

DOI 10.34216/2587-6147-2020-3-49-16-20

УДК 677.051. 12, 677.494

**Смирнов Максим Михайлович**

аспирант

Костромской государственной университет, г. Кострома, Россия

руководитель отдела разработки ПО

ООО «ФРАКТАЛ», г. Кострома, Россия,

maksensmirnov@gmail.com

**Корабельников Андрей Ростиславович**

доктор технических наук, профессор

Костромской государственной университет, г. Кострома, Россия

prostokar@yandex.ru

**Тихомиров Сергей Александрович**

аспирант

Костромской государственной университет, г. Кострома, Россия

инженер-программист

ЗАО «Пегас», г. Кострома, Россия,

tikhomirovs94@gmail.com

## РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ ФИЛЬЕРНЫМ СПОСОБОМ

*В данной статье рассматриваются результаты создания лабораторного оборудования для получения нано- и микроволокон методом многофильного электроформования, приведено подробное описание конструкции устройства подачи раствора полимера в зону электроформования и узла коллектора. Особое внимание уделено основным параметрам устройства, принципу работы и режимам электроформования. Дается сравнение с подобными устройствами, преимущества и недостатки разных вариантов подачи растворов в зону электроформования. Приведены результаты экспериментальных исследований на данной установке на примере водных растворов альгината натрия и поливинилового спирта и их смесей. Экспериментально определены режимы устойчивого электроформования. Получены образцы наноматериалов из смесей этих полимерных растворов. Проведен морфологический анализ полученных материалов и гистограммы распределения волокон по диаметру.*

**Ключевые слова:** электроформование, электроспиннинг, нановолокна, микроволокна, полимер, фильера, прядильный раствор, альгинат натрия, поливиниловый спирт.

Волокна, полученные в результате процесса электроформования, диаметром от 10 до 500 нанометров – это новый тип материалов с особыми свойствами, характеризующийся большой удельной поверхностью, хорошей удерживающей способностью и воздухопроницаемостью. Для получения материалов из таких волокон может использоваться широкий спектр полимеров, которые могут включать различные добавки, меняющие прочность, эластичность и другие свойства материалов. К основным областям применения слоев таких полимерных волокон можно отнести фильтрацию жидкостей и газов [1].

Существует большое количество способов получения нано- и микроволокон методом электроформования. Сравнительный анализ ряда известных методов приведен в работе [2].

В статье приводится вариант реализации устройства для электроформования фильерным способом. Устройство для электроформования со свободной поверхности описывалось ранее [3]. К основным достоинствам этого метода можно отнести его простоту и возможность формирования ориентированных материалов. К основным недостаткам – очень низкую производительность. Именно поэтому фильерный метод применяется в основном в лабораторно-испытательном и исследовательском оборудовании [4].

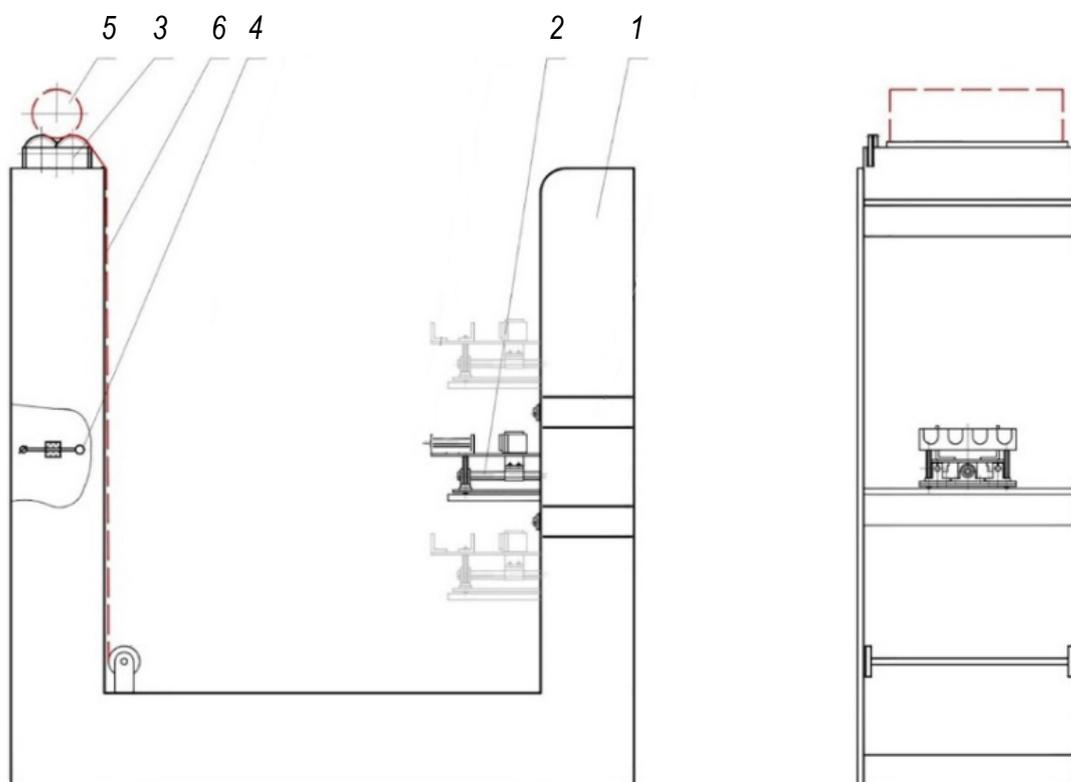
Схема разработанной экспериментальной установки для получения нано- и микроволокон фильерным методом из различных прядильных растворов изображена на рис. 1.

