

496 с.

5. Пивкина С.И., Фомина О.П., Боровков В.В. Структура одинарного кулирного трикотажа футерованных переплетений со сдвоенными парными набросками футерной нити: В сборнике: Инновационные технологии в текстильной и легкой промышленности. Материалы докладов международной научно-технической конференции. Витебский государственный технологический университет. 2014. С. 73.

© Карамова А.С., Фомина О.П., 2025

УДК 677.076.49

**СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА
ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ НАНОВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ
РАСТВОРОВ ХИТОЗАНА РАЗЛИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ
COMPARATIVE RESEARCH OF ELECTROSPINNING NANOFIBROUS
MATERIALS FROM CHITOSAN SOLUTIONS OF VARIOUS ORIGINS**

**Карнилов Михаил Сергеевич, Рыклин Дмитрий Борисович,
Демидова Мария Александровна
Karnilov Mikhail Sergeevich, Ryklin Dzmitry Borisovich,
Demidova Maria Alexandrovna**

*Витебский государственный технологический университет, Беларусь, Витебск
Vitebsk State Technological University, Belarus, Vitebsk
(e-mail: alphamiha@mail.ru, ryklin-db@mail.ru, demidova.mariya00@gmail.com)*

Аннотация: Целью исследований являлась оценка влияния вида используемого сырья для изготовления хитозана на оптимальные режимы процесса электроформования. Установлено, что использование грибного хитозана позволяет повысить концентрацию волокнообразующего компонента в прядильном растворе по сравнению с крабовым хитозаном, снизить содержание поливинилового спирта, вводимого в раствор для стабилизации процесса электроформования, а также повысить производительность прядильной головки.

Abstract: The aim of the research was to evaluate the influence of the type of raw material used for the production of chitosan on the optimal modes of the electrospinning process. It was found that the use of mushroom chitosan allows increasing the concentration of the fiber-forming component in the spinning solution compared to crab chitosan, reducing the content of polyvinyl alcohol introduced into the solution to stabilize the electrospinning process, and increasing the productivity of the spinning head.

Ключевые слова: хитозан, поливиниловый спирт, электроформование, режимы формования

Key words: chitosan, polyvinyl alcohol, electrospinning, spinning modes.

Существует множество методов получения нановолокон, из которых наиболее гибким и эффективным является электроформование. Благодаря своей простоте, относительно низкой стоимости, высокой производи-

сти и возможности использования широкого спектра природных и синтетических полимеров исследования получения нановолокнистых материалов, покрытий и структур отличаются большим интересом со стороны научной общественности [1].

Изучение и разработка электроформованных материалов, покрытий и структур является одной из наиболее быстро развивающихся в настоящее время научных областей из-за специфических свойств нановолокон и наноконструкций, применимых для создания инновационных продуктов для целого ряда областей, среди которых можно выделить электронику, материаловедение и полимерную инженерию, нанокатализ, создание тканевых каркасов, раневых покрытий, защитной одежды, фильтров и многое другое [2-5].

Исследователями разрабатываются электроформованные материалы из натуральных и синтетических полимеров с заданной скоростью биodeградации, обладающие нетоксичностью и не вызывающие иммунного ответа у организма пациента; материалы с механизмом таргетной доставки, в которые включен специфический лекарственный компонент; электроформованные конструкции, служащие подложкой для нарастания костной ткани и ткани органа, применяющиеся как *in vivo*, так и *in vitro* [6] и многие другие терапевтические средства.

Благодаря уникальной структуре получаемых нановолокон, а также свойствам используемых полимеров, разрабатываемые материалы могут обладать биоразлагаемостью, биосовместимостью, а также необходимыми медицинскими качествами (антибактериальным, противовирусным, антигрибковым эффектом и др.).

Одним из полимеров, используемых для получения нановолокон методом электроформования для создания медицинских материалов, является хитозан. Хитозан является одним из наиболее активно используемых в настоящее время биополимеров, имеющих полисахаридную природу. Он биоразнообразен, биосовместим и биоразлагаем [7].

