGBV), поликапролактон (PCL) и их сополимеры.

Для получения полимерных растворов на основе биодеградируемого полимера PGBV и его сополимеров (PGBV-PCL и PGBV-PLA), соответствующие полимеры растворяют CHCl3и смешивают друг с другом [26].

Таким образом, возможные области применения электроспиннинга не ограничиваются физикой, химией, материаловедением и технологией, но также включают медицину и биологию. Нетканые волокнистые материалы, получаемые методом электроформования, находят широкое применение в различных отраслях промышленности. Материалы из волокон субмикронного диаметра используются для высокоэффективной фильтрации высокодисперсных аэрозолей в системах очистки газовоздушных выбросов и средствах защиты органов дыхания, аналитических фильтрах для контроля уровня загрязненности воздуха. Полученные методом электроформования слои из нановолокон включаются в композиционные текстильные материалы нового поколения для обеспечения регулируемой водо- и паропроницаемости, антимикробных и антивирусных барьерных свойств. Производство нетканых волокнистых материалов из биосовместимых и биодеградируемых полимеров открывает широкие перспективы для их использования в медицинских приложениях при создании перевязочных средств, заменителей тканей, систем контролируемой доставки лекарственных средств и др.

Список литературы

1. Li D., Wang Y., Xia Y. Electrospinningnanofibers as uniaxially aligned arrays and layer by-layer stacked films/ / Adv. Mater.– 2004.-V.16.–N.4–361-366.
2. Zdraveva E., Pejnovic N., Mijovic B. Electrospinning of polyurethane nonwoven fibrous mats // TEDI. -2011.–V.1 – N.1 - P.55– 60.
3. Новый способ получения композиционных материалов «наночастица - углеродное нановолокно» // **Экспресс-бюллетень “ПерсТ”**
(**Перс**пективные **Т**ехнологии - наноструктуры, сверхпроводники, фуллерены. 2008.-Т.15.- Вып.23.-С.5-6. http://perst.issp.ras.ru/
4. Березина О.Я., Кириенко Д.А., Маркова Н.П., Пергамент А.Л. Синтез микро- и нанонитей пентаоксида ванадия методом электроспиннинга// Техническая физика. – 2015. –Т. 85.- вып 9. –С. 105-110
5. Charernsriwilaiwat N., Opanasopit P., Rojanarata T., Ngawhirunpat T. Lysozymeloaded, electrospun chitosan-based nanofiber mats for wound healing // International Journal of Pharmaceutics. –2012.-V.427.- N.2- Р.379– 384.
6. Harini G. Sundararaghavan, Jason A. Burdick. Gradients with Depth in Electrospun Fibrous Scaffolds for Directed Cell Behav-ior//Biomacromolec.–2011.-V.12. –N.6. -P.2344–2350.
7. Milleret V., Simona B., Neuenschwan-der P., Hall H. Tuning electrospinning parameters for production of 3D-fiberfleeces with increased porosity for soft tissue engineering applications // European Cells and Materials. -2011.-V. 21. N.21 - P.286–303.
8. Товмаш А.В., Садовский А.С. Электроспиннинг – это что – то новенькое? // Химия и жизнь. – М.-2008 –вып. 11.– С. 22 – 25.
9. Kuzmenko V., Naboka O., Gatenholm P., Enoksson P. Ammonium chloride promoted synthesis of carbon nanofibers fromelectrospun cellulose acetate // Carbon.- 2014.-V. 67 -P. 694-703.
10. Fang J., Zhang Li, Sutton D., Wang X., Lin T. Needleless Melt-Electrospinning of Polypropylene Nanofibres // Journal of Nanomaterials. – 2012.-V. 2012. – P.1-9.
