

**ОБОСНОВАНИЕ ЗАКОНА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАНОВОЛОКОН  
ПО ДИАМЕТРУ В МАТЕРИАЛАХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ  
ЭЛЕКТРОФОРМОВАНИЯ**

**THE LAW SUBSTANTIATION OF NANOFIBERS DISTRIBUTION  
BY DIAMETER IN MATERIALS OBTAINED  
BY METHOD ELECTROFORMATIONS**

*Д.Б. РЫКЛИН, М.А. ДЕМИДОВА, В.М. АЗАРЧЕНКО, К.В. СКРОЦКАЯ*  
*D.B. RYKLIN, M.A. DEMIDOVA, V.M. AZARCHENKO, K.V. SKROTSKAYA*

*(Витебский государственный технологический университет, Беларусь)*

*(Vitebsk State Technological University, Belarus)*

*E-mail: ryklin-db@mail.ru; demidova.mariya00@gmail.com;  
azarchenko22@mail.ru; katarinaskr@gmail.com*

*Инновационные материалы с механизмом таргет-доставки, используемые для нужд биомедицины и косметологии, должны отвечать строгим требованиям по составу, времени и характеру биodeградации, а они напрямую зависят от морфологии и структуры составляющих материал нановолокон. Диаметр нановолокна является наиболее значимой характеристикой его структуры, и важным вопросом является оценка закона его распределения как для корректной статистической обработки экспериментальных данных, так и для анализа процесса электроформования. В связи с этим в статье устанавливается и обосновывается закон распределения диаметра нановолокон в материалах с таргет-компонентом, получаемых методом электроформования для нужд биомедицины. Экспериментальные исследования процесса электроформования проводились на установке Fluidnatek LE-50. Изображения электроформованных материалов были получены с использованием электронного сканирующего микроскопа LEO 1420 (Carl Zeiss, Германия). Доказано, что распределение волокон по диаметру в образцах, полученных при стабильном протекании процесса электроформования, соответствует логнормальному закону. Подтверждена гипотеза о том, что расщепление струи прядильного раствора в зоне между эмиттером и коллектором установки может рассматриваться по аналогии с процессом дробления частиц в других отраслях производства.*

*Innovative materials with a target delivery mechanism used for the needs of biomedicine and cosmetology must meet strict requirements for the composition, time and nature of biodegradation, which directly depend on the morphology and structure of nanofibers. The diameter of a nanofiber is the most significant characteristic of its structure. An important issue is the assessment of its distribution, both for the correct statistical processing of experimental data and for the analysis of the electrospinning process. In this regard, the article establishes the distribution law of the nanofibers diameter of in electrospun materials with a target component. The experiments were carried out on the machine Fluidnatek LE-50. Images of the electrospun webs were obtained using a scanning electron microscope LEO 1420 (Carl Zeiss, Germany). It is proved that the distribution of the fibers diameter in the samples obtained with a stable course of the electrospinning process corresponds to a*

*lognormal law. The hypothesis that the splitting of the spinning solution jet in the zone between the emitter and the collector can be considered by analogy with the process of particle crushing in other industries is confirmed.*

**Ключевые слова:** электроформование, диаметр нановолокна, поливиниловый спирт, глицерин, закон распределения.

**Keywords;** electrospinning, nanofiber diameter, polyvinyl alcohol, glycerin, distribution law.

Электроформование является одним из наиболее перспективных способов получения новых видов текстильных изделий, позволяющих вырабатывать покрытия и материалы из волокон от субмикронных диаметров до нанометровых диаметров с применением высокопотенциального электрического поля [1]. Производство подобных волокон позволяет решить ряд специфических проблем, что связано с уникальными свойствами и характеристиками микро- и нановолокон. Разработки, посвященные созданию подобных электроформованных материалов, ведутся специалистами Китая, Канады, Южной Кореи, Японии, Индии, России, Таиланда и других стран [2...7]. Результатом становятся разнообразные материалы и вещества для различных биомедицинских целей, таких как создание биомедицинских каркасов сосудов [3], лечение раковых опухолей, воспалений кишечника, регенерация костной ткани [4] и ткани органов [5], защиты раневых поверхностей от экзогенных организмов [6], доставки специфических лекарственных средств к пораженным внутренним органам и системам организма [7]. В связи с этим большую актуальность имеют исследования, посвященные углубленному изучению как процессов электроформования, так и получаемых данным способом волокон – их структуры, морфологии и свойств.

