

Ю. М. Хантимерова, И. А. Загидуллина, В. В. Вихлянский,
М. Ф. Галиханов, С. Н. Якупов, В. К. Болдышева

ПОЛУЧЕНИЕ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ СЕТОК С ПОМОЩЬЮ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ИЗУЧЕНИЕ ИХ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ

Ключевые слова: полипропилен, полимерная сетка, 3D-печать, аддитивные технологии, структура сетки, электретные свойства.

В работе методом аддитивных технологий получены полипропиленовые сетки и изучены их структура и свойства. Сетки были напечатаны на 3D-принтере Creality K1 MAX с диаметром сопла 0,2 мм и с программным обеспечением OrcaSlicer. Оказалось, что при печати сеток из полипропилена малой толщины возникают определенные сложности (затруднен процесс печати, меньше уровень адгезии материала к печатному столу и слабее межслойная адгезия, из-за чего возникают разнообразные дефекты). В результате оптимизации параметров печати было установлено, что скорость печати в диапазоне 30-60 мм/с позволяет достигать высокой скорости производства при сохранении отличной адгезии между слоями и минимизации риска деформаций. Оптимальной стала печать в один полимерный слой с высотой 0,2 мм. Показано, что структурные параметры полученных сеток отличаются от заданных – средняя толщина сеток, определенная с помощью микрометра, составила 0,29 мм, размер ячеек составил 1,2-1,4 мм, а толщина нитей неоднородна и составила 0,22-0,27 мм. О механических свойствах сетчатого материала судили по тангенциальной жесткости, рассчитанной для случая среднего изгиба по классификации Х.М. Муштари и определяли на специальном устройстве экспериментальной установки с использованием подложки из тонкой полипропиленовой пленки толщиной 0,04 мм для обеспечения герметичности в системе нагружения испытываемых образцов. Тангенциальная жесткость полученной полипропиленовой сетки составила 4,18-5,91 кг/см. Представлены фрагменты испытания с начала до разрыва сетки – виды образуемого купола при различных давлениях нагружения. Обнаружено, что напечатанные на 3D-принтере полипропиленовые сетки характеризуются спонтанной поляризуемостью, то есть наличием в нитях поляризационного заряда, длительно сохраняющегося во времени. Значения электретных свойств полипропиленовых сеток на 20-е сутки хранения (в период стабилизации заряда) составили: потенциал поверхности – 0,10 кВ, эффективная поверхностная плотность заряда – 0,056 мкКл/м², напряженность электрического поля – 6,7 кВ/м. Это позволяет использовать их, например, в качестве электретных воздушных фильтров, которые характеризуются высокой степенью очистки.

Yu. M. Khantimerova, I. A. Zagidullina, V. V. Vikhlyansky,
M. F. Galikhanov, S. N. Yakupov, V. K. Boldysheva

PRODUCTION OF POLYPROPYLENE MESHES USING ADDITIVE TECHNOLOGIES AND STUDY OF THEIR STRUCTURE AND PROPERTIES

Keywords: polypropylene, polymer mesh, 3D printing, additive technologies, mesh structure, electret properties.