11. D. Chen, T. Liu, X. Zhou, W. ChauhariTjiu, H. How Electrospinning Fabrication of High Strength and Toughness Polyimide Nanofiber Membranes Containing Multiwalled Carbon Nanotubes //Physical chemistry. –2009.-V.113.-N.29. -Р. 9741-9748.
12. Синтез и свойства многофункциональных керамических нановолокон, полученных методом электроспиннинга **//** [Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки](http://cyberleninka.ru/journal/n/vestnik-tambovskogo-universiteta-seriya-estestvennye-i-tehnicheskie-nauki).- 2013.-Т. 18-.Вып. 6(2).-С.3156-3159.
13. МатвеевА.Т., АфанасовИ. М. Получение ткановолокон методом электроформования // Уч. пос.– М.: МГУ.- 2010. – 83 с.
14. Seo BM, Miura M, Gronthos S, Bartold PM, Batouli S, Brahim J, Young M, Robey PG, Wang CY, Shi ST. Investigation of multipotent postnatal stem cells from human periodontal ligament // Lancet.- 2004.-V. 364.–N.9429. - P. 149–155.
15. Патент США № 20060095137 / Chung CP, Park WH, Kim KH, Jeong L. // Nanofibrous nonwoven membrane of silk fibroin for guide bone tissue regeneration and manufacturing method thereof – 2006.
16. Scandebury TV. A decade of technology development for guided tissue regeneration// J Periodontal.- 1993.- V.64. - N.11. – P 1129–1137.
17. Benatti BB, Silve´rio KG, Casati MZ, Sallum EA, Nociti FH. Physiological features of periodontal regeneration and approaches for periodontal tissue engineering utilizing periodontal ligament cells//J BiosciBioeng.-2007.-V.103. T.1. -P.1–6.
18. Mikos AG, Bao Y, Cima LG, Ingber DE, Vacanti JP, Langer R. Preparation of poly(glycolic acid) bonded fiber structure for cell attachment and transplantation// J Biomed Mater Res. - 1993.– V.27 -N.2. –P 183–189.
19. Owen GR, Jackson J, Chehroudi B, Burt H, Brunette DM. A PLGA membrane controlling cell behavior for promoting tissue regeneration// Biomaterials. – 2005. –V.26. N.35.– P. 7447–7456.
20. Cai Q, Yang J, Bei JZ, Wang SG. A novel porous cells scaffold made of polylactide-dextran blend by combining phase-separation and particle-leaching techniques// Biomaterials. – 2002.–V. 23. -N.23.– P. 4483–4492.
21. Langer R, Vacanti JP. Tissue engineering// Science 1993.–V.260. –N.5110– P. 920–926.
22. Li WJ, Laurencin CT, Caterson EJ, Tuan RS, Ko FK. Electrospun nanofibrous structure: A novel scaffold for tissue engineering// J Biomed Mater Res. –2002 –V. 60. –N.4. –P. 613–621.
23. Lyons J., Ko F. Melt Electrospinning of Polymers: A Review//The Polymer Science Monthly. - 2005.-V. 30 N.6. – P. 170-178
24. Zhou H.J. Green T.B., Joo Y.L. [**The thermal effects on electrospinning of polylactic acid melts**](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386106009955)  //The Polymer Science Monthly.–2006. –V.47. N.21. – P. 7497-7505.
25. Севостьянова В.В., Головкин А.С., Филипьев Д.Е., Глушкова Т.В., Борисов В.В., Бураго А.Ю., Барбараш Л.С. Выбор оптимальных параметров электроспининга для изготовления сосудистого графта малого диаметра из поликапролактона // [Фундаментальные исследования](http://cyberleninka.ru/journal/n/fundamentalnye-issledovaniya). – 2014. – вып. 10-1.– С. 180-184.
26. Воложин, Г.А. Основные виды биосовместимых материалов.-М: МГМСУ. - 2010.– стр. 17.