Структура неоднородного электроформованного материала позволяет обеспечить медленное и постепенное выделение активных веществ, что обуславливает хорошую впитываемость и позволяет точно рассчитывать дозировку. В настоящее время уделяется внимание созданию терапевтических средств, которые позволят с помощью механизма таргет-доставки снизить токсичес-

кую нагрузку и связанные с ней побочные эффекты в организме пациента, а также сделать терапию более интенсивной и эффективной из-за прямой доставки лекарственного средства к пораженному органу. Материалы для биомедицины должны отвечать строгим требованиям по составу, времени и характеру биодеградации, а они напрямую зависят от морфологии и структуры составляющих материал нановолокон. Так как диаметр нановолокна является случайной величиной, важным вопросом является оценка закона его распределения, как для корректной статистической обработки экспериментальных данных, так и для анализа процесса электроформования.

Целью работы является обоснование закона распределения нановолокон по диаметру в материалах, получаемых методом электроформования.

Попытки математически описать структуру нановолокон из различных полимеров предпринимались неоднократно. При этом единой точки зрения о законе распределения нановолокон по диаметру на данный момент не сформировано. Анализ источников показал, что данное распределение описывается разными законами [10...14], в связи с чем сравнение средних величин диаметров нановолокон является не совсем корректным. При этом важно обращать внимание не только на изменение среднего значения, но и на асимметрию закона и поле рассеяния значений диаметров волокон.

Ряд авторов отмечают, что распределение диаметра электроформованных нановолокон достаточно часто может быть описано логарифмически нормальным (логнормальным) законом [12...14]. Однако встречается и точка зрения о том, что значения

диаметров подчиняются нормальному закону, объясняя это тем фактом, что все нановолокна в материале изготавливаются одновременно [10]. Сторонниками данной теории признается тот факт, что очень часто гистограммы распределения диаметров волокна далеки от нормального закона, в связи с чем предложено комбинировать несколько распределений для приближения вида их суммы к реальной форме [10].

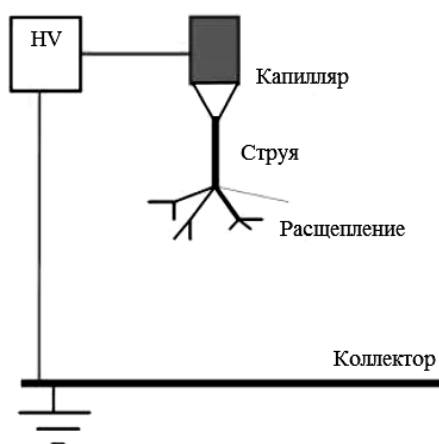


Рис. 1

Очевидно, что обоснование закона распределения нановолокон по диаметру должно основываться на анализе процесса электроформования. Известно, что данный процесс происходит за счет воздействия электрического поля на раствор или расплав полимера, удерживаемый за счет его собственного поверхностного натяжения на конце капилляра. В процессе электроформования можно выделить четыре области (рис. 1) [1], [15]:

- 1) базовая область – заряженная поверхность раствора на конце капилляра;
- 2) область струи, где раствор движется вдоль прямой линии;
- 3) область формирования, где струи многократно расщепляются;
- 4) область сбора оседающих на поверхность подложки или коллектора нановолокон.

Очевидно, что формирование нановолокна происходит в области, где полимерная струя расщепляется. Значения диаметров электроформованных волокон будут зависеть от протекания двух основных про-

цессов: расщепления и вытягивания. Если принять допущение о том, что процесс вытягивания струй раствора на всех этапах формирования нановолокна происходит одинаково, то основное влияние на характер морфологии волокон, а именно на закон распределения их диаметров, оказывает именно процесс расщепления.

Поскольку в области исследований электроформования не выявлено работ, содержащих математическое описание процесса расщепления струй прядильного раствора, нами были проанализированы схожие процессы дробления частиц, описанные в других областях знания.

