

2. Tetteh E. K., Rathilal S., Asante-Sackey D., Chollom M. N. Prospects of synthesized Magnetic TiO₂-based membranes for wastewater treatment: A review // Materials. – 2021. – Vol. 14. – №. 13. – P. 3524.

КОМПОЗИТНЫЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕМБРАНЫ НА ОСНОВЕ СОПОЛИМЕРА ВИНИЛИДЕНФТОРИДА С ТЕТРАФТОРЭТИЛЕНОМ, ПОЛИВИНИЛПИРРОЛИДОНА И НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЦИНКА, СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОСПИННИНГА, ДЛЯ ЛЕЧЕНИЯ ГНОЙНЫХ РАН

Т.С.ТВЕРДОХЛЕБОВА¹, Л.С. АНТИПИНА²

¹ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации

E-mail: aramat_tts@mail.ru

В настоящее время стратегия лечения повреждений кожи основана на предотвращении или искоренении инфекций в месте поражения в сочетании с ускорением процесса заживления для максимального структурного и функционального восстановления [1]. Полупроницаемые полимерные мембраны, изготовленные методом электроспиннинга, вызывают значительный интерес в качестве многофункциональных перевязочных средств для лечения ран, благодаря тому, что они позволяют контролировать кинетику высвобождения антибактериального компонента, легко моделируются под контур раны, обеспечивают и длительно поддерживают необходимый уровень газообмена и высокую способность сорбировать раневый экссудат, а также имитируют структуру внеклеточного матрикса, что позволяет ускорять процесс регенерации раны. Особенно актуальным на данный момент является использование для лечения ран сегнетоэлектрических мембран, изготовленных методом электроспиннинга. Такие полимерные мембраны способны обеспечить электростимуляцию поврежденных тканей за счет воздействия на мембрану механических, тепловых или электромагнитных полей, не требуя внешних источников электрической энергии.

На первом этапе изготовления мембран готовили прядильный смесевой растворитель для приготовления прядильного раствора. Для этого с помощью магнитной мешалки (ЭКОС-1, Москва, Россия) смешивали 80 масс % ацетона (ЭКОС-1, Москва, Россия) и 20 масс % изопропилового спирта (ЭКОС-1, Москва, Россия). Далее готовили суспензию порошка наночастиц оксида цинка (ZnO) в диметилформамиде (ДМФА) (ЭКОС-1, Москва, Россия). Затем добавляли смесевой растворитель ацетон/изопропиловый спирт, массовое содержание которого составило 80/20 соответственно.

Для приготовления прядильных растворов использовали нанопорошок ZnO полученный методом лазерной абляции цинковой мишени на воздухе. В качестве полимеров использовали сополимер винилиденфторида с тетрафторэтиленом (ВДФ-ТеФЭ) (ГалоПолимер, Москва, Россия) и поливинилпирролидона (ПВП) (Kollidon® 17 PF, BASF, Ludwigshafen am Rhein, Германия). Для проведения экспериментов было подготовлено приготовлено пять типов прядильных растворов с содержанием ПВП: 0,5, 10, 20 и 40 масс %.

Изготовление ФПМ осуществляли методом электроспиннинга (NANON 01A MECC Co., Япония). Напряжение на инжекторе – 30 кВ. Расстояние между инжектором и сборочным

коллектором – 40 мм; Сборочный коллектор – алюминиевый цилиндр длиной 200 мм диаметром 100 мм. Тип инжектора игла 22 G. Скорость подачи прядильного раствора – 4 мл/ч; Скорость вращения коллектора – 200 об/мин. После формирования образцы помещали в камерную печь (ИТМ, Томск Россия) и выдерживали в течение 12 часов при температуре 105°C для удаления остаточных органических растворителей из сформированных мембран.

Увеличение содержания ПВП в прядильном растворе до 5 масс % приводит к увеличению показателя динамической вязкости раствора ~ на 14 % по сравнению с контролем. Это изменение быть обусловлено межмолекулярными взаимодействиями полимеров и используемых растворителей. Дальнейшее увеличение содержания ПВП в прядильном растворе приводит к уменьшению показателя динамической вязкости прядильного раствора, что обусловлено уменьшением доли компонента ВДФ-ТеФЭ, имеющего большую молекулярную массу. При этом увеличение содержания ПВП в прядильном растворе снижает значения проводимости прядильного раствора.

