

УДК 615.468.21

**ПОЛИМЕРНЫЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МЕМБРАНЫ С АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫМ
ЭФФЕКТОМ ДЛЯ ЗАЖИВЛЕНИЯ РАН**

И.В. Лукиев¹, Д.А. Гончарова²

Научный руководитель: н.с., к.т.н. Е.Н. Больбасов

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г. Томск, проспект Ленина, 30, 634050

²Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, г. Томск, проспект Ленина, 36, 634050

E-mail: ivan.lukiev@mail.ru

**POLYMER FERROELECTRIC MEMBRANES WITH ANTIBACTERIAL EFFECT FOR WOUND
HEALING**

I.V. Lukiev¹, D.A. Goncharova²

Scientific adviser: Researcher, Ph.D. E.N. Bolbasov

¹Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin Avenue, 30, 634050

²Tomsk State University, Russia, Tomsk, Lenin Avenue, 36, 634050

E-mail: ivan.lukiev@mail.ru

Abstract. *In the present study we performed the results of studies of the formation by electrospinning of composite fluoropolymer ferroelectric membranes based on a copolymer of vinylidene fluoride with tetrafluoroethylene (VDF-TFE), polyvinylpyrrolidone (PVP) and zinc oxide (ZnO) as an antibacterial agent. The effect of the PVP content on the conductivity and viscosity of spinning solutions, the structure and chemical composition of the formed membranes was studied. The antibacterial activity of the membranes in relation to Staphylococcus aureus was established.*

Введение. Современные перевязочные материалы, используемые для заживления гнойных ран, должны не только эффективно бороться с инфекцией, но и стимулировать процессы регенерации тканей. Благодаря взаимосвязанной открытой пористости, высокой площади свободной поверхности и сегнетоэлектрическим свойствам, полимерные мембраны, сформированные методом электроспиннинга на основе сополимера VDF-TFE, способны эффективно стимулировать процессы регенерации тканей. Недостатком таких материалов является низкая антибактериальная активность. В настоящей работе мы представляем результаты пилотных исследований, направленных на разработку композиционных сегнетоэлектрических полимерных мембран, обладающих антибактериальными свойствами на основе сополимера винилиденфторида с тетрафторэтиленом (VDF-TFE), поливинилпирролидона (PVP) и наночастиц оксида цинка (ZnO) [1].

Экспериментальная часть. Для изготовления мембран использовалась установка электроспиннинга NANON (МЕСС, Япония). Прядильные растворы представляли собой смесь VDF-TFE и PVP, растворенных в смеси ацетона (C₃H₆O) и изопропилового спирта (C₃H₈O). Общее содержание полимеров в растворе составило 6 масс %, при содержании наночастиц ZnO 15% от содержания полимеров. Для проведения исследований были изготовлены два типа растворов с содержанием PVP в смеси VDF-TFE/PVP

равным 0 и 40 масс %. Вязкость прядильных растворов определялась с помощью вискозиметра SV-10 (AND, Япония). Проводимость прядильных растворов исследовали с помощью кондуктометра Cond 7310 (WTW, Германия). Изучение структуры и химического состава сформированных мембран проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 (TESCAN, Чехия), оснащенного EDX детектором Xplore 30 (Oxford Instruments, Великобритания). Диаметр волокон в мембранах определяли с использованием программного обеспечения Image J 1.38 (National Institutes of Health, США). Антибактериальную активность исследовали в соответствии с рекомендациями ISO 20743: 2013 «Textiles — Determination of antibacterial activity of textile products» по методике, описанной в работе [2]. В качестве патогенной культуры был выбран штамм *Staphylococcus aureus* ATCC 25923.

Результаты. Проведенные исследования показывают, что увеличение содержания PVP в прядильных растворах приводит к уменьшению вязкости и проводимости раствора (Таблица 1), что обусловлено ростом количества компонента с меньшей молекулярной массой.

Таблица 1

Показатели вязкости, проводимости прядильных растворов и среднего диаметра волокон в сформированных мембранах

Содержание PVP, %	Вязкость, мкПа	Проводимость, мкСм/см	Средний диаметр, мкм
0	51.86±4.31	43.54±1.00	0.35±0.01
40	6.278±0.41	34.46±0.50	0.31±0.004

Исследования, проведенные методом сканирующей электронной микроскопии, позволили установить, что, вне зависимости от содержания PVP, в прядильных растворах все полученные мембраны сформированы переплетающимися между собой волокнами с нормальным распределением размеров по диаметру, имеют хорошо развитую взаимосвязанную пористость (Рисунок 1).

