

УДК 677.051.12, 677.494

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАБОТЫ УСТАНОВКИ  
ДЛЯ ЭЛЕКТРОФОРМИРОВАНИЯ  
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ  
РАСТВОРОВ ПОЛИМЕРА\***

**RESEARCH PROCESS INSTALLATION  
FOR ELECTROFORMING, AT DIFFERENT CONCENTRATIONS  
OF POLYMER SOLUTION**

*A.P. КОРАБЕЛЬНИКОВ, А.Г. ШУТОВА, М.М. СМІРНОВ, К.А. СЕМЕНОВА*  
*A.R. KORABELNIKOV, A.G. SHUTOVA, M.M. SMIRNOV, K.A. SEMENOVA*

(Костромской государственный технологический университет)  
(Kostroma State Technological University)  
E-mail: tmm@kstu.edu.ru

*В статье приводятся результаты экспериментальных исследований процесса электроформирования с целью определения взаимосвязи между концентрацией раствора полимера и параметрами установки: расстоянием между электродами и скоростью вращения питающего электрода.*

*The article presents the results of experimental studies electroforming process to determine the relationship between the concentration of the polymer solution and the installation parameters: the distance between the electrodes and the feeding speed of the electrode.*

**Ключевые слова:** электроформирование волокон, электроспиннинг, концентрация раствора полимера, нановолокна.

**Keywords:** electroforming fibers, elektrospinning, polymer solution concentration, nanofibers.

Метод электроформирования нано- и микроволокон из растворов полимеров в настоящее время широко применяется в мировой практике [1] и представляет немалый интерес для научных исследований. Суть метода подробно описана в работах [2...4].

В [2] и [4] установлено, что характеристики раствора, такие как вязкость, поверхностное натяжение, электропроводность и др., оказывают значительное влияние на параметры устойчивого процесса волокнообразования и качество получаемого волокнистого материала при элек-

\* Работа выполнена по государственному заданию на выполнение научных исследований по проекту №1058.

троформировании нановолокон. Вышеперечисленные параметры растворов полимеров зависят как от качественного, так и от количественного состава.

Авторами была разработана установка для электроформирования нановолокон. Устройство и принцип действия установки описаны в работах [5], [6]. Ранее проведенные исследования по изучению процесса электроформирования нановолокон [7], [8] были направлены на оптимизацию конструктивных параметров установки и определение режимов ее работы, влияющих на процесс волокнообразования. В этих работах было отмечено, что процесс электроформирования устойчив при определенном сочетании свойств раствора и параметров технологического процесса.

На этом этапе нами были проведены экспериментальные исследования с целью определения влияния концентрации полимерного раствора на параметры работы установки, при которых наблюдается процесс устойчивого волокнообразования.

Для экспериментальных исследований использовался раствор полиметилметакрилата следующего состава:

- смесь растворителей: ацетон (технический) – 87% (по объему), 77% (по массе);

- дихлорэтан (технический) – 13% (по объему), 23% (по массе);

- полимер: полиметилметакрилат (стружка).

Концентрация раствора полимера менялась и устанавливалась на следующих уровнях: 2,5; 2; 1,5; 1; 0,75; 0,5; 0,25%. Снижение концентрации раствора полимера в этих исследованиях было вызвано нашим предположением о том, что размер получаемых волокон зависит от концентрации раствора. Снижение концентрации в определенном диапазоне позволит получать более тонкие волокна. Предположение основано на полученных ранее опытных данных.

Состав смеси растворителей был изменен, по сравнению с поисковыми исследованиями [7], [8], в связи с необходимостью снижения стоимости экспериментальных исследований.

При исследованиях измерялась величина разводки между электродами в момент начала волокнообразования и при установленном режиме. Таким образом фиксировалась скорость вращения питающего электрода, при которой процесс волокнообразования был устойчив.

Исследования проводились следующим образом: начальное значение расстояния между электродами устанавливалось на уровне 120 мм. Угловая частота вращения волокнообразующего электрода устанавливалась на уровне  $24 \text{ мин}^{-1}$  (максимально возможная величина для данной установки). Нормированный объем раствора заливался в ванну с электродом. После этого к электродам подавалось высокое напряжение. Напряжение повышалось плавно, вручную, регистрировался уровень напряжения, при котором возникали первые струи раствора, далее напряжение повышалось до максимального значения в 50 кВ. В тех случаях, когда при данной разводке и напряжении не наблюдалось устойчивого процесса волокнообразования, разводка между электродами нами уменьшалась до появления первых волокон, а затем – до стабилизации процесса. При снижении концентрации раствора полимера ниже 1,5% регулировка напряженности электрического поля путем изменения расстояния между электродами перестает оказывать заметное влияние на процесс волокнообразования при неизменной скорости вращения питающего электрода.