In this work, polypropylene meshes were obtained by additive technology and their structure and properties were studied. The grids were printed on a Creality K1 MAX 3D printer with a 0.2 mm nozzle diameter and with OrcaSlicer software. It turned out that when printing small-thickness polypropylene meshes, certain difficulties arise (the printing process is more complicated, the level of adhesion to the printing table and interlayer adhesion is lower, resulting in various defects). As a result of optimizing the printing parameters, it was found that the printing speed in the range of 30-60 mm/s allows for high production speeds while maintaining excellent adhesion between the layers and minimizing the risk of deformation. Printing with a polymer layer height of 0.2 mm in one layer has become optimal. It is shown that the structural parameters of the obtained meshes differ from the specified ones – the average thickness of the meshes, determined using a micrometer, was 0.29 mm, the cell size was 1.2-1.4 mm, and the thickness of the filaments was heterogeneous and amounted to 0.22-0.27 mm. The mechanical properties of the mesh material were judged by the tangential stiffness calculated for the case of medium bending according to the classification of H.M. Mushtari and determined on a special device of the experimental installation using a substrate of thin polypropylene film 0.04 mm thick to ensure tightness in the loading system of the test samples. The tangential stiffness of the resulting polypropylene mesh was 4.18-5.91 kg/cm. Fragments of the test from the beginning to the rupture of the grid are presented – types of the dome formed at various loading pressures. It has been found that polypropylene meshes printed on a 3D printer are characterized by spontaneous polarizability, that is, they are characterized by the presence of a polarization charge in the filaments that persists for a long time. The values of the electret properties of polypropylene meshes on the 20th day of storage (during charge stabilization) were as follows: surface potential - 0.10 kV, effective surface charge density – 0.056 $\mu\text{C}/\text{m}^2$, electric field strength – 6.7 kV/m. This allows them to be used, for example, as electret filters, which are known to have a high degree of purification.

Введение

Для отделения жидкостей или газов от твердых частиц (пыли, примесей, включений различного рода), например, в питьевой воде или в промышленных применениях, активно применяют полимерные

нетканые полотна или сетки с мелкими ячейками [1-3]. Кроме этого, полимерные сетки могут служить армирующим компонентом в различных строительных и производственных материалах, в качестве защитных экранов или ограждений. В агрономии и садоводстве такие сетки могут обеспечивать хорошее

дренирование и аэрацию почвы, способствуя лучшему развитию корней растений и предотвращая застой влаги. В медицине такие сетки могут быть использованы для создания матриц для клеточной терапии или в хирургии для поддержки тканей [4, 5]. В работах [6-9] показано, что фильтровальные материалы, обладающие электретьным эффектом намного превосходят традиционные по своим эксплуатационным характеристикам (например, по разделительной способности).

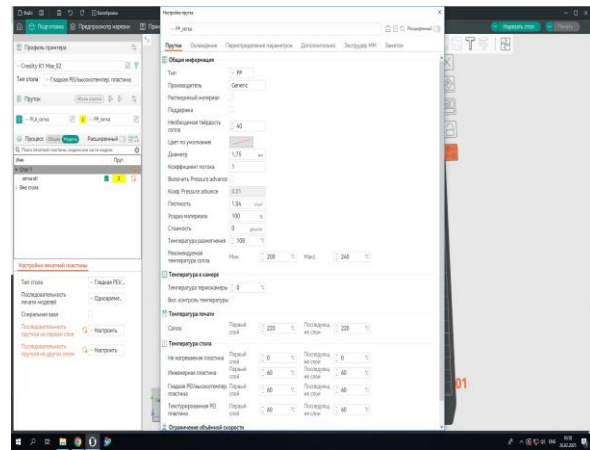
Как правило, полимерные сетки или полимерные нетканые волокна изготавливают методом экструзии [10]. Изготовление полимерных мелкоячеистых сеток с использованием 3D-принтеров (методом аддитивного производства) имеет несколько ключевых преимуществ по сравнению с традиционными методами, такими как экструзия. Во-первых, 3D-печать позволяет создавать сложные и детализированные геометрические формы, которые могут быть трудно реализуемыми традиционными методами. Это означает, что можно создавать индивидуализированные сетки, адаптировать их под конкретные требования, изменяя размеры ячеек, толщину стенок и общую структуру. Во-вторых, с помощью 3D-принтеров можно быстро создавать прототипы полимерных сеток, что позволяет протестировать различные конструкции и параметры перед массовым производством. Также пропадает необходимость в изготовлении дорогостоящих экструзионных головок, так как форма полимерной сетки создается непосредственно в процессе печати. Другими словами, 3D-печать особенно экономична для малых серий и индивидуальных заказов, так как отсутствует необходимость в больших инвестициях в оборудование для массового производства [11-13].