Таблица 1 – Значения показателей вязкости и проводимости прядильных растворов и механические свойства сформированных ВДФ-ТеФЭ/ПВП/ZnO мембран в зависимости от содержания ПВП

Содержание ПВП, масс %	Динамическая вязкость, 10^{-3} Па × сек	Проводимость, мкСм/см	Средний диаметр волокон, мкм	Предел прочности при растяжении, МПа	Удлинение, %
0	$51,9 \pm 4,3$	$43,5 \pm 1,0$	$0,36 \pm 0,09$	$13,4 \pm 0,8$	$70,0 \pm 6,8$
5	$60,3 \pm 2,5$	$38,2 \pm 0,6$	$0,47 \pm 0,11$	$10,9 \pm 0,7$	$42,6 \pm 4,7$
10	$52,8 \pm 3,9$	$33,9 \pm 0,7$	$0,41 \pm 0,12$	$8,6 \pm 1,1$	$59,9 \pm 6,4$
20	$28,0 \pm 1,5$	$32,8 \pm 0,5$	$0,40 \pm 0,08$	$9,2 \pm 0,4$	$41,0 \pm 3,4$
40	$6,3 \pm 0,4$	$34,5 \pm 0,5$	$0,32 \pm 0,09$	$6,8 \pm 0,7$	$36,8 \pm 6,6$

Проведенные исследования показывают, что максимальными значениями показателей прочности и относительного удлинения обладают мембраны из контрольной группы не содержащие в своем составе ПВП.

Элементный состав мембран контрольной группы, не содержащий ПВП, представлен углеродом и фтором – основными элементами, формирующими макромолекулу сополимера ВДФ-ТеФЭ. Кислород и цинк, наблюдаемые в составе мембран – основные элементы минерального наполнителя ZnO. Увеличение содержания ПВП в прядильных растворах приводит к обогащению элементного состава мембран азотом – основным элементом ПВП. Кроме этого происходит обогащение мембран кислородом с уменьшением значения отношения F/C и F/O, что свидетельствует о формировании композитных волокон, при этом вне зависимости от содержания ПВП содержание Zn в мембранах достоверно не изменяется. Полученные результаты свидетельствуют о формировании композитных ВДФ-ТеФЭ/ПВП/ZnO мембран с постоянной концентрацией ZnO вне зависимости от содержания ПВП в сформированной мембране.

Независимо от содержания ПВП в прядильных растворах все мембраны образованы цилиндрическими волокнами правильной формы, беспорядочно переплетающимися друг с другом. При этом наибольшим диаметром сформированных волокон обладают

ВДФ-ТеФЭ/ПВП/ZnO мембраны, полученные из прядильных растворов с содержанием ПВП равным 5 масс % и имеющим наибольшую вязкость. ВДФ-ТеФЭ/ПВП/ZnO мембраны, полученные из растворов, содержащих 40 масс % ПВП и обладающих наименьшей вязкостью и проводимостью, сформированы волокнами с наименьшим средним диаметром.

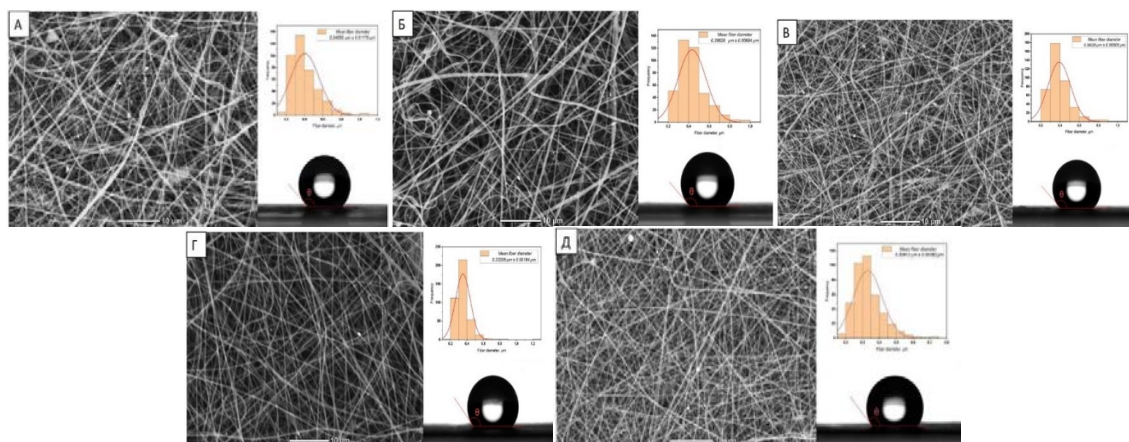


Рисунок 1 – Изображения поверхности ВДФ-ТеФЭ/ ПВП/ZnO мембран и краевой угол смачиваемости в зависимости от содержания ПВП:
 А – 0 масс %, Б – 5 масс %, В – 10 масс %, Г – 20 масс %, Д – 40 масс %

Изучение способности композитных мембран восстанавливать кожный покровы в случае инфицированной раны проводили на половозрелых лабораторных крысах линии Wistar массой 180 - 200 грамм. Для проведения исследований у животных формировали полнослойную кожно-мышечную гнойную рану. Для этого у животных под общим наркозом в межлопаточной области удаляли лоскут кожи прямоугольной формы размерами 20 × 20 мм вместе подкожно-жировой клетчаткой. Края ран и подлежащие мышцы раздавливали зажимом Кохера. Полученную рану инфицировали микробной взвесью, содержащей 10^6 КОЕ *Staphylococcus aureus*, затем поверхность инфицированной раны на 72 часа укрывали полиэтиленовой пленкой для формирования очага острого воспаления.