Хитозан получают из хитина посредством процесса, называемого деацетилизацией, при этом хитин содержится в экзоскелетах ракообразных, таких как креветки и крабы, а также в клеточных стенках грибов.

Он считается вторым по распространенности биополимером после целлюлозы. Хитозан нерастворим в воде, щелочи и минеральных кислотных системах. Однако он растворим в органических кислотах [3].

Особенно интересно использование хитозана для биомедицинских применений: хитозановые нановолокна биоразлагаемы, биосовместимы и антимикробны, что делает их идеальными для биомедицинских применений.

Антибактериальные свойства хитозана обусловлены взаимодействием между его положительно заряженными аминогруппами и анионными группами, существующими в липотейхоевых кислотах грамположительных бактерий или липополисахаридах грамотрицательных бактерий [8]. Хотя хитозан является перспективным антимикробным средством (эффективным против

бактерий, вирусов, грибков и паразитов), его эффективность может варьироваться в зависимости от его сорта, типа раны и раневых условий. Сорт хитозана, определяемый степенью его деацетилирования и молекулярной массой, значительно влияет на его антимикробную эффективность, при этом более низкая молекулярная масса и более высокое деацетилирование повышают эффективность.

Следовательно, актуальным является выявление особенностей получения электроформованных материалов из различных видов хитозана по характеру его происхождения. В связи с этим, целью исследований стала оценка влияния вида используемого сырья для изготовления хитозана на оптимальные режимы процесса электроформования.

Получаемый в рамках исследований нановолокнистый материал представляет собой биоразлагаемое покрытие раневых повязок, в связи с чем его структура и состав должны обеспечить постепенную биodeградацию под действием выделяемых биологических жидкостей.

При проведении исследований использовался грибной и крабовый хитозан. Необходимо обратить внимание на то, что хитозан является катионным полимерным электролитом, который несет положительный заряд при растворении, а молекулы с аналогичными зарядами будут отталкиваться друг от друга, нарушая конус Тейлора, тем самым затрудняя электроформование. Поэтому хитозан обычно смешивают с другими полимерами, способными стабилизировать процесс электроформования.

Одним из таких полимеров является поливиниловый спирт (ПВС). Этот водорастворимый полимер широко используется в биомедицине из-за своей нетоксичности, гидрофильности, биосовместимости и биоразлагаемости.

Предварительные исследования показали, что для каждого из используемых разновидностей хитозана увеличение процентного содержания ПВС способствовало стабилизации процесса электроформования и повышению производительности оборудования. Однако с учетом быстрого растворения нановолокон из ПВС под действием биологических жидкостей содержание данного компонента в растворе должно быть минимизировано, так как его повышение ускорит процесс биodeградации.

Для проведения эксперимента было получено два варианта прядильных растворов, состав и способ подготовки которых были определены на основе результатов предварительных исследований:

Вариант 1: 5%-ный раствор крабового хитозана в 80%-ной уксусной кислоте смешивался с 5%-ным водным раствором ПВС в пропорции 4/1. В результате электроформования при условии полного испарения растворителей содержание компонентов в получаемом материале составляет соответственно 80% и 20%.

Вариант 2: 12%-ный раствор грибного хитозана в 80%-ной уксусной кислоте смешивался с 5%-ным водным раствором ПВС в пропорции 4/1. При таком соотношении содержание хитозана в нановолокнистом материале повысилось до 90,5%, а содержание ПВС снизилось до 9,5%.

Анализируя представленные составы растворов, можно отметить, что использование грибного хитозана позволяет существенно снизить необходимое для стабильного электроформования содержание ПВС, что является положительным фактором.

Получение нановолокнистых материалов осуществлялось на установке Fluidnatek LE-50 с использованием специально разработанной прядильной головки, обеспечивающей стабильный процесс электроформования при расстоянии между эмиттером и коллектором, равном 4 см, что существенно меньше значения, устанавливаемого в случае применения стандартной прядильной головки. Предыдущие исследования показали, что уменьшение расстояния между прядильными электродами приводит повышению диаметра нановолокон, что способствует снижению скорости биodeградации [9].