Однако, изготовление полимерных мелкоячеистых сеток на 3D-принтере, хотя и обладает многими преимуществами, также сопряжено с определенными сложностями и вызовами. Например, 3D-принтеры могут быть ограничены в своей способности печатать мелкоячеистые конструкции из-за размеров сопел, из-за неправильных настроек принтера, выбора материала или загрязнения сопел могут возникать проблемы с качеством печати, т.е. образование отслоений, дефектов и неоднородностей, а это может негативно сказаться на прочности и функциональности сетки. Нельзя не отметить, что до сих пор отсутствуют стандартизированные методы изготовления изделий с помощью аддитивных технологий [14].

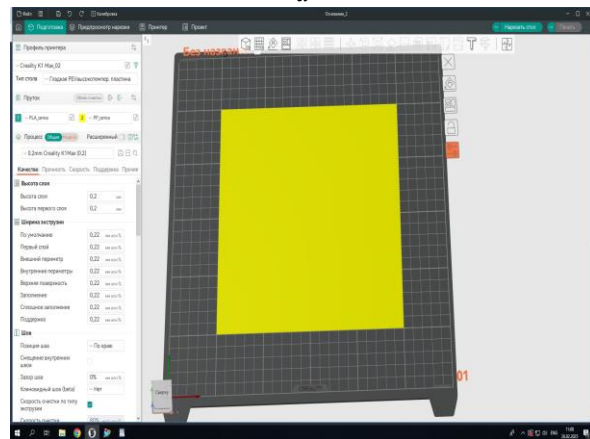
Учитывая вышесказанное, целью настоящей работы было оптимизация процесса получения полимерных сеток на 3D-принтере, изучение их структуры (и соответствия структуры заданным параметрам), а также определение механических и электретьных свойств полученных полимерных сеток.

Экспериментальная часть

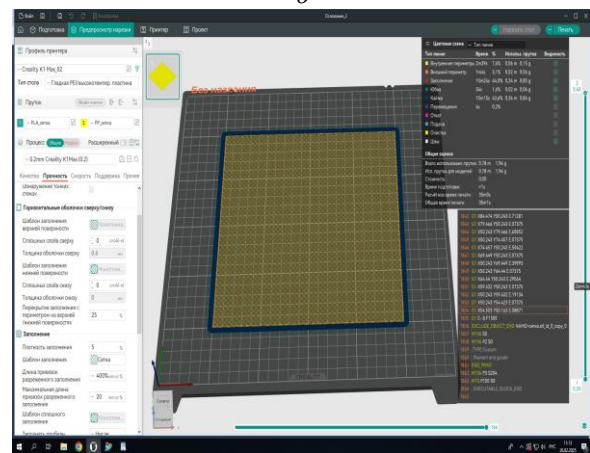
В качестве объектов исследования были использованы филамент из ненаполненного полипропилена (ПП) производства Bestfilament (Китай) с диаметром нити 1,75 мм.



а



б



в

Рис. 1 – Панель настройки параметров полимеров (а), модель с основными настройкам слоя полимерной сетки и скорости печати (б) и настройка заполнения и моделирование процесса печати (в) в программе OrcaSlicer

Fig. 1 – Polymer parameters setting panel (a), model with basic settings of polymer mesh layer and printing speed (b) and filling setting and modeling of printing process (c) in OrcaSlicer program

Для печати сеток размерами 200*200 мм использовали 3D-принтер Creality K1 MAX с диаметром сопла 0,2 мм и с программным обеспечением OrcaSlicer (рис. 1). Температура печати составляла 220°C, обдув был выключен. Печать полимерных сеток осуществлялась в один слой (с отключением

верхних и нижних слоёв). Сетка формировалась выбором соответствующей формы заполнения с настройкой плотности для получения необходимого шага линий сетки, плотность заполнения составляла 5%.

