EDN: YKSEWO DOI: https://doi.org/10.65912/2782-5507.2026.23.4.002
УДК 621.396.6:621.372.852 *2.2.8*

ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМЫЕ ФИЛЬТРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ И ПОЛИЛАКТИДНЫХ СЕТОК

М.Ф. Галиханов [1,2], В.К. Болдышева [2], И.Ф. Тимербаев [2]

[1]Российская инженерная академия
Российская Федерация, 125009, г. Москва, Газетный пер., д. 9, стр. 4

[2]Институт прикладных исследований Академии наук Республики Татарстан
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Лево-Булачная, д. 36а

Аннотация. Исследован механизм повышения эффективности фильтрации модельных сетчатых структур на основе полимерной пары «полипропилен – полилактид» за счет их контактной взаимной трибополяризации. Модельные сетки изготовлены методом послойного наплавления (FDM-печать) из полипропилена и полилактида с различными красителями. Установлено, что вследствие существенной разницы положения полимеров в трибоэлектрическом ряду при взаимном трении полипропилен заряжается положительно, а полилактид – отрицательно. Оценка фильтрационной способности с использованием порошка тонера показала, что трибополяризация повышает массу улавливаемых микрочастиц в 1,4–2,1 раза по сравнению с неполяризованными сетками за счет появления у сеток электростатического поля. Введение красителей в полилактид интенсифицирует накопление электростатического заряда и увеличивает эффективность фильтрации. Полученные результаты обосновывают перспективность создания гибридных волокнистых фильтроматериалов с эффектом самоподдерживающегося электретного заряда при эксплуатационных деформациях.

Ключевые слова: фильтрация, аддитивные технологии, полимерные композиты, полипропилен, полилактид, фильтрационные сетки, трибополяризация, электретные свойства, поверхностный потенциал.

Введение

Применение фильтроматериалов и мембран во множествах промышленных процессах и в быту обуславливает неустанный рост их количества и многообразия. В качестве фильтрующих материалов газовых (в т.ч. воздушных) и жидких сред выступают хаотически распределенные нити и волокна, нетканые полотна, сетки, целлюлозные и синтетические фильтровальные бумаги, иглопробивные полотна, пористые пленки и т.п. [1, 2]. Повышающиеся требования к чистоте производственных процессов, к сохранению чистоты воздуха и воды, к снижению вреда от выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду и к поддержанию здоровья человека приводят к поиску новых фильтроматериалов и методов повышения эффективности имеющихся.

Одним из известных, но в последнее время еще более перспективных направлений в данных научных и практических изысканиях является создание и использование электретных полимерных фильтров, в которых волокна обладают квазипостоянным электрическим полем, значительно повышающим способность фильтроматериала улавливать пыль, различные инородные включения и даже биозагрязнения [3-5].

Одним из самых популярных материалов, на основе которых изготавливают фильтры, является полипропилен (ПП), на основе которого делают сетки, нетканые материалы (спанбонд, мелтблаун, электроспиннинг) и т.д. [6, 7]. Этот полимер также отличается хорошей электретируемостью [8, 9]. Современные тенденции производства нетканых полимер-

ных полотен заключаются в замене полипропилена на полилактид (ПЛА), который способен обеспечить сопоставимую фильтрационную эффективность материала и к тому же обладает биоразлагаемостью [10, 11]. Данный полимер также обладает способностью к электретированию, хотя и уступает полипропилену [12, 13]. Однако можно констатировать, что пути повышения электретных свойств полилактида уже найдены, самым простым из которых является включение в состав полимера мелкодисперсных наполнителей, например, неорганических пигментов [14-16].

В работах [17, 18] показано, что комбинация синтетических полипропиленовых волокон с биоразлагаемыми полилактидными волокнами в одном фильтре открывает новые перспективы в создании не только высокоэффективных, но и энергонезависимых и более экологически безопасных фильтров.

Цель настоящей работы – исследование механизма повышения эффективности фильтрации полипропиленовых и полилактидных фильтроматериалов при их сочетании.