Устройство для производства нановолокнистого композитного материала из полимерных растворов методом электроформования (см. рис. 1) имеет модульную структуру, каждый ее модуль легко устанавливается или заменяется.

На корпус 1 устанавливаются основные рабочие модули – узел транспортировки собирающей подложки 3, узел подачи раствора полимера через фильеры 2. В корпус установки возможно устанавливать несколько узлов подачи полимерного раствора с различным количеством фильер. С противоположной стороны от узла подачи в корпус устанавливается собирающий электрод 4, форма которого обеспечивает наиболее равномерное осаждения волокна на подложку 6. Собирающий электрод 4 устанавливается за перемещающейся подложкой 6 и имеет регулировку по перемещению в горизонтальной плоскости. Между электродами под воздействием высокого напряжения от 5 до 100 кВ создается электрическое поле. В зону электроформования можно подавать горячий воздух для направления потока волокон и повышения интенсивности испарения. Для изменения морфологии и толщины получаемых волокон собирающий электрод оперативно заменяется на электрод другой формы, а также изменяется разводка между электродами. Наматывание воздухопроницаемой собирающей ленты осуществляют ведущие валики, покрытые эластичным материалом, которые обеспечивают ровное вращение приемного ролика 5. В качестве подложки могут быть использованы различные текстиль-

ные материалы или мембраны. Для формирования электрического поля с высокой напряженностью используется высоковольтный источник. Устройство для электроформования волокон из растворов полимеров имеет габаритные размеры не более 1500×1500×2000 мм. Устройство позволяет использовать для получения волокон различные составы как растворителей, так и полимеров, а также их композиции. В зоне электроформования с помощью источника высоковольтного напряжения может создаваться напряжение до 100 кВ. Ширина зоны осаждения составляет более 150 мм. Расстояние между электродами может меняться. Скорость перемещения подложки для осаждения может быть настроена.

Разработанное устройство обеспечивает получение нановолокнистых материалов из композиций растворов полимеров фильерным способом. Предусмотрена возможность регулирования основных параметров установки, таких как напряжение между электродами, скорость собирающей подложки, скорость подачи растворов, расстояние между электродами. Устройство оснащено механизмом создания попутных воздушных потоков, обеспечивающих более плотное осаждение волокон на собирающий электрод или собирающую подложку.