Академик А.Н. Колмогоров предложил математическую модель, аналитически объясняющую возникновение логнормального распределения размеров частиц при дроблении [16]. Впоследствии профессором А. Ф. Филипповым было внесено уточнение, что логнормальный закон распределения будет справедлив, если масса частицы будет заменена какой-либо иной характеристикой частицы, например энергией, а механическое дробление – любым другим способом порождения одной частицей нескольких [17]. В текстильной промышленности подтверждение данному закону распределения находится в исследовании процессов разрыхления и очистки волокон. При анализе процессов обработки клочков волокон барабанными колковыми очистителями-рыхлителями было установлено, что массы клочков подчиняются логнормальному распределению после 4...6 этапов разрыхления независимо от того, какому распределению они подчинялись изначально [18]. Скорость перехода распределения массы клочков к логнормальному распределению зависит от соотношения вероятностей рыхления и разделения клочков [19].

Данный результат справедлив при допущении, что скорость дробления (уменьшения размеров частиц) постоянна, то есть не зависит от размеров дробящихся частиц. В случае дробления твердых частиц, вызванного их соударением, очевидно, что с уменьшением размера частицы интенсивность ее соударений с другими частицами или деталями дробильного агрегата может

уменьшаться в силу того, что вероятность столкновения с другими частицами снижается. А.Н. Колмогоровым высказано предположение о том, что зависимость скорости дробления от размеров частиц приводит к неприемлемости применения логнормального закона распределения их размеров, что доказано математически в работе [20]. Однако в процессе формирования нановолокон расщепление струи прядильного раствора осуществляется не за счет взаимодействия отдельных струй, а вследствие воздействия на них электрического поля. Таким образом, можно считать процесс расщепления струи стационарным при условии постоянства скорости расщепления струй на всем пути от эмиттера до коллектора. Если рассматривать процесс расщепления струи прядильного раствора по аналогии с процессом дробления частиц, то стабильным этот процесс можно считать в случае доказанного соответствия распределения диаметров нановолокон логнормальному закону.

#### *Методы*

Для оценки соответствия распределения диаметра волокон логнормальному закону проведены экспериментальные исследования процесса электроформования на установке Fluidnatek LE-50.

Выбор состава прядильного раствора осуществлялся на основании анализа ранее проведенных экспериментальных исследований, в ходе которых установлено, что в качестве волокнообразующего полимера для изготовления биodeградирующих нановолокнистых материалов целесообразно использовать поливиниловый спирт (ПВС) марки Arkofil PPL. Полученные материалы не содержат видимых дефектов и характеризуются низкой неравномерностью нановолокон по диаметру [8].

С учетом биомедицинской направленности разрабатываемого материала в качестве функциональной добавки предложено использовать глицерин. Глицерин является одним из важных компонентов в косметологии и медицине. Он входит в состав многих кремов, мазей, мыла и выполняет защитную функцию кожи, так как сохраняет влагу в клетках кожи. В медицине его ис-

пользуют в качестве антисептика при комплексном лечении многих заболеваний, особенно кожных. С другой стороны, глицерин оказывает пластифицирующее действие на полимеры, существенно изменяет такие важные свойства прядильных растворов, как динамическая вязкость, поверхностное натяжение и электропроводность. Таким образом, введение глицерина в состав водных растворов поливинилового спирта влияет не только на свойства получаемых материалов, но и на протекание процесса электроформования. Установлено, что для минимизации количества дефектов электроформование из растворов поливинилового спирта с добавлением глицерина его содержание не должно превышать 8% [9].

Для проведения исследований были приготовлены 3 варианта прядильных растворов: базовый 14%-ный раствор поливинилового спирта без глицерина и растворы, полученные при добавлении в базовый раствор 4 и 7 % глицерина. Нарботка 9 образцов материалов осуществлена из трех растворов при трех значениях их расхода: 1,0, 1,3, 1,6 мл/ч.

При получении образцов расстояние между электродами составляло 100 мм, а частота вращения коллектора 200 мин<sup>-1</sup>. Значения напряжений на эмиттере и коллекторе корректировались с учетом требуемого расхода прядильного раствора.