Материалы и методы

Для изготовления пластинок из полилактида с помощью послойного наплавления (FDM-печать) использовали филамент полипропилена (ПП) фирмы Bestfilament (Китай), филаменты ПЛА марок «Молочный» (ПЛА-м) и «Желтый» (ПЛА-ж) фирмы RSCrossbridge (Россия), черный филамент ПЛА марки «Дикая пантера» (ПЛА-ч) фирмы FDplast (Россия).

Сетки размерами 200×200 мм и толщиной 28 мкм печатались на 3D-принтере Bambulab H2D (Китай) с соплом диаметром 0,4 мм. 3D-модели к печати строились в программном обеспечении BambuStudio 2.7.1.62 (рис. 1).

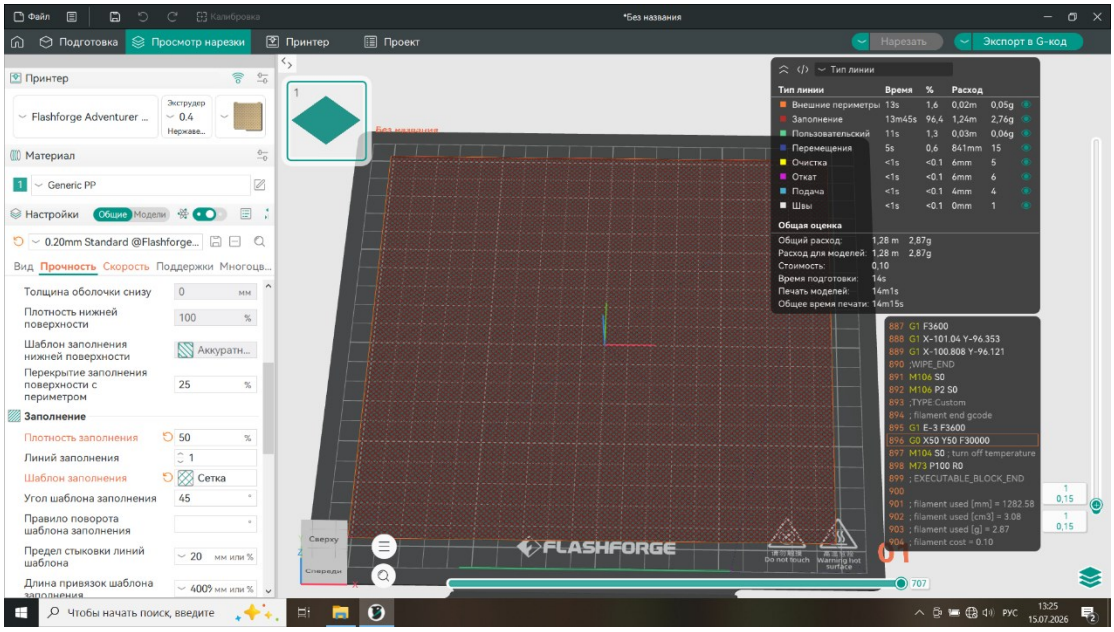


Рис. 1. Панель построения 3D-модели и настройка параметров печати полимерной сетки в программе BambuStudio

Сетки переводили в электретное состояние путем трибоэлектризации, для чего их подвергали трению друг об друга в течение 15 секунд. Электретные характеристики (потенциал поверхности ($V_э$), эффективную поверхностную плотность заряда ($\sigma_{эф}$) и напряженность электрического поля (E)) после трибоэлектризации определяли методом экранирования приемного электрода на измерителе параметров электростатического поля ИПЭП-1 (Беларусь).