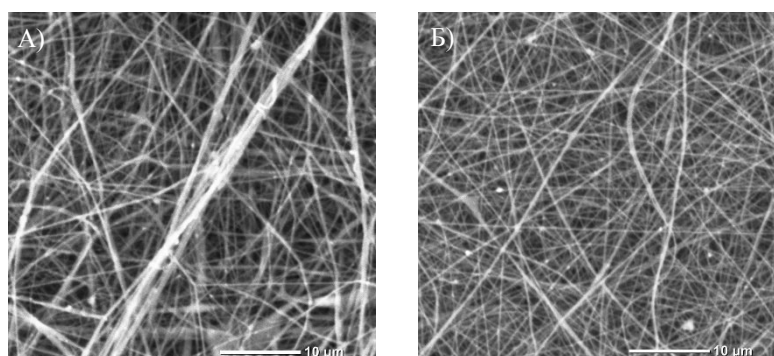


Рис.1. Структура сформированных мембран А) PVP 0% Б) PVP 40%

Отсутствие на поверхности мембран дефектов в виде потеков, сплавления и (т.д.) свидетельствует об оптимально подобранных технологических параметрах формирования мембран. С увеличением содержания PVP в прядильном растворе уменьшается средний диаметр волокон, формирующих мембрану, что обусловлено снижением вязкости и проводимости прядильных растворов. (Таблица 1). Состав мембран, не содержащих PVP, представлен углеродом и фтором - основными элементами, формирующими

полимерную цепь сополимера VDF-TFE. А также кислородом и цинком – основными элементами неорганического наполнителя. Увеличение содержания PVP приводит к обогащению химического состава сформированных мембран азотом и кислородом, что свидетельствует о формировании полимерного композита. Содержание цинка практически не изменяется (Таблица 2).

Таблица 2

Химический состав и антибактериальная активность исследуемых мембран

Содержание PVP, %	C	F	N	Zn	O	Антибактериальная активность, отн ед.
0	52.38±0.31	41.82±0.38	-	2.37±0.15	3.38±0.08	0,349
40	64.65±0.30	20.45±0.50	5.21±0.17	2.25±0.04	7.44±0.11	1,586

Исследования антибактериальной активности сформированных мембран показывают, что, при отсутствии изменений в содержании цинка, увеличение содержания PVP в сформированных мембранах увеличивает значение показателя антибактериальной активности ~ в 4 раза (Таблица 2). Таким образом, согласно ISO 20743: 2013, с увеличением содержания PVP наблюдается изменение антибактериальной активности сформированных мембран в отношении *Staphylococcus aureus* от слабой до значительной, что обусловлено увеличением способности мембран, содержащих PVP транспортировать, антибактериальный агент в зону контаминации.

Заключение. Методом электроспиннинга сформированы композиционные сегнетоэлектрические мембраны на основе сополимера VDF-TFE, PVP и наночастиц ZnO. Установлено, что увеличение содержания PVP уменьшает проводимость и вязкость прядильных растворов, обогащает химический состав сформированных мембран углеродом, азотом и кислородом, уменьшает средний диаметр волокон в мембране, не изменяя содержания Zn. Увеличение содержания PVP улучшает транспорт антибактериального агента в зону контаминации, увеличивая антибактериальную активность мембран.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 20-03-00171.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gavrilenko E.A., Goncharova D.A., Lapin I.N., Nemoikina A.L., Svetlichnyi V.A., Aljulaih A.A., Mintcheva N., Kulinich S.A. Comparative Study of Physicochemical and Antibacterial Properties of ZnO Nanoparticles Prepared by Laser Ablation of Zn Target in Water and Air // *Materials*. – 2019. – Vol.12(1). – P.15.
2. A.D. Badaraev, A. Koniaeva, S.A. Krikova, E.V. Shesterikov, E.N. Bolbasov, A.L. Nemoikina, V.M. Bouzник, K.S. Stankevich, Y.M. Zhukov, I.P. Mishin, E.Y. Varakuta, S.I. Tverdokhlebov. Piezoelectric polymer membranes with thin antibacterial coating for the regeneration of oral mucosa // *Applied Surface Science*. – 2020. – Vol.504. – P.35.