Все образцы получены при стабильном процессе электроформования и являются практически бездефектными. Для изучения структуры полученных электроформованных материалов и влияния на нее состава и расхода формовочного раствора были получены их изображения при различном увеличении с использованием электронного сканирующего микроскопа LEO 1420 (Carl Zeiss, Германия).

#### *Результаты и обсуждения*

Гипотеза о том, что распределение диаметров волокон в образце подчиняется конкретному закону, принимается при условии, что расчетное значение критерия  $\chi^2$  меньше критического значения, определяемого с учетом доверительной вероятности и числа степеней свободы. Обработка ре-

зультатов измерений осуществлялась с использованием программы Statistica for Windows. Значения критерия  $\chi^2$  сопоставлялись с критическими значениями  $\chi^2_{кр}$  при заданной доверительной вероятности 0,99 и скорректированных значениях числа степеней свободы  $f_{корр}$ , установленных для каждого конкретного образца.

Анализ данных, представленных в табл. 1 (характеристики электроформован-

ных волокон), показал, что распределение нановолокон образцов 1, 3 и 6 по диаметру не соответствует нормальному закону. Следовательно, очевидно, что применение нормального закона для описания распределения нановолокон по диаметру в материалах, полученных методом электроформования, не корректно.

Т а б л и ц а 1

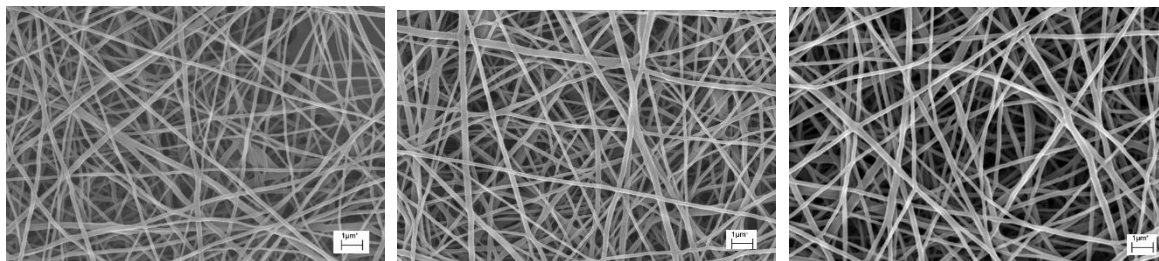
Номер образца	Содержание глицерина, %	Расход полимера, мл/ч	Нормальное распределение			Логнормальное распределение		
			$\chi^2$	$\chi^2_{кр}$	$f_{корр}$	$\chi^2$	$\chi^2_{кр}$	$f_{корр}$
1	0	1,0	18,23	9,21	2	4,76	9,21	2
2	0	1,3	4,81	9,21	2	0,33	9,21	2
3	0	1,6	27,80	9,21	2	8,31	9,21	2
4	4	1,0	4,00	9,21	2	2,59	11,36	3
5	4	1,3	6,81	11,36	3	1,67	11,36	3
6	4	1,6	13,47	6,64	1	3,22	6,64	1
7	7	1,0	5,47	13,28	4	1,38	11,36	3
8	7	1,3	4,38	9,21	2	0,56	9,21	2
9	7	1,6	6,77	11,36	3	1,56	9,21	2

Далее было проверено соответствие закона распределения диаметров нановолокон логнормальному закону, так как принято допущение о том, что масса частицы может являться аналогом диаметра волокна, а механическое дробление может рассматриваться подобно расщеплению полимерной струи. Установлено, что распределение электроформованных волокон по диаметру для всех полученных образцов соответствует логнормальному закону с правосторонней асимметрией. Для образцов были рассчитаны основные параметры

закона распределения, представленные в табл. 2 (характеристики электроформованных волокон). Изображения образцов 1, 3 и 6, полученные при увеличении в 15000 раз, представлены на рис. 2 (изображения электроформованных материалов, полученные при увеличении в 15000 раз: а – образец 1, б – образец 3, в – образец 6), а соответствующие им гистограммы – на рис. 3 (гистограммы распределения нановолокон по диаметру: а – образец 1, б – образец 3, в – образец 6).