Структуру сеток изучали под лабораторным оптическим микроскопом марки Saike Digital SK2009HDMI-T, с увеличением $4\times$. Толщину сеток определяли с помощью микрометра МК 0-25 мм (ГОСТ 6507-78).

Механические свойства сетчатого материала определяли на специальном устройстве экспериментальной установки (рис. 2) с использованием подложки из тонкой полипропиленовой пленки толщиной 0,04 мм для обеспечения герметичности в системе нагружения испытуемых образцов. Круглые образцы с подложкой зажимались по контуру и нагружались поверхностным давлением P . В процессе нагружения производился мониторинг за формой деформирования образца (измеряли величину прогиба H). Тангенциальная жесткость B_{Σ} рассчитывалась для случая среднего изгиба [15] по классификации Х.М. Муштары [16].

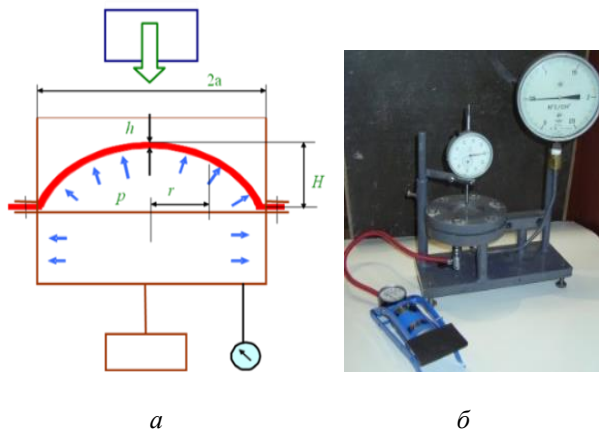


Рис. 2 – Схема испытаний (а) и фотография установки (б) определения механических свойств сетки

Fig. 2 – Test scheme (a) and photograph of the installation (b) for determining the mechanical properties of the mesh

Электретные характеристики сеток изучали с помощью прибора ИПЭП-1 (Беларусь).

Результаты и их обсуждение

Современные 3D-принтеры могут работать с разнообразными полимерными материалами, включая специализированные композиционные смеси, что позволяет выбирать оптимальные свойства для каждой конкретной задачи. Но далеко не все полимеры подходят для 3D-печати, и не все из них имеют необходимые физические и химические свойства для создания мелкоячеистых сеток. Выбор подходящего материала с нужной прочностью, гибкостью и устойчивостью к воздействию внешней среды может быть сложным процессом. В настоящей работе для печати полимерных сеток использовали полипропилен, т.к. данный полимер хорошо подходит для 3D-печати и

именно из него производят практически весь мировой объем нетканых полимерных полотен [1, 10, 17].

При печати сеток из полипропилена малой толщины возникали определенные сложности (сложнее процесс печати, меньше уровень адгезии к печатному столу и межслоевой адгезии, в результате чего полимер может плохо выдавливаться, не прилипать к столу, происходит «задираание» нитей сетки. В ходе получения сеток наблюдалась перебои с материалом при попытке печати слоев толщиной менее 0,1 мм: пропуски, разрывы структуры сетки, «сворачивание» первого слоя при нанесении второго. В результате оптимизации параметров печати было установлено, что скорость печати в диапазоне 30-60 мм/с позволяет достигать высокой скорости производства при сохранении отличной адгезии между слоями и минимизации риска деформаций. Оптимальным стала печать с высотой полимерного слоя 0,2 мм в один слой.

Понятно, что реальные структурные параметры сеток отличаются от заданных с помощью программного обеспечения 3D-принтера. Так, средняя толщина сеток, определенная с помощью микрометра, составила 0,29 мм. Для определения толщины нитей и размеров ячеек полученные сетки были изучены под оптическим микроскопом (рис. 3).



