

УДК 677.494

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРЯДИЛЬНЫХ ГОЛОВОК РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Д.Б. Рыклин, В.М. Азарченко, М.А. Демидова

Витебский государственный технологический университет, Беларусь

*Повышение интереса к производству электроформованных нано- и микроволокон связано с уникальными свойствами и характеристиками вырабатываемых нетканых покрытий и структур. Данная статья посвящена определению рациональных режимов получения нановолокнистых материалов на установке «Fluidnatek LE-50» с использованием прядильных головок различной конструкции. Описаны особенности и специфики получаемых нановолокон на коаксиальной прядильной головке. Проведены экспериментальные исследования процесса электроформования материалов из раствора поливинилового спирта. В результате статистической обработки экспериментальных данных установлены зависимости расхода волокнообразующего раствора от напряжение на эмиттере и расстояния между электродами установки для каждой из прядильных головок. Определены режимы работы установки, обеспечивающие стабильное протекание процесса при максимальном расходе раствора.*

Электроформование является перспективным методом получения непрерывных нановолокнистых материалов с применением высокопотенциального электрического поля. Этот универсальный и эффективный метод позволяет получать волокна от субмикронного до нанометрового диаметра с использованием высокопотенциального электрического поля. Новейшие разработки в области электроформования сделали возможным производство нановолокон диаметром от нескольких до сотен нанометров [1, 2]. Полученные по этой технологии материалы разнообразного назначения могут быть использованы как в лабораторных, так и в промышленных условиях [3-6].

Возрастающий интерес к производству электроформованных нано- и микроволокон связан с уникальными свойствами и характеристиками вырабатываемых нетканых материалов и структур на их основе. Ряд характеристик, таких как высокое значение соотношения площади поверхности и объема волокон, разнообразие функциональных возможностей и превосходные механические свойства могут быть достигнуты лишь тогда, когда диаметр полимерного волокна снижен доnanoуровня. Также весьма примечательны свойства материала, обеспечивающие медленное и постепенное выделение добавленного в полимер активного вещества, что обуславливает его хорошую впитываемость и позволяет точно рассчитать дозировку.

Нановолокна представляют интерес для разнообразных видов применения, включая биотехнологию, заживление ран, доставку лекарств к органам, тканевую инженерию, создание протезов и каркасов медицинского назначения, перевязочных материалов, производство косметики,

фильтрацию, производство преобразователей и хранителей энергии, катализаторов и ферментных носителей, создание защитной одежды, датчиков, электронных и полупроводниковых материалов из-за их очень большого отношения площади поверхности к объему, гибкости поверхности и превосходных механических характеристик [7]. Такое разнообразие применений электроформованных нановолокон, особенно вырабатываемых из растворов полимеров, обусловило продолжение объема исследований и разработок в этой области. Работа в основном сосредоточена на расширении возможностей применения и конечного использования нановолокон.

Исследования проводились на установке для формирования нановолокнистых материалов «Fluidnatek LE-50», внешний вид которой представлен на рис.1. Волокнообразующий раствор подается из шприца с помощью насоса по капиляру к прядильной головке (эмиттеру), на которую поступает положительное напряжение. Расход раствора можно регулировать скоростью опускания поршня насосом. Нановолокна наносятся на материал подложки, закрепленный на вращающемся барабане (осадительный электрод), на который поступает отрицательное напряжение. Подбор компонентов раствора, регулирование параметров процесса и окружающей среды позволяют получать материалы из различных по составу и диаметру нановолокон [4].

Целью данной работы являлось определение рациональных режимов получения нановолокнистых материалов с использованием прядильных головок различной конструкции из водного раствора, содержащего 15% поливинилового спирта марки «Selvol 205» компании «Sekisui Specialty Chemicals Europe S.L.» (США). Динамическая вяз-

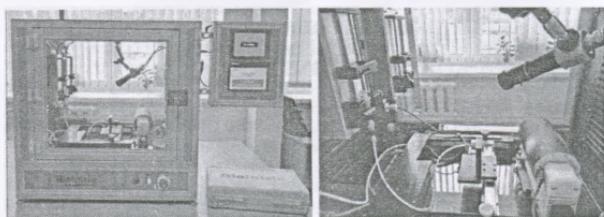


Рис. 1. Внешний вид (а) и рабочая зона (б) установки «Fluidnatek LE50».

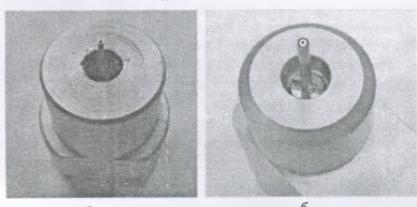


Рис. 2. Внешний вид обычной (а) и коаксиальной (б) прядильных головок.

кость раствора составляет 329.09 мПа·с, что входит в пределы рекомендуемого диапазона данного показателя для волокнообразующих растворов при электроформовании (от 100 до 3000 мПа·с). Было принято решение считать стабильным такое протекание процесса, при котором размер капли на кончике иглы формовочной головки не изменяется с течением времени, а процесс формирования и вытягивания струи из раствора происходит непрерывно.

Установка «Fluidnatek LE-50» может иметь обычную или коаксиальную прядильную головку. Внешний вид головок представлен на рис.2. В литературе отмечается, что коаксиальная головка, содержащая внутреннюю и наружную иглы, позволяет вырабатывать двухслойные нововолоконные конструкции. В публикации [7] описано формирование нановолокон с конструкцией ядро — оболочка, вырабатываемых путем коаксиального электроформования. Этот метод доказал свою универсальность для инкапсуляции биоревивантных молекул и нанокомпозитов [7]. В подобных исследованиях [8] в нановолокно поликапролактона была инкапсулирована модель белка путем электроформования с использованием коаксиальной прядильной головки. Таким образом, анализ источников показал, что нановолокна, электроформованные с применением коаксиальных прядильных головок, обладают рядом преимуществ при использовании в медицине в качестве потенциального носителя для доставки лекарств [9].