Список литературы

1. Li D., Wang Y., Xia Y. Electrospinningnanofibers as uniaxially aligned arrays and layer by-layer stacked films/ / Adv. Mater.– 2004.-V.16.–N.4– 361-366.
2. Zdraveva E., Pejnovic N., Mijovic B. Electrospinning of polyurethane nonwoven fibrous mats // TEDI. -2011.–V.1–N.1- P.55– 60.
3. A new method of producing composite materials "nanoparticle - carbon nanofibers" // Express Bulletin "finger"(Advanced Technologies - nanostructures, superconductors, fullerenes. 2008.- V.15.- N. 23.-P.5-6. Http://perst.issp.ras.ru/
4. OJ Berezina, Kiriyenko DA Markov NP, Parchment, AL Synthesis of micro- and nanowires of vanadium pentoxide by electrospinning // Technical Physics. - 2015. -V. 85.- N.9.- P.105-110
5. Charernsriwilaiwat N., Opanasopit P., Rojanarata T., Ngawhirunpat T. Lysozymeloaded, electrospun chitosan-based nanofiber mats for wound healing // International Journal of Pharmaceutics. –2012. -V.427. N.2- Р.379– 384.
6. Harini G. Sundararaghavan, Jason A. Burdick. Gradients with Depth in Electrospun Fibrous Scaffolds for Directed Cell Behav-ior//Biomacromolec.–2011.-V.12. –N.6. -P.2344–2350.
7. Milleret V., Simona B., Neuenschwan-der P., Hall H. Tuning electrospinning parameters for production of 3D-fiberfleeces with increased porosity for soft tissue engineering applications // European Cells and Materials. -2011.-V. 21. N.21 - P.286–303.
8. Tovmash AV, Sadovsky AS Electrospinning - it's - something new? // Chemistry and Life. - M. 2008.-V. 11.-P. 22 - 25.
9. Kuzmenko V., Naboka O., Gatenholm P., Enoksson P. Ammonium chloride promoted synthesis of carbon nanofibers fromelectrospun cellulose acetate // Carbon.- 2014.-V. 67. -P. 694-703.
10. Fang J., Zhang Li, Sutton D., Wang X., Lin T. Needleless Melt-Electrospinning of Polypropylene Nanofibres // Journal of Nanomaterials. – 2012.-V. 2012.– P.1-9.
11. D. Chen, T. Liu, X. Zhou, W. ChauhariTjiu, H. How Electrospinning Fabrication of High Strength and Toughness Polyimide Nanofiber Membranes Containing Multiwalled Carbon Nanotubes //Physical chemistry.–2009.-V.113. -N.29. -Р. 9741-9748.
12. Synthesis and properties of multifunctional ceramic nanofibers obtained by electrospinning // Bulletin of the University of Tambov . Series: Natural and Technical nauki.- 2013.-V.18.-N. 6 (2) .- Р.3156-3159 .
13. Matveev AT Afanasiev IM Getting tkanovolokon electrospinning method // Uch. pos. - M .: MGU.- 2010 –С.83.
14. Seo BM, Miura M, Gronthos S, Bartold PM, Batouli S, Brahim J, Young M, Robey PG, Wang CY, Shi ST. Investigation of multipotent postnatal stem cells from human periodontal ligament // Lancet.- 2004.- V. 364.–N.9429. - P. 149–155
15. U.S. Patent No. 20060095137 / Chung CP, Park WH, Kim KH, Jeong L. // Nanofibrous nonwoven membrane of silk fibroin for guide bone tissue regeneration and manufacturing method thereof – 2006. –V.[17012](http://assignment.uspto.gov/). -78 .
16. Scandebury TV. A decade of technology development for guided tissue regeneration// J Periodontal.- 1993.- V.64. - N.11. – P 1129–1137.
17. Benatti BB, Silve´rio KG, Casati MZ, Sallum EA, Nociti FH. Physiological features of periodontal regeneration and approaches for periodontal tissue engineering utilizing periodontal ligament cells//J BiosciBioeng.-2007.-V.103. N.1. -P.1–6.
18. Mikos AG, Bao Y, Cima LG, Ingber DE, Vacanti JP, Langer R. Preparation of poly(glycolic acid) bonded fiber structure for cell attachment and transplantation// J Biomed Mater Res. - 1993.–V.27–N.2.–P 183–189.
19. Owen GR, Jackson J, Chehroudi B, Burt H, Brunette DM. A PLGA membrane controlling cell behavior for promoting tissue regeneration// Biomaterials. – 2005. –V.26. N35.–P. 7447–7456.
20. Cai Q, Yang J, Bei JZ, Wang SG. A novel porous cells scaffold made of polylactide-dextran blend by combining phase-separation and particle-leaching techniques// Biomaterials. – 2002.–V. 23. -N.23.– P. 4483–4492.
21. Langer R, Vacanti JP. Tissue engineering// Science 1993.–V.260. –N.5110– P. 920–926.
22. Li WJ, Laurencin CT, Caterson EJ, Tuan RS, Ko FK. Electrospun nanofibrous structure: A novel scaffold for tissue engineering// J Biomed Mater Res. –2002 –V. 60. –N.4. –P. 613–621.
23. Lyons J., Ko F. Melt Electrospinning of Polymers: A Review//The Polymer Science Monthly. - 2005.-V. 30.- N.6. – P. 170-178.
24. Zhou H.J. Green T.B., Joo Y.L. [**The thermal effects on electrospinning of polylactic acid melts**](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032386106009955)  //The Polymer Science Monthly.–2006.–V.47.- N.21. – P. 7497-7505.
25. Sevostyanova VV, Golovkin A. Philip DE, Glushkov TV, Borisov VV, Burago Yu, Barbarash LS Selecting the optimum parameters for producing elektrospininga vascular graft of small diameter of PCL // Basic Research. - 2014 - N. -10-1.- P. 180-184
26. Volozhin, GA The main types of biocompatible materialov. M: MSMSU. - 2010.- p. 17.