Рис. 3 – Фотография фрагмента сетки из полипропилена

Fig. 3 – Photograph of a polypropylene mesh fragment

Видно (рис. 3), что размер ячеек составил 1,2- 1,4 мм, а диаметр нитей неоднородна и составила 0,22-0,27 мм. Называть данную толщину диаметром, скорее всего, не правильно. Из сопла 3D-принтера нити выходят правильного круглого сечения, но при попадании на печатный стол они деформируются, оседают по силе собственной тяжести, особенно, в местах пересечения нитей.

Для определения механических свойств сеток традиционные методы испытаний (например, одноосного испытания на растяжение) не совсем применимы, т.к. материал анизотропичен и результаты зависят от ориентации вырезаемых полос из исследуемого материала. Приемлемым подходом для исследования прочностных свойств тонкостенных и тонкослойных материалов является экспериментально-теоретический метод, предложенный в работе [18], позволяющий определять интегральные механические свойства тонкостенных и тонкослойных материалов, в том числе, сетчатых материалов в двумерной постановке.

Фрагменты испытания с начала до разрыва сетки – виды образуемого купола при различных давлениях нагружения приведены на рисунке 4.

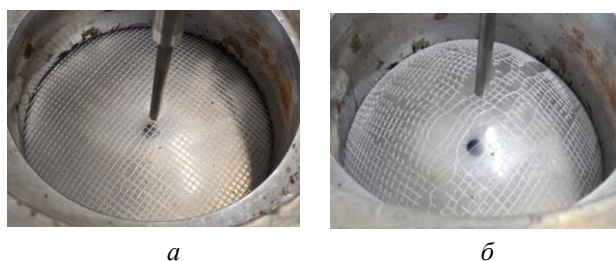


Рис. 4 – Виды образуемого купола в процессе нагружения: а – до испытания, б – после испытания (разрыв сетки)

Fig. 4 – Views of the formed dome in the process of loading: a - before the test, b - after the test (mesh rupture)

Виды образцов после снятия с установки приведены на рисунке 5.



Рис. 5 – Вид образца после испытаний: а – образец с подложкой, б – подложка

Fig. 5 – View of the specimen after testing: a - specimen with substrate, b - substrate

В результате испытаний получена зависимость «давление – прогиб», результаты приведены в таблице 1.

В литературе отмечается, что полимерные нетканые полотна, полученные методом экструзии через распылительную головку и переносимые с помощью потока воздуха на формообразующую подложку, характеризуются спонтанной поляризуемостью. Другими словами, нетканые полотна характеризуются наличием в волокнах поляризационного заряда, длительно сохраняющегося во времени.

Таблица 1 – Зависимость «давление Р - прогиб Н» для испытуемых образцов

Table 1 – Dependence “pressure P - deflection H” for tested specimens

P, кг/см ²	0,07	0,08	0,09	0,10
<i>Полипропиленовая сетка с подложкой</i>				
H, мм	7,08	7,63	8,06	8,70
B _Σ , кг/см	14,65	13,38	12,77	11,28
<i>Подложка</i>				
H, мм	8,41	8,89	9,43	10,15
B _Σ , кг/см	8,74	8,45	7,97	7,10
<i>Полипропиленовая сетка (расчетные значения)</i>				
B _Σ , кг/см	5,91	4,93	4,80	4,18

Для оценки возможности спонтанной поляризуемости полимерных сеток, полученных с помощью аддитивных технологий, у них были определены потенциал поверхности V_3 , эффективная поверхностная плотность заряда $\sigma_{эф}$ и напряженность электрического поля E , которые характеризуют электретные свойства материалов (табл. 2).

Таблица 2 – Электретные свойства сеток из полипропилена, полученных методом 3D-печати

Table 2 – Electret properties of 3D-printed polypropylene meshes

Характеристика	Значение	
	через час после печати	на 20-е сутки хранения
V_3 , кВ	0,33	0,10
$\sigma_{эф}$, мкКл/м ²	0,181	0,056
E , кВ/м	21,0	6,7

Видно, что полученные с помощью аддитивных технологий полипропиленовые сетки действительно находятся в электретном состоянии. Это позволяет использовать их, например, в качестве электретных фильтров, которые, как известно, характеризуются высокой степенью очистки [1].