Т а б л и ц а 2

Номер образца	Параметры закона распределения		Диаметр волокна d, нм	Коэффициент вариации CV <sub>d</sub> , %	Коэффициент асимметрии A
	$\mu$	$\sigma$			
1	5,130	0,296	161,78	30,23	0,283
2	5,166	0,241	170,18	24,50	0,184
3	5,233	0,315	178,29	32,27	0,323
4	5,332	0,207	202,41	20,93	0,133
5	5,262	0,258	186,63	26,23	0,211
6	5,276	0,295	187,30	30,11	0,280
7	5,294	0,214	194,71	21,69	0,143
8	5,243	0,253	183,32	25,71	0,203
9	5,229	0,250	180,79	25,44	0,198

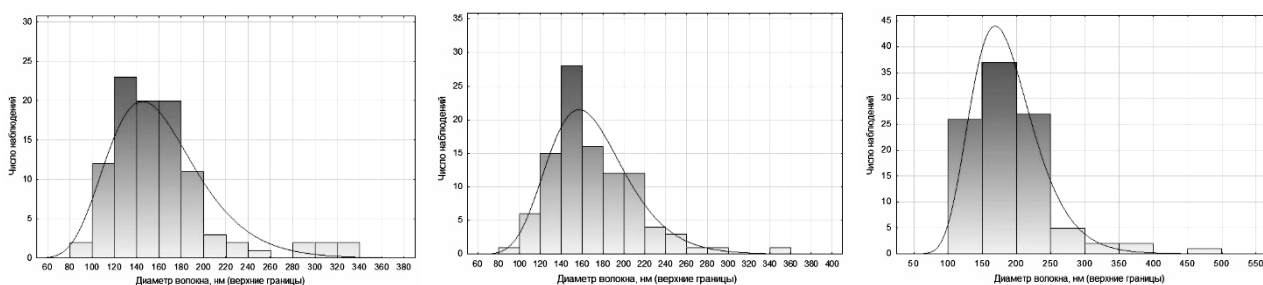


а)

б)

в)

Рис. 2



а)

б)

в)

Рис. 3

Анализируя данные табл. 2, можно отметить, что все полученные распределения характеризуются положительной асимметрией, указывающей на преобладающее количество волокон в образце с диаметром меньше среднего значения. Для образцов 1, 3 и 6 коэффициент асимметрии превышает 0,25, в связи с чем асимметрия не может считаться незначительной. Как следствие, для этих образцов гипотеза о нормальном законе распределения не была подтверждена.

Коэффициент вариации диаметра волокна находится в тесной корреляции с коэффициентом асимметрии распределения ( $r=0,998$ ). Этот факт свидетельствует о том, что с уменьшением неравномерности волокон по диаметру распределение приближается к нормальному закону. Связь между указанными характеристиками может быть описана следующим образом:

$$A = 0,0165 \cdot C_v - 0,22. \quad (1)$$

Таким образом, незначительная асимметрия закона распределения ( $A < 0,25$ ) достигается при условии, что коэффициент

вариации волокон по диаметру  $C_v$  меньше 28,5 %.

Влияние расхода прядильного раствора на математическое ожидание диаметра волокна существенно зависит от состава раствора. Для раствора, не содержащего глицерин, повышение расхода на 0,1 мл/ч приводит к увеличению диаметра волокна на 2,75 нм. Для неоднородных волокон имеет место противоположная тенденция: с увеличением расхода раствора с 1 мл/ч до 1,3 мл/ч математическое ожидание диаметра волокна снижается на 6...8 %, в зависимости от содержания глицерина, а при дальнейшем повышении расхода значение диаметра стабилизируется и изменяется незначительно.

## В Ы В О Д Ы

В результате анализа структуры нановолокнистых материалов разного состава доказано, что распределение волокон по диаметру в образцах, полученных при стабильном протекании процесса электроформования, соответствует логнормальному закону. Таким образом, подтверждена гипотеза о том, что расщепление струи прядильного