Резюме

А.М.Акимхан, Д.Лисюков

Достижения и перспективы в области получения полимерных нановолокон методом электроспининга

Проведен анализ современных достижений в области разработки полимерных волокон методом электроспининга. Приведены передовые достижения в направлении получения различных материалов методами электроспининга из раствора и расплава полимера. Описаны технологические параметры получения нановолокон с желаемой морфологией и диаметром. Отмечены мировые тренды использования полимерных волокон в медицинской практике.

Ключевые слова: электроспиннинг, нановолокно, формование, полимеры, нановолоконные мембраны

SUMMARY

A.M.Akimhan, D.Lissyukov

SUMMARY

A.M.Akimhan, D.Lissyukov

Achievements and prospects for the preparation of polymeric nanofibers by electrospinning process

The analysis of the latest achievements in field of polymeric fibers by electrospinning process. We present the latest achievements in the field of the preparation of various materials by electrospining technology from the solutions and melted polymers. Described process by parameters during producing nanofibres with the desired morphology and diameter. Noted global trends of using polymeric fibers in medical practice.

**Keywords:** electrospinning, nanofibers, forming, polymers, nanofibrous membranes

ТҮІНДІ

Электроспиннинг арқылы полимерлі наноталшықтар өндіру бағытындағы жетістіктері мен болашағы

**Кілт сөздер**: электроспиннинг, наноталшық, қалыптастыру, полимерлер, наноталшықты мембраналар

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

|  |  |
| --- | --- |
| Ф.И.О. | Акимхан Айымгуль Мухтаргаликызы  |
| ДОЛЖНОСТЬ | Профессор кафедры химической физики и материаловедения факультета химии и химической технологии |
|  |  |
| УЧЕНОЕ ЗВАНИЕ | доктор химических наук, профессор |
| АДРЕС | 050040, Алматы, пр. Аль-Фараби 77 |
| ТЕЛЕФОН | 8 (7232) 540-177 |
| e-mail | amaim@yandex. |
| Ф.И.О. | Лисюков Дмитрий  |
| ДОЛЖНОСТЬ | магистрант |
| УЧЕНОЕ ЗВАНИЕ |  |
| АДРЕС |  |
| ТЕЛЕФОН |  |