Выводы

Таким образом, в работе оптимизированы параметры 3D-печати полипропиленовой сетки с размером ячеек 1,2-1,4 мм и толщиной нитей 0,22-0,27 мм (при заданной толщине 0,2 мм). Показано, что тангенциальная жесткость полученной полипропиленовой сетки составляет 4,18-5,91 кг/см.

Полипропиленовые сетки, напечатанные на 3D-принтере, обладают достаточно стабильной спонтанной поляризацией. Уровень электретных свойств позволяет использовать их в качестве элементов воздушных фильтров.

Литература

1. Кравцов А. Г., Марченко С. А., Зотов С. В., Станкевич В. М., Наумов А. Д. Полимерные волокнисто-пористые фильтрующие материалы. Гомель: БелГУТ, 2012. 319 с.
2. Leng J., Lan X. Shape-memory polymers and their composites: stimulus methods and applications // Progress in Materials Science. 2011. Vol. 56. No. 7. P. 1077-1135.
3. Девисилов В.А., Новиков Ю.М., Большаков В.А. Комбинированные пористые сетчатые металлы и изделия из них. // Безопасность в техносфере. 2020, т. 9, № 2, С. 43–48.
4. Neznakomova M., S. Boteva S., Tzankov L., Elhag M. Non-woven Textile Materials from WasteFibers for Cleanup of Waters Polluted with Petroleum and Oil Products//Earth Systems and Environment. 2018; Vol. 2, № 3, P. 413-420.
5. Grashchenkov D.V., Chursova L.V. Strategy for the development of composite and functional materials // Aviats. Mater. Tekhnol., 2012, No. P. 231-242.
6. Shaikhiev I.G., Dryakhlov V.O., Galikhanov M.F., Fazullin D.D., Mavrin G.V. Separation of oil emulsion using polyac-