Сформированная гнойная рана представляет собой очаг острого воспаления гнойно-некротического характера, о чем свидетельствует налет серо-зеленого цвета с характерным неприятным запахом на поверхности раны. Площадь раны составила 85 ± 12 мм².

При использовании ВДФ-ТеФЭ/ПВП/ZnO мембраны содержащей 5 масс % ПВП на 10 сутки эксперимента площадь раны составила 24 ± 4 мм². Дно раны очищено, отмечалась активная эпителизация раны по периферии и формирование умеренной грануляции. При снятии повязки травматизации раны не наблюдалось. Наблюдается небольшой фрагмент фиброзной клеточной ткани, по периферии которого отмечается небольшая инфильтрация нейтрофилами. В фиброзной ткани в большом количестве капилляры и фибробластоподобные клетки.

При использовании для заживления раны “классической” марлевой повязки пропитанной раствором хлоргексидина площадь раны под повязкой составила 38 ± 6 мм². Снятие повязки вызывало травматизацию раны. Дно раны очищено. По периферии раны наблюдалась активная эпителизация, формирование грануляций и небольшое количество фибрина. Гистологически отмечается фрагмент фиброзной клеточной ткани с наличием фибробластоподобных клеток, групп гемосидерофагов, мелких очагов лимфоидной инфильтрации с примесью плазмоцитов. Выраженный ангиогенез. По периферии отмечается наличие грануляционной ткани с нитями фибрина, формированием капилляров и инфильтрацией макрофагами.

Проведенные исследования продемонстрировали, что композитные ВДФ-ТеФЭ/ПВП/ZnO мембраны по сравнению с классической марлевой повязкой, пропитанной раствором антибактериального агента, обеспечивают лучшие условия для регенерации тканей в зоне повреждения. При этом наилучшей способностью восстанавливать кожные покровы в случае обширной раны обладают композитные ВДФ-ТеФЭ/ПВП/ZnO мембраны, содержащие от 5 до 10 масс % ПВП. Это обстоятельство может быть обусловлено возможностью этого типа мембран сохранять структурную целостность при длительной выдержке в модельных жидкостях, имитирующих пребывание мембраны в ране и при этом обеспечивать необходимый транспорт наночастиц ZnO в зону контаминации для подавления паталогической микрофлоры. Обладая такими свойствами мембраны этого типа позволяют сохранять оптимальную влажность раны, обеспечить хороший газообмен с внешней средой, высокую способность сорбировать раневой экссудат при низкой способности мембраны к адгезии к раневой поверхности, что обеспечивает оптимальные условия для заживления.

В настоящий момент опытные образцы разработанных антибактериальных мембран переданы для проведения ограниченных клинических исследований на кафедру “Госпитальной хирургии с курсом сердечно-сосудистой хирургии” ФГБОУ ВО СибГМУ Минздрава России.

Список литературы

1. Naskar, A.; Kim, K. Recent Advances in Nanomaterial-Based Wound-Healing Therapeutics // Pharmaceutics, 2020 – 499 с.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-33-90159.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИ-3-ГИДРОКСИБУТИРАТА И МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК ДЛЯ РЕГЕНЕРАТИВНОЙ МЕДИЦИНЫ

П.М. ТЮБАЕВА^{1,2}, А.А. ОЛЬХОВ^{1,2}, А.А. ПОПОВ^{1,2}

¹ ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова»

² ФГБУН «ИБХФ им. Н.М. Эмануэля» РАН

E-mail: polina-tyubaeva@yandex.ru

Создание современных композиционных волокнистых материалов с ценными функциональными свойствами на основе биоразлагаемых полимеров и модифицирующих добавок позволит не только решить экологические проблемы и снизить загрязнение окружающей среды, но и разработать новые подходы к созданию инновационных материалов для регенеративной медицины [1-2].

Целью работы является исследование нового класса волокнистых материалов на основе биополимеров и модифицирующих добавок для регенеративной медицины. В работе рассмотрен метод модификации волокнистых композиционных материалов на основе поли-3-гидроксибутирата (ПГБ), полученных методом электроформования, за счет использования молекулярных комплексов гемина [3]. Строение новых материалов исследовано такими методами, как оптическая и сканирующая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, метод электронного парамагнитного резонанса, дифференциальная сканирующая калориметрия.