Скорость вращения питающего электрода – второй параметр установки, величина которого заметно влияет на устойчивость процесса волокнообразования, так как от нее зависит толщина пленки раствора полимера на его поверхности (количество раствора, подаваемого в рабочую зону). Поэтому при снижении концентрации раствора нами изменялась скорость вращения питающего электрода, и эксперимент повторялся с изменением разводки. Таким образом, были получены диапазоны значений разводки между электродами и значений угловой скорости вращения питающего электрода, обеспечивающие устойчивый процесс волокнообразования

при различных концентрациях раствора полимера.

Опыты с каждой концентрацией повторялись пятикратно. После их проведения

полученные данные усреднялись. Результаты показаны в табл. 1.

Таблица 1

Концентрация, %	Режим устойчивого волокнообразования			
	частота вращения $n$ , мин <sup>-1</sup>	разводка $l$ , мм	напряжение начала образования волокон $U_{нач}$ , кВ	напряжение устойчивого процесса $U_{уст}$ , кВ
2,5	24	120	46	50
2	24	100	42	50
1,5	24	97	50	50
1	23	63	50	50
	18	54	50	50
	13,6	50	50	50
0,75	13,6	85	50	50
0,5	13,6	48	50	50
0,25	10,2	47	50	50

Для анализа этих данных были построены графики, выявляющие тенденции и зависимости, при которых наблюдается устойчивое волокнообразование (рис. 1 – зависимость расстояния между электродами, при котором наблюдается стабильное

волокнообразование, от концентрации раствора полимера и рис. 2 – частота вращения питающего электрода, обеспечивающая стабильное волокнообразование, при различных концентрациях раствора).

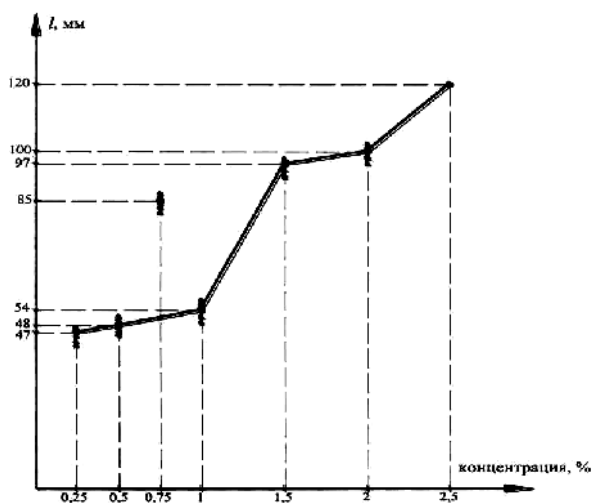


Рис. 1

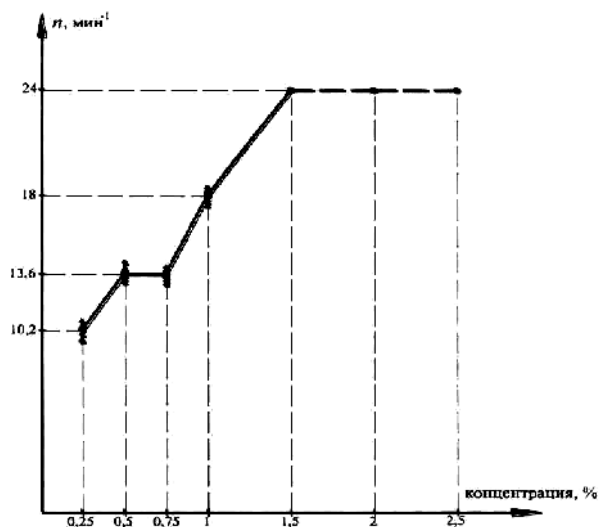


Рис. 2

Анализируя графики (рис. 1, 2), можно сказать, что для обеспечения стабильного процесса электроформирования волокон при уменьшении концентрации раствора необходимо увеличение напряженности электрического поля в рабочей зоне установки и изменение количества подаваемого в рабочую зону раствора путем умень-

шения скорости вращения питающего электрода.

На обоих графиках наблюдается несоответствие общей тенденции при концентрации раствора, равной 0,75%. Из анализа образцов (рис. 3 – микрофотография образца полученного волокнистого материала, увеличение  $1\times 1000$ , концентрация рас-

твора 1,5%) можно сделать вывод, что при данной концентрации образуется волокнистый слой из волокон наименьшего диаметра. Данное явление требует дополнительного изучения, так как оно может быть вызвано взаимодействием различных факторов, либо другими эффектами.