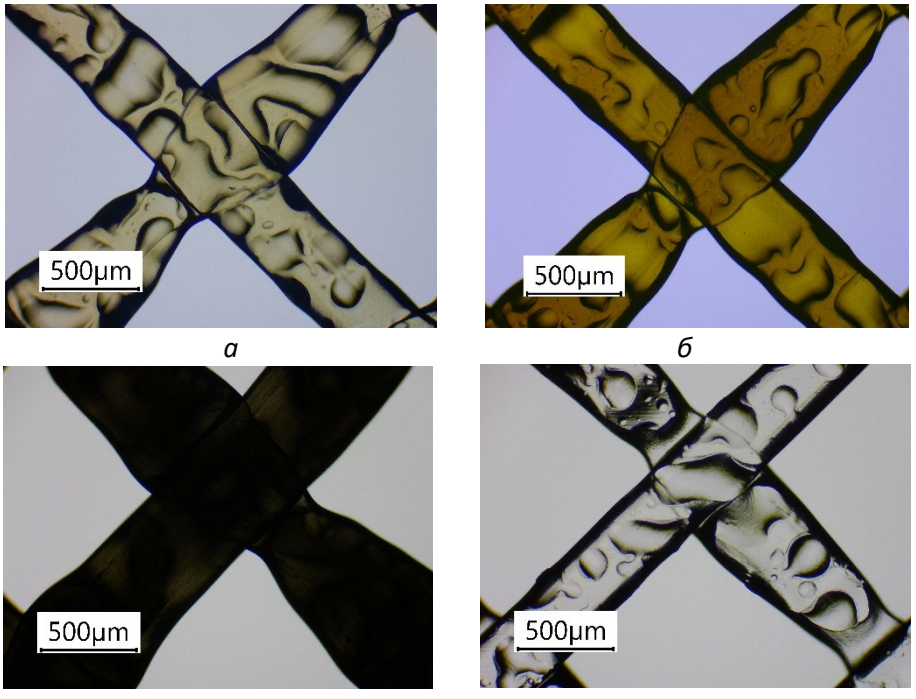
Эффективность фильтрации сеток оценивали с помощью порошка черного тонера марки HP1010/1200 (Китай), состоящего из стиролакрилового полимера, оксида железа и неорганических добавок, который просеивали через сетки. Количественную оценку порошка, оказавшегося на сетке, осуществляли путем взвешивания образца определенной площади с порошком на аналитических весах с точностью 0,001 г с последующим вычетом веса сетки.

Форму частиц порошков, как и структуру полимерных сеток до и после осуществления процесса фильтрации, изучали под лабораторным оптическим цифровым микроскопом Saike Digital SK2009HDMI-T (Китай). Определение характеристик пористой структуры частиц порошков проводилось на анализаторе удельной поверхности и размеров пор «TOP 200» (Altamira Instruments, LLC, США) статическим волюметрическим методом низкотемпературной адсорбции азота. Перед испытаниями материал дегазировался при температуре 30° С в течении 8 часов в условиях вакуума. Адсорбционные исследования дегазированного материала проводились при температуре 77,35 К с использованием в качестве адсорбата азота особой чистоты (объемная доля азота не менее 99,999%).

Результаты исследования

На первом этапе работы были изучены объекты исследования – полипропиленовые и полилактидные сетки и ксерографические порошки.

При печати полимерных сеток оказалось, что параметры их структуры не полностью соответствовали заданным. Волокна, приобретающие в процессе 3D-печати эллипсовидную форму, имели малый диаметр 0,22-0,25 мм и большой диаметр – 0,35-0,50 при заданных 0,2 и 0,3 соответственно (рис. 2). Это происходит из-за того, что хотя из сопла 3D-принтера волокна выходят правильного круглого сечения, при попадании на печатный стол они деформируются, «размазываются соплом принтера и оседают под силой собственной тяжести, особенно, в местах пересечения волокон.