раствора в зоне между эмиттером и коллектором установки может рассматриваться по аналогии с процессом дробления частиц в других отраслях производства. При этом соответствие распределения логнормальному закону может использоваться в качестве одного из критериев стабильности процесса электроформования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Филатов Ю.Н.* Электроформование волокнистых материалов (ЭФВ-процесс). – М., 2001.
2. *Bucci R., Clerici F.* Peptide grafting strategies before and after electrospinning of nanofibers // *Acta-Bio-materialia*. – № 122, 2021. P.82...100.
3. *Kudryavtseva V., Tverdokhlebov S.* Magnetron plasma mediated immobilization of hyaluronic acid for the development of functional double-sided biodegradable vascular graft // *Applied Surface Science*. – №529, 2020. P.147...196.
4. *Rethinam S., Gobi N.* Enhanced bone regeneration using an electrospun nanofibrous membrane – A novel approach // *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. – № 53, 2019. P.101...163.
5. *Romo-Urbe A.* Electrospun biomimetic scaffolds of biosynthesized poly( $\beta$ -hydroxybutyrate) from *Azotobacter vinelandii* strains. Cell viability and bone tissue engineering // *Materials for Biomedical Engineering*. – 2019. P.203...234
6. *Corduas F., Lamprou D.A.* Long-acting implantable devices for the prevention and personalised treatment of infectious, inflammatory and chronic diseases // *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. – 2020, № 60. 101952.
7. *Joshi G., Yadav K.S.* Polylactideglycolic acid (PLGA)-based green materials for drug delivery // *Applications of Advanced Green Materials*. – 2021. P.425...440.
8. *Ryklin D.B., Azarchenko V.M., Demidova M.A.* Determination of expedient conditions of electrospinning using variously designed spinning heads // *Fibre Chemistry*. – № 51, 2019. P.223...226.
9. *Рыклин Д.Б., Ясинская Н.Н., Демидова М.А., Азарченко В.М.* Оценка влияния добавки глицерина в прядильный раствор на структуру электроформованных материалов // *Международ. науч.-практ. форум "SMARTEX"*. – 2020, №1. С. 88...93.
10. *Milašius R., Malašauskiene J., Kuchanauskaitė E.* Possibilities for the estimation of electrospun nanofiber diameter distribution by normal (Gaussian) distribution // *Fibres and textiles in Eastern Europe*. – № 24, 2016. P.23...28.
11. *Angammana, C.J. & Jayaram, S.H.* A theoretical understanding of the physical mechanisms of electrospinning, Proceedings of ESA Annual Meeting on Electrostatics. – 2011. P.1...9.
12. *Ellison C.J., Phatak A., Giles D.W., Macosko C.W., Bates F.S.* Melt blown nanofibers: fiber diameter

distributions and onset of fiber breakup // *Polymer*. – №48, 2007. P.3306...3316.

13. *Dosunmu O.O., Chase G.G., Kataphinan W., Reneker D.H.* Electrospinning of polymer nanofibres from multiple jets on a porous tubular surface // *Nanotechnology*. – №17, 2006. P.1123...1127.

14. *Tan D.H., Zhou C., Ellison C.J., Kumar S., Macosko C.W., Bates F.S.* Meltblown fibers: Influence of viscosity and elasticity on diameter distribution // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. – №165, 2010. P.892...900.

15. *Hamzeh S., Mirafteb M., Yoosefinedaj A.* Study of electrospun nanofiber formation process and their electrostatic analysis // *Journal of Industrial Textiles*. – №44, 2013. P.147...158.

16. *Колмогоров А.Н.* О логарифмически нормальном законе распределения размеров частиц при дроблении. – *ДАН СССР* 31, 2 (1941), С. 99...101.

17. *Филиппов А.Ф.* О распределении размеров частиц при дроблении // *Теория вероятности и ее применение*. – 1961, 3 (6). С. 299...318.

18. *Самойлова Т. А.* Разработка методов исследования процессов разъединения, разрыхления и очистки волокнистого сырья с использованием имитационных моделей: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 2017.

19. *Самойлова Т.А., Севостьянов П.А., Забродин Д.А., Савельев С.Г.* Статистические аспекты моделирования рыхления клочков хлопка // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. – 2013, № 1. С. 147...150.

20. *Королев В. Ю.* О распределении размеров частиц при дроблении // *Информатика и ее применение*. – 2009, № 3. С. 60...68.