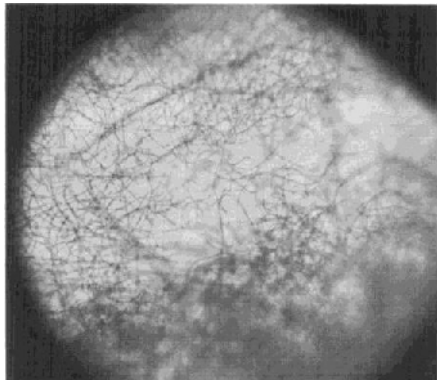


Рис. 3

Полученные результаты могут быть использованы для выбора диапазонов изменения параметров устройств при проектировании, создании и наладке оборудования для получения волокон методом электроформирования. Анализ полученных результатов говорит о необходимости исследований в направлении моделирования процесса подачи раствора полимера в рабочую зону установки.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана методика и проведены экспериментальные исследования процесса электроформирования волокон, результаты которых позволили определить основные тенденции взаимосвязи между концентрацией раствора и параметрами установки: скоростью вращения питающего электрода и расстоянием между электродами.

2. Установлено, что с уменьшением концентрации раствора полимера необходимо уменьшать расстояние между электродами и уменьшать угловую скорость вращения питающего цилиндра. Полученные результаты могут быть использованы для выбора диапазонов рабочих параметров установок для электроформирования нановолокон.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Корабельников А.Р., Шутова А.Г.* Область применения и перспективы развития нановолокнистых материалов // Вестник Костромского гос. техн. ун-та. – 2014, №1(32).
2. *Филатов Ю.Н.* Электроформование волокнистых материалов (ЭФВ-процесс) / Под ред. В.Н. Кириченко. – М.: Нефть и газ, 1997.
3. *Матвеев А.Т., Афанасов И.М.* Получение нановолокон методом электроформирования. – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010.
4. *Корабельников А.Р.* Анализ этапов процесса формирования нановолокон. Этап образования очагов струйного течения раствора // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2014, №5.
5. *Корабельников А.Р., Шутова А.Г., Потехин В.М.* Устройство для получения полимерных нано- и микроволокон и исследования ее работы // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013, №1.
6. Патент на полезную модель № 133529. Российская Федерация. Устройство для получения полимерных нано- и микроволокон / Корабельников А.Р. заявитель и патентообладатель Корабельников А.Р. (RU) №2013116218, ; заявл. 09.04.2013; решение о выдаче патента 17.05.2013.
7. *Корабельников А.Р., Шутова А.Г., Потехин В.М.* Исследование влияния формы электрода на процесс получения нановолокон в устройстве для электроформирования // Вестник Костромского гос. технол. ун-та. – 2013, №1 (30).
8. *Шутова А.Г.* Экспериментальные исследования процесса электроформирования волокон из растворов полимеров // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2014, №5.

## REFERENCES

1. Korabel'nikov A.R., Shutova A.G. Oblast' primeneniya i perspektivy razvitiya nanovoloknistyh materialov // Vestnik Kostromskogo gos. tehnol. un-ta. – 2014, №1(32).
2. Filatov Ju.N. Jelektroformovanie voloknistyh materialov (JeFV-process) / Pod red. V. N. Kirichenko. – M.: Neft' i gaz, 1997.
3. Matveev A.T., Afanasov I.M. Poluchenie nanovolokon metodom jelektroformirovaniya. – M.: MGU im. M.V.Lomonosova, 2010.
4. Korabel'nikov A.R. Analiz jetapov processa formirovaniya nanovolokon. Jetap obrazovaniya ochagov strujnogo techeniya rastvora // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2014, №5.
5. Korabel'nikov A.R., Shutova A.G., Potehin V.M. Ustrojstvo dlja poluchenija polimernih nano- i mikrovolon i issledovaniya ee raboty // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2013, №1.
6. Patent na poleznuju model' № 133529. Rossijskaja Federacija. Ustrojstvo dlja poluchenija polimernih nano- i mikrovolon / Korabel'nikov A.R.

zajavitel' i patentoobladatel' Korabel'nikov A.R. (RU) №2013116218, ; zajavl. 09.04.2013; reshenie o vydache patenta 17.05.2013.

7. Korabel'nikov A.R., Shutova A.G., Potehin V.M. Issledovanie vlijanija formy jelektroda na process poluchenija nanovolokon v ustrojstve dlja jelektroformirovanija // Vestnik Kostromskogo gos. tehnol. un-ta. – 2013, №1 (30).

8. Shutova A.G. Jeksperimental'nye issledovanija processa jelektroformirovanija volokon iz

rastvorov polimerov // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2014, №5

Рекомендована кафедрой теории механизмов и машин, деталей машин и проектирования технологических машин. Поступила 30.09.15.

---