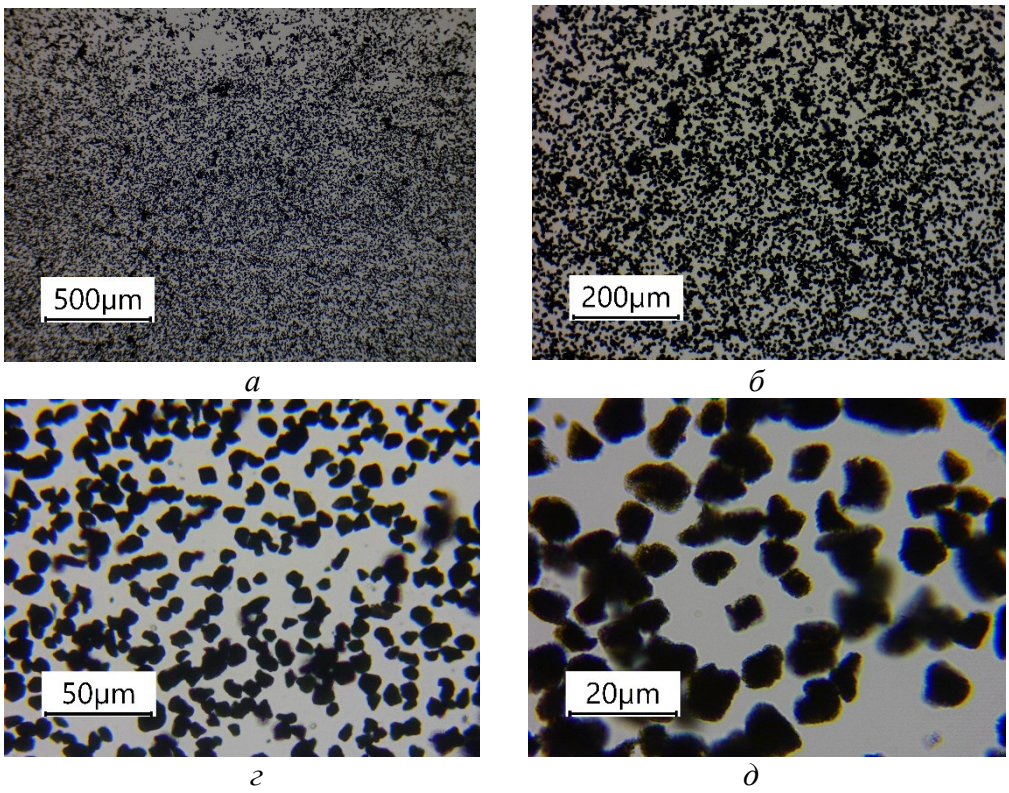


а *б* *в* *г*

Рис. 2. Фотография сеток из полилактида «Молочный» (*а*), полилактида «Желтый» (*б*), полилактида «Дикая пантера» (*б*) и полипропилена (*г*)

Размер ячеек сеток составил 1,0-1,2 мм.

Черный тонер состоит из частиц черного цвета с размером 5-10 мкм (рис. 3). Их можно описать как частицы неправильной формы с развитой системой пор на поверхности.



а *б* *г* *д*

Рис. 3. Фотографии порошка черного тонера марки HP1010/1200 с увеличением 4× (*а*), 10× (*б*), 40× (*в*) и 100× (*г*)

Оценка удельной площади поверхности частиц наполнителя ($S_{адс}$), определенной по БЭТ, объема (V_n) и размера пор (d_n), определенных по методу BJH, подтвердили данное наблюдение. Значения $S_{уд}$ = 7,42 м^2/г, V_n = 0,03 см^3/г и d_n = 16,88 нм говорят о большом количестве пор малых размеров и других несовершенств структуры.

На основе анализа формы кривой изотермы адсорбции порошка чёрного тонера можно заключить, что она относится к типу III, что свидетельствует об отсутствии чётко выраженного формирования монослоя. Это указывает на относительно слабое взаимодействие между адсорбентом и адсорбатом, при котором адсорбированные молекулы преимущественно локализуются вблизи наиболее энергетически выгодных центров на поверхности непористого или макропористого твёрдого тела. Наблюдаемая выраженная петля гистерезиса типа H3 характеризуется резким падением десорбционной ветви, что типично для систем, в которых поровая сеть состоит преимущественно из макропор. Такие петли гистерезиса формируются в случаях, когда макропоры не полностью заполняются поровым конденсатом в ходе адсорбции, что приводит к специфическому поведению при десорбции. Полученные данные согласуются с представлением о том, что исследуемый порошок тонера обладает преимущественно непористой или макропористой морфологией поверхности, где доминируют слабые ван-дер-ваальсовские взаимодействия с адсорбатом. Наличие петли гистерезиса типа H3 дополнительно подтверждает присутствие щелевидных или неупорядоченных макропор, характерных для агрегированных или гранулированных порошковых систем.