В качестве критерия эффективности процесса электроформования при проведении эксперимента был принят максимальный расход раствора.

Интервалы варьирования факторов эксперимента представлены в табл.1.

В результате статистической обработки экспериментальных данных получены регрессионные модели, описывающие зависимость расхода волокнообразующего раствора от напряжения на эмиттере и расстояния между формирующими электродами. При построении моделей использовались только такие соотношения параметров эксперимента, при которых процесс электроформования протекал стablyно.

Для обычной головки модель имеет следующий вид:

$$Q = D - 8.212P+ + 3.761DP+ + 3.214D2 + (1) \\ + 1.963P2.$$

Для коаксиальной головки:  
— внешняя игла

$$Q = 857.025 + D - 102.01P+ - 4.180D2 + (2) \\ + 4.713P2,$$

— внутренняя игла

$$Q = -684.0 + D + 54.279P+ - 5.682DP+ (3) \\ + 5.159D2 + P2.$$

Графические интерпретации полученных моделей представлены на рис.3 и 4.

Для всех трех игл наблюдаются схожие зависимости расхода раствора от параметров процесса. При

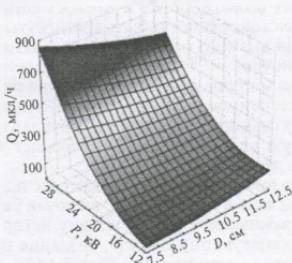


Рис. 3. Зависимость расхода волокнообразующего раствора от факторов эксперимента для обычной прядильной головки.

Таблица 1. Диапазоны и интервалы варьирования факторов эксперимента

Фактор	Диапазон варьирования		Интервал варьирования
	минимальный уровень	максимальный уровень	
Расход раствора $Q$ , мкл/ч	110	600	50
Напряжение на эмиттере $P_e$ , кВ	13	28	1
Напряжение на коллекторе $P_c$ , кВ	-5	-9	1
Расстояние между формирующими электродами $D$ , см	8	12	2

Таблица 2. Рациональные режимы производства нетканых нановолокнистых покрытий

Вид прядильной головки	Расстояние, см	Напряжение, кВ	Расход, мкл/ч
Обычная	8	25	600
Коаксиальная			
внешняя игла	8	25	600
внутренняя игла	8	26	600

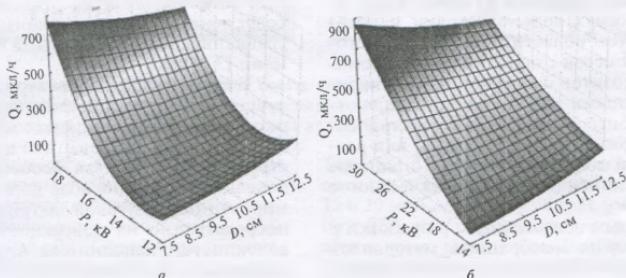


Рис. 4. Зависимость расхода волокнообразующего раствора от факторов эксперимента для внешней (а) и внутренней (б) игл коаксиальной прядильной головки.

увеличении напряжения возрастает расход раствора, при этом максимальный расход достигается при наименьшем расстоянии между формирующими электродами. Однако для внешней иглы коаксиальной прядильной головки установлено, что с увеличением расстояния при максимальном напряжении нарушается стабильность процесса, что ведет к существенному снижению расхода раствора.

В результате эксперимента были установлены рациональные значения параметров процесса, обеспечивающие стабильное производство нановолокнистых покрытий и материалов с применением обычной и коаксиальной прядильных головок (табл.2).

— Получены зависимости расхода волокнообразующего раствора поливинилового спирта от параметров работы установки «Fluidinatek LE-50» с использованием обычной и коаксиальной прядильных головок.

— Установлено, что наибольшее влияние на расход раствора и стабильность процесса оказывает расстояние между электродами. Максимальная производительность

установки достигается при минимальном расстоянии между электродами 8 см и напряжении на эмиттере 25–26 кВ.

#### Библиографический список

- Huang Z.M., Zhang Y.Z. e.a. // Compos. Sci. a. Technol. 2003. V.63. – P.2223-2253.
- Venugopal J., Ramakrishna S. // Appl. Biochem. a. Biotechnol. 2005. V.125. – P.147-157.
- Ji W., Sun Y. e.a. // Pharmaceutical Res. 2011. V.28. – P.1259-1272.
- Liu Y., He J.H. e.a. // Polymer Intern. 2008. V.57. – P.632-636.
- Li D., Wang Y., Xia Y. // Adv. Materials. 2004. V.16. № 4. – P.361-366.
- Рыклин Д.Б., Ясинская Н.Н. и др. // Вестник Брестской технологич. ун-та. 2016. № 1 (30). – С.90-98.
- Sun Z.C., Zussman E. e.a. // Adv. Materials. 2003. V.15. – P.1929-1932.
- Zhang Y.Z., Wang X. e.a. // Biomacromolecules. 2006. V.7. – P.1049-1057.
- Fang J., Wang X., Lin T. Functional applications of electrospun nanofibers – properties and functional applications. / Dr. Tong Lin (Ed.), Intech. 2011.