Режимы электроформования нановолокнистых материалов из двух вариантов прядильных растворов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Режимы электроформования растворов хитозана

Параметр	Вариант 1	Вариант 2
Расстояние между эмиттером и коллектором, см	4	4
Потенциал эмиттера, кВ	22	18
Потенциал коллектора, кВ	-5	-6
Расход прядильного раствора, мл/ч	1,3	1,2

Стоит отметить, что при использовании грибного хитозана ограничение на увеличение расхода накладывала высокая электропроводность раствора, в связи с чем при увеличении потенциала эмиттера или коллектора происходил межэлектродный пробой с образованием электрического разряда.

В результате проведённого исследования было установлено, что использование крабового и грибного хитозана при выбранных составах прядильных растворов не оказывает существенного влияния на расход прядильного раствора.

Однако за счёт более высокого процентного содержания волокнообразующих компонентов при электроформовании из второго варианта раствора существенно повышается производительность прядильной головки, выражаемая в граммах получаемого материала в час, что позволяет сократить время получения изделия с покрытием определенной толщины.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что предпочтительным для электроформования является использование растворов на основе грибного хитозана. Полученный результат будет использован на следующем этапе исследований при разработке технологии получения раневых повязок с нановолокнистыми покрытиями.

Список литературы

1. Ramakrishna, S. [et. al.] Electrospun nanofibers: solving global issues / S. Ramakrishna [et. al.] // Materials Today. – 2006. – Vol. 9. – Issue 3. – Pp. 40-50.

2. Refate, A. [et. al.] Influence of electrospinning parameters on biopolymers nanofibers, with emphasis on cellulose & chitosan / A. Refate [et. al.] // Heylion. – 2023. – Vol. 9. – Issue 6. – Art. e17051.
3. Mehanny, S., Magd, E.E.A.-E., Sorbara, S., Navarro, J., Gil-San-Millan R. Spanish poplar biomass as a precursor for nanocellulose extraction / S. Mehanny, E.E.A.-E. Magd, S. Sorbara, J. Navarro, R. Gil-San-Millan // Application Science. – Vol. 11. – 2021. – Art. 10.3390/app11156863.
4. Khare, S., Williams, K., Gokulan K. Nanotechnology / S. Khare, K. Williams, K. Gokulan // Encyclopedia of Food Microbiology. – 2014. – Pp. 893-900.
5. Hemida, M.H. [et. al.] Cellulose nanocrystals from agricultural residues (Eichhornia crassipes): extraction and characterization / M.H. Hemida [et. al.] // Heliyon. – 2023. – Vol. 9. – Art. e16436.
6. Wang, H.S. Functional polymeric nanofibers from electrospinning / H.S. Wang // Recent Patents on Nanotechnology. – 2009. – Vol. 3. – Pp. 21-31.
7. Ibrahim, M.M. [et. al.] Reinforcement of starch based biodegradable composite using nile rose residues / M.M. Ibrahim [et. al.] // J. Mater. Res. Technol. – 2020. – Vol. 9. – Pp. 6160-6171.
8. Parvinnasab, A. [et. al.] Antibacterial nanofibrous wound dressing mats made from blended chitosan-copper complexes and polyvinyl alcohol (PVA) using electrospinning / A. Parvinnasab [et. al.] // Carbohydrate Polymer Technologies and Applications. – 2024. – Vol. 8. – Art. 100564.
9. Рыклин Д.Б. Влияние межэлектродного расстояния на морфологию электроформованных нановолокнистых материалов = Influence of interelectrode distance on the morphology of electrospun nanofibrous webs / Д.Б. Рыклин, М.А. Демидова, М.С. Карнилов // Современные инженерные проблемы в производстве товаров народного потребления : сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума IV Международного Косыгинского Форума «Проблемы инженерных наук: формирование технологического суверенитета», Москва, 20-22 февраля 2024 г. : в 2 ч. / ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина». – Москва, 2024. – Ч. 1. – С. 283–287.

© Карнилов М.С., Рыклин Д.Б., Демидова М.А., 2025