- rylonitrile membranes, modified by corona discharge // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2020. Vol. 11. № 5. P. 1160-1164.
7. Шумская В. Ю., Гракович П. Н., Зотов С. В., Шаповалов В. М., Григорьев А. Я. Тенденции и перспективы использования полимерных волокнисто-пористых фильтров в составе средств индивидуальной защиты органов дыхания для предупреждения вирусной инфекции COVID-19. // *Полимерные материалы и технологии*. 2022. Т. 8, № 3. С. 6–23.
 8. Гильфанова С.В., Галиханов М.Ф., Галеева Л.Р. Изменение геометрических и сорбционных свойств бумажных обеззоленных фильтров при их обработке в поле коронного разряда // *Вестник технологического университета*. 2022. Т. 25. № 9. С. 101-104.
 9. Galikhanov M.F. Unipolar Corona Discharge Effect on Filtering Capacity of Polypropylene Non-Woven Fabrics // *Fibre Chemistry*. 2017. Vol. 48. № 6. P. 473-477.
 10. Трещалин М.Ю., Киселев М.В., Мухамеджанов Г.К., Трещалина А.В., Трещалин Ю.М. Проектирование, производство и методы оценки качества нетканых материалов. Издание 3-е, перераб. и доп. - М.: Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, 2017. - 292 с.
 11. Беседина К.С., Лавров Н.А., Барсков В.В. Применение аддитивных технологий при получении изделий из полимерных материалов (обзор) // *Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета)*, 2018, № 44 (70), С. 56-63.
 12. Лысыч М.Н., Шабанов М.Л., Качурин А.А. Обзор современных технологий 3D-печати // *Modern Hight Technologies*, 2015, № 6, С. 24-30.
 13. Коваленко Р.В. Современные полимерные материалы и технологии 3D печати // *Вестник Казанского технологического университета*, Т. 18, №1, 2015, С. 263-266.
 14. Ивашкова К.П., Филиппов А.Н., Копасов Е.А. Анализ и систематизация дефектов 3D-печати // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 2017, Т. 60, № 5, С. 426-430.
 15. Yakupov S.N. Influence of Scratches on the Stiffness Properties of Thin-walled Elements // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2019. Vol.40. No.6. P. 834–839.
 16. Муштари Х.М., Галимов К.З. Нелинейная теория упругих оболочек. Казань: Таткнигоиздат, 1957. 431 с.
 17. Пророкова Н.П. Настоящее и будущее производства и модифицирования синтетических волокон и нитей в России // *Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы: сб. материалов XXIII Междунар. науч.-практ. форума «SMARTEX-2020»*. Иваново: ИВГПУ, 2020. С. 211-216.
 18. Yakupov N.M., Galimov N.K., Yakupov S.N. Methodology of studying non-planar films and membranes of complex structure // *Zavod. Lab. Diagn. Mater*. 2019. № 2. P.55-59.
 19. Пинчук Л. С., Кравцов А. Г., Громыко Ю. В. Электретный эффект при диспергировании расплава полиэтилена // *Высокомол. Соед. Серия Б*. 1997. Т. 39. С. 30-35.
 - Waters Polluted with Petroleum and Oil Products//*Earth Systems and Environment*. 2018; Vol. 2, № 3, P. 413-420.
 5. Grashchenkov D.V., Chursova L.V. Strategy for the development of composite and functional materials // *Aviats. Mater. Tekhnol.*, 2012, No. P. 231-242.
 6. Shaikhiev I.G., Dryakhlov V.O., Galikhanov M.F., Fazullin D.D., Mavrin G.V. Separation of oil emulsion using polyacrylonitrile membranes modified by corona discharge // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2020. Vol. 11. № 5. P. 1160-1164.
 7. Shumskaya V. Y., Grakovich P. N., Zotov S. V. V., Shapovalov V. M., Grigoriev A. Я. Trends and prospects of using polymeric fiber-porous filters as part of personal respiratory protection equipment to prevent viral infection COVID-19. // *Polymeric materials and technologies*. 2022. Т. 8, № 3. P. 6-23.
 8. Gilfanova S.V., Galikhanov M.F., Galeeva L.R. Change of geometric and sorption properties of paper de-isolated filters during their treatment in the field of corona discharge // *Herald of Technological University*. 2022. V. 25. № 9. P. 101-104.
 9. Galikhanov M.F. Unipolar Corona Discharge Effect on Filtering Capacity of Polypropylene Non-Woven Fabrics // *Fibre Chemistry*. 2017. Vol. 48. № 6. P. 473-477.
 10. Treschalina A.V., Treschalin Y.M., Mukhamedjanov G.K., Treschalina A.V., Treschalin Y.M. Design, production and methods of quality assessment of nonwoven materials. Edition 3rd, revision and supplement - Moscow: Lomonosov Moscow State University, 2017. - 292 p.
 11. Besedina K.S., Lavrov N.A., Barskov V.V.. Application of additive technologies in obtaining products from polymeric materials (review) // *Proceedings of St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)*, 2018, № 44 (70), P. 56-63.
 12. Lysich M.N., Shabanov M.L., Kachurin A.A. Review of modern 3D-printing technologies // *Modern Hight Technologies*, 2015, No. 6, P. 24-30.
 13. Kovalenko R.V. Modern polymer materials and 3D printing technologies // *Herald of Technological University*, Vol. 18, No. 1, 2015, P. 263-266.
 14. Ivashkova, K.P.; Filippov, A.N.; Kopasov, E.A. Analysis and systematization of 3D printing defects // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Instrumentation*, 2017, Vol. 60, No. 5, P. 426-430.
 15. Yakupov S.N. Influence of Scratches on the Stiffness Properties of Thin-walled Elements // *Lobachevskii Journal of Mathematics*. 2019. Vol.40. No.6. P. 834-839.
 16. Mushtari, H.M.; Galimov, K.Z. Nonlinear theory of elastic shells. Kazan: Tatknigoizdat, 1957. 431 p.
 17. Prorokova N.P. Present and future of production and modification of synthetic fibers and yarns in Russia // *Physics of fibrous materials: structure, properties, knowledge-intensive technologies and materials: proceedings of the XXIII International Scientific and Practical Forum “SMARTEX-2020”*. Ivanovo: IVSPU, 2020. P. 211-216.
 18. Yakupov N.M., Galimov N.K., Yakupov S.N. Methodology of studying non-planar films and membranes of complex structure // *Zavod. Lab. Diagn. Mater*. 2019. № 2. P.55-59.
 19. Pinchuk L. S., Kravtsov A. G., Gromyko Yu. V. Electret effect during polyethylene melt dispersion // *Vysokomol. Soedineniya, Series B*. 1997. V. 39. P. 30-35.