#### REFERENCES

1. *Filatov Yu.N.* Elektroformovanie voloknistykh materialov (EFV-protsess). – М., 2001.
2. *Bucci R., Clerici F.* Peptide grafting strategies before and after electrospinning of nanofibers // *Acta-Bio-materialia*. – № 122, 2021. P.82...100.
3. *Kudryavtseva V., Tverdokhlebov S.* Magnetron plasma mediated immobilization of hyaluronic acid for the development of functional double-sided biodegradable vascular graft // *Applied Surface Science*. – №529, 2020. P.147...196.
4. *Rethinam S., Gobi N.* Enhanced bone regeneration using an electrospun nanofibrous membrane – A novel approach // *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. – № 53, 2019. P.101...163.
5. *Romo-Urbe A.* Electrospun biomimetic scaffolds of biosynthesized poly( $\beta$ -hydroxybutyrate) from *Azotobacter vinelandii* strains. Cell viability and bone tissue engineering // *Materials for Biomedical Engineering*. – 2019. P.203...234
6. *Corduas F., Lamprou D.A.* Long-acting implantable devices for the prevention and personalised treatment of infectious, inflammatory and chronic diseases // *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. – 2020, № 60. 101952.

7. Joshi G., Yadav K.S. Polylactideglycolic acid (PLGA)-based green materials for drug delivery // *Applications of Advanced Green Materials*. – 2021. P.425...440.
8. Ryklin D.B., Azarchenko V.M., Demidova M.A. Determination of expedient conditions of electrospinning using variously designed spinning heads // *Fibre Chemistry*. – № 51, 2019. P.223...226.
9. Ryklin D.B., Yasinskaya N.N., Demidova M.A., Azarchenko V.M. Otsenka vliyaniya dobavki glitserina v pryadil'nyy rastvor na strukturu elektroformovannykh materialov // *Mezhdunar. nauch.-prakt. forum "SMART-TEX"*. – 2020, №1. S. 88...93.
10. Milašius R., Malašauskiene J., Kuchanauskaite E. Possibilities for the estimation of electrospun nanofiber diameter distribution by normal (Gaussian) distribution // *Fibres and textiles in Eastern Europe*. – № 24, 2016. P.23...28.
11. Angamma, C.J. & Jayaram, S.H. A theoretical understanding of the physical mechanisms of electrospinning, *Proceedings of ESA Annual Meeting on Electrostatics*. – 2011. P.1...9.
12. Ellison C.J., Phatak A., Giles D.W., Macosko C.W., Bates F.S. Melt blown nanofibers: fiber diameter distributions and onset of fiber breakup // *Polymer*. – №48, 2007. P.3306...3316.
13. Dosunmu O.O., Chase G.G., Kataphinan W., Reneker D.H. Electrospinning of polymer nanofibres from multiple jets on a porous tubular surface // *Nanotechnology*. – №17, 2006. P.1123...1127.
14. Tan D.H., Zhou C., Ellison C.J., Kumar S., Macosko C.W., Bates F.S. Meltblown fibers: Influence of viscosity and elasticity on diameter distribution // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. – №165, 2010. P.892...900.
15. Hamzeh S., Miraftab M., Yoosefinedaj A. Study of electrospun nanofiber formation process and their electrostatic analysis // *Journal of Industrial Textiles*. – №44, 2013. P.147...158.
16. Kolmogorov A.N. O logarifmicheski normal'nom zakone raspredeleniya razmerov chastits pri droblenii. – *DAN SSSR* 31, 2 (1941), S. 99...101.
17. Filippov A.F. O raspredelenii razmerov chastits pri droblenii // *Teoriya veroyatnosti i ee primenenie*. – 1961, 3 (6). S. 299...318.
18. Samoylova T. A. Razrabotka metodov issledovaniya protsessov raz"edineniya, razrykhleniya i ochistki voloknistogo syr'ya s ispol'zovaniem imitatsionnykh modeley: Dis. ... kand. tekhn. nauk. – M., 2017.
19. Samoylova T.A., Sevost'yanov P.A., Zabrodin D.A., Savel'ev S.G. Statisticheskie aspekty modelirovaniya rykhleniya klochkov khlopka // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. – 2013, № 1. S. 147...150.
20. Korolev V. Yu. O raspredelenii razmerov chastits pri droblenii // *Informatika i ee primenenie*. – 2009, № 3. S. 60...68.

Рекомендована кафедрой технологии текстильных материалов. Поступила 19.08.21.