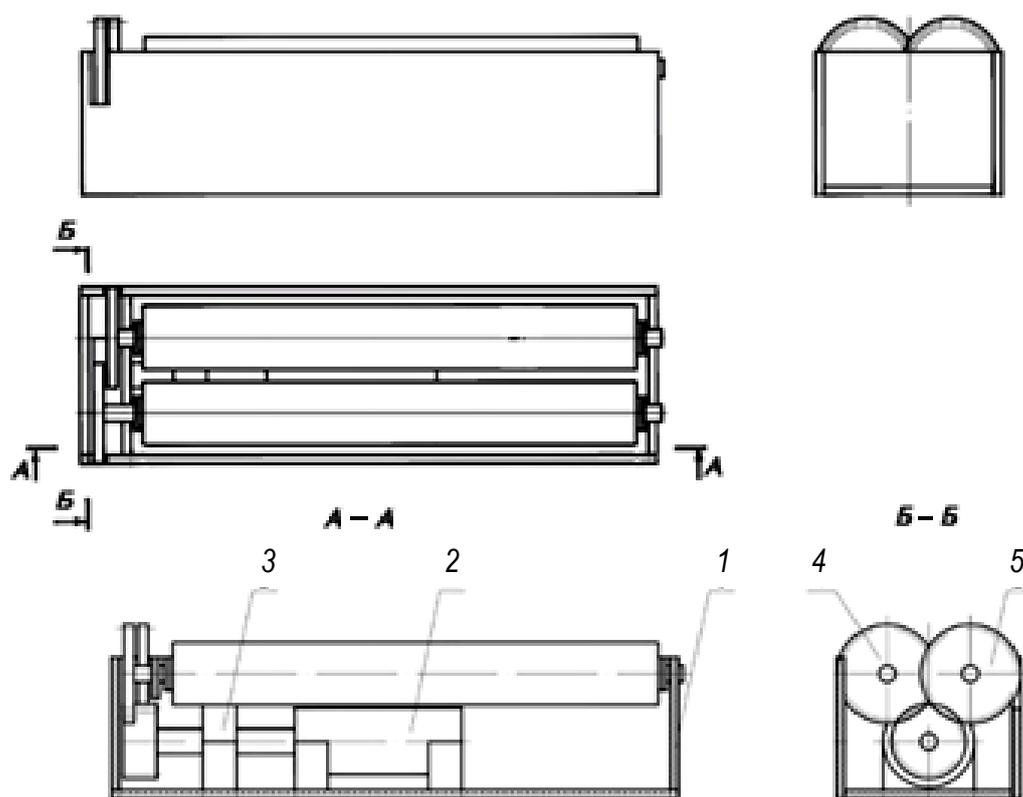


**Рис. 1. Модель экспериментальной установки:**

1 – корпус; 2 – узел подачи раствора; 3 – узел транспортировки подложки;  
4 – собирающий электрод; 5 – приемный ролик; 6 – перемещающаяся подложка

На рис. 2 показана схема узла перемещения воздухопроницаемой собирающей подложки. Корпус 1 устройства изготовлен из акрила толщиной 6 мм. Электродвигатель 2 для защиты от электростатического поля размещен в цилиндре из полипропилена с толщиной стенки 10 мм. Крутящий момент от вала двигателя передается на входной вал планетарного редуктора 3 с передаточным отношением 56. На выходном валу

планетарного редуктора установлена ведущая шестерня передаточного механизма с передаточным отношением 1,4. Ведомые шестерни 4 и 5 установлены на одной оси с ведущими валиками. Передаточные отношения подобраны таким образом, чтобы скорость перемещения подложки регулировалась от 0,75 мм/с. На ведущие валики устанавливается приемный валик, на котором закрепляется подложка.



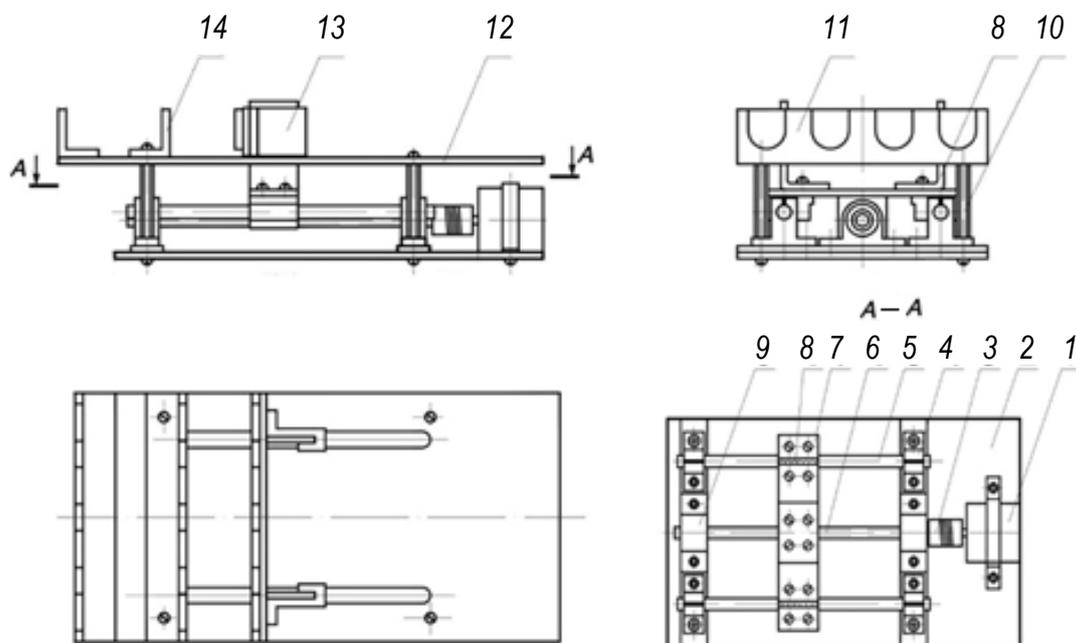
**Рис. 2. Схема узла перемещения воздухопроницаемой собирающей подложки:**

1 – корпус; 2 – электродвигатель; 3 – планетарный редуктор; 4, 5 – шестерни передаточного механизма

На рис. 3 показана схема узла подачи полимерного раствора через фильеры. Крутящий момент от шагового двигателя 1 через компенсирующую муфту 3 передается к ходовому винту 6, установленному на подшипниковых опорах 9, которые установлены на нижней пластине 2. Базовой платформой для крепления стойки толкателя 8 служит каретка модуля, перемещение которой происходит за счет вращения ходового винта. Базовый диапазон перемещения каретки составляет 100 мм. Скорость вращения винта может регулироваться, изменяя расход полимера через фильеры от 10 до 120 мг/с. Направляющие валы 5 с двух сторон закреплены в держателях вала 4. Для перемещения по валам использовали одну пару удлиненных линейных

подшипников 7, на них устанавливалась пластина с креплением к каретке, на которой были закреплены стойки толкателя 8 поршня фильер. Верхнюю 12 и нижнюю 2 пластины соединяет стойка 10. Фильеры устанавливаются в упор 14, и с помощью толкателя 13 и направляющей стойки 11 происходит подача полимерного раствора.

Управление шаговым двигателем происходит посредством программируемого контроллера шаговых двигателей. Блок поддерживает дробление основного шага двигателя на 1/2, 1/4, 1/8, 1/16 и 1/32 шага. Контроллер с шаговым двигателем приводится в действие от блока питания постоянного тока с регулируемым выходным напряжением от 0 до 48 В.



**Рис. 3. Схема узла подачи полимерного раствора:**

- 1 – двигатель; 2 – нижняя пластина; 3 – компенсирующая муфта; 4 – держатель вала; 5 – направляющий вал; 6 – ходовой винт; 7 – модуль с линейным подшипником; 8 – стойка толкателя; 9 – опора ходового винта; 10 – стойка; 11 – стойка направляющая; 12 – пластина верхняя; 13 – толкатель; 14 – упор

На разработанном устройстве проведены эксперименты с использованием полимерных растворов для определения режимов устойчивого волокнообразования и отладки работы установки, в ходе исследований были получены образцы нановолокнистых материалов. На рис. 4 показан процесс электроформования на разработанной установке.

Для получения материалов методом электроформования использовались вариации водного раствора альгината натрия (АН) и раствора поливинилового спирта (ПВС) и их смеси. Перед электроформованием растворы специально подготавливались с целью уменьшения поверхностного натяжения и вязкости.

На рис. 5 показан полученный материал из раствора АН 2 % + ПВС 6 % в соотношении

25/75. После проведения электронной микроскопии был оценен диапазон диаметров получаемых волокон: 50–200 нм.

Полученные материалы могут использоваться как элементы фильтров, в качестве ранаемых покрытий и для других целей.

#### ВЫВОДЫ

1. Создана экспериментальная установка для получения нано- и микроволокон многофильерным методом электроформования.

2. Проведены экспериментальные исследования процесса электроформования из растворов полимеров. Получены образцы наноматериалов из смесей водных растворов альгината натрия и поливинилового спирта.



**Рис. 4. Процесс электроформования на разработанной установке**

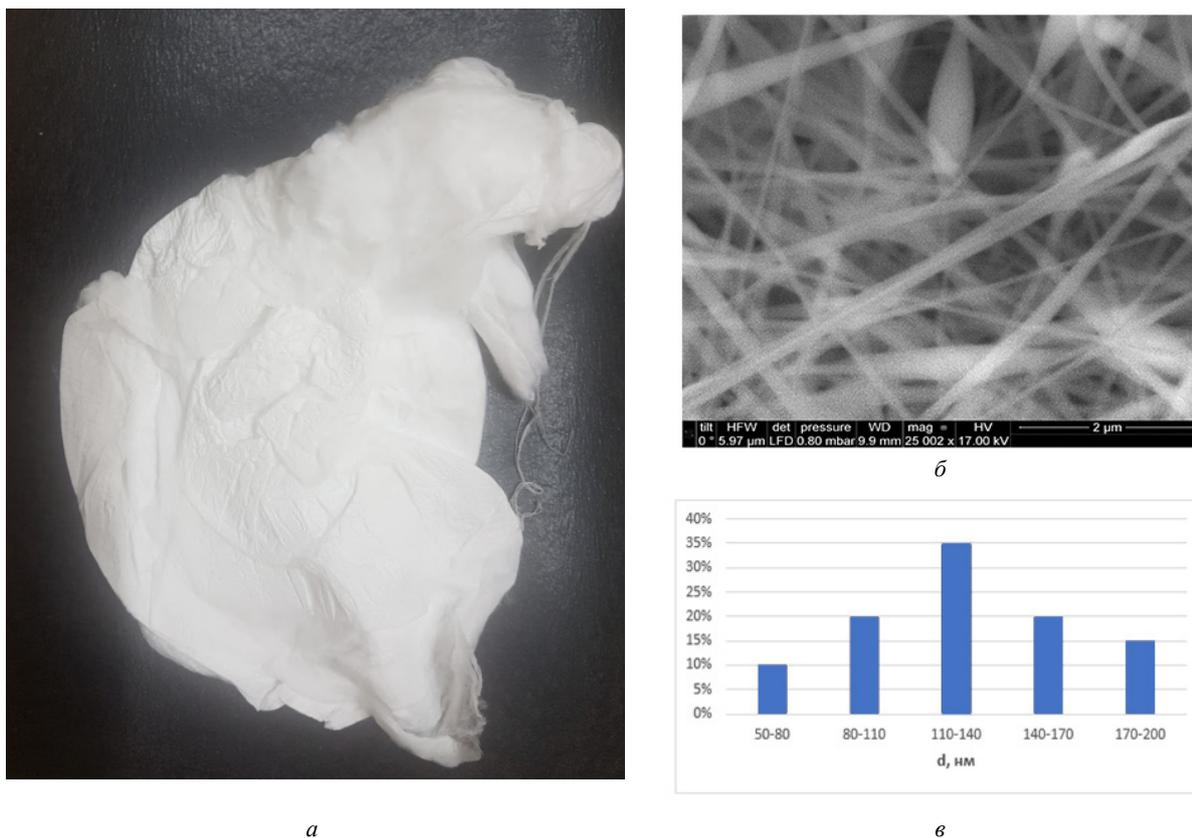


Рис. 5. Образец (а), микрофотография (б) полученного материала и гистограмма (в) распределения волокон по диаметру в материале, полученном из АН 2% + ПВС 6% в соотношении 25/75

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корабельников А. Р., Шутова А. Г. Область применения и перспективы развития нановолокнистых материалов // Вестник Костромского государственного технологического университета. – 2014. – № 1(32). – С. 48–51.
2. He J.-H., Liu Y., Xu L. Apparatus for Preparing Electrospun Nanofibers: A Comparative Review // Mater. Sci. Tech., 26 (2010), 11, P. 1275–1287.
3. Корабельников А. Р., Шутова А. Г., Потехин В. М. Устройство для получения полимерных нано- и микроволокон и исследования его работы // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2013. – № 1(343). – С. 127–132.
4. Создание лабораторного оборудования для получения новых наноструктурных материалов / А. Р. Корабельников, А. Г. Шутова, М. М. Смирнов, К. А. Семенова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015. – № 4(358). – С. 225–228.

#### REFERENCES

1. Korabel'nikov A. R., SHutova A. G. Oblast' primeneniya i perspektivy razvitiya nanovoloknistyh materialov // Vestnik Kostromskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2014. – № 1(32). – S. 48–51.
2. He J.-H., Liu Y., Xu L. Apparatus for Preparing Electrospun Nanofibers: A Comparative Review // Mater. Sci. Tech., 26 (2010), 11, P. 1275–1287/
3. Korabel'nikov A. R., SHutova A. G., Potekhin V. M. Ustrojstvo dlya polucheniya polimernyh nano- i mikrovolon i issledovaniya ego raboty // Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti. – 2013. – № 1(343). – S. 127–132.
4. Sozdanie laboratornogo oborudovaniya dlya polucheniya novyh nanostrukturnyh materialov / A. R. Korabel'nikov, A. G. Shutova, M. M. Smirnov, K. A. Semenova // Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti. – 2015. – № 4(358). – S. 225–228.