References

1. Kravtsov A. G., Marchenko S. A., Zotov S. V., Stankevich V. V., Stankevich V. M. M., Naumov A. D. Polymeric fiber-porous filtering materials. Gomel: BelGUT, 2012. 319 p.
2. Leng J., Lan X. Shape-memory polymers and their composites: stimulus methods and applications // *Progress in Materials Science*. 2011. Vol. 56. No. 7. P. 1077-1135.
3. Devisilov V.A., Novikov Yu.M., Bolshakov V.A. Combined porous mesh metals and products from them. // *Safety in Technosphere*. 2020, Vol. 9, No. 2, P. 43-48.
4. Neznakomova M., Boteva S., Tzankov L., Elhag M. Non-woven Textile Materials from WasteFibers for Cleanup of

Благодарности

Работа выполнена за счет гранта Академии наук Республики Татарстан, предоставленного молодым кандидатам наук (постдокторантам) с целью защиты докторской диссертации, выполнения научно-

исследовательских работ, а также выполнения трудовых функций в научных и образовательных организациях Республики Татарстан в рамках Государственной программы Республики Татарстан

«Научно-технологическое развитие Республики Татарстан» (Соглашение No114/2024-ПД).

© **Ю. М. Хантимерова** – научный сотрудник Института прикладных исследований Академии наук Республики Татарстан (ИПИ АН РТ); начальник отдела аддитивных технологий ООО «Казанский агрегатный завод», Казань, Россия; **В. В. Вихлянский** – инженер-разработчик ООО «Казанский агрегатный завод»; **И. А. Загидуллина** – канд. техн. наук, доцент кафедры Технологии переработки полимеров и композиционных материалов (ТППКМ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), zagidullina_inna@mail.ru; **М. Ф. Галиханов** – д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник ИПИ АН РТ; профессор кафедры ТППКМ, КНИТУ, mgalikhanov@yandex.ru; **С. Н. Якупов** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник ИММ, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»; **В. К. Болдышева** – научный сотрудник ИПИ АН РТ.

© **Yu. M. Khantimerova** - Researcher at the Institute of Applied Research of the Tatarstan Academy of Sciences (IAR TAS); Head of the Additive Technologies Department at Kazan Aggregate Plant LLC, Kazan, Russia; **V. V. Vikhlyansky** – Development Engineer at Kazan Aggregate Plant LLC; **I. A. Zagidullina** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor at the Department of Polymer Processing Technology and Composite Materials (PPTCM), Kazan National Research Technological University (KNRTU), zagidullina_inna@mail.ru; **M. F. Galikhanov** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Leading Researcher at the IAR TAS; Professor at the PPTCM department, KNRTU, mgalikhanov@yandex.ru; **S. N. Yakupov** – PhD (Technical Sci.), Senior Researcher at the Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences; **V. K. Boldysheva** – Researcher at the IAR TAS.

Дата поступления рукописи в редакцию – 13.03.25.

Дата принятия рукописи в печать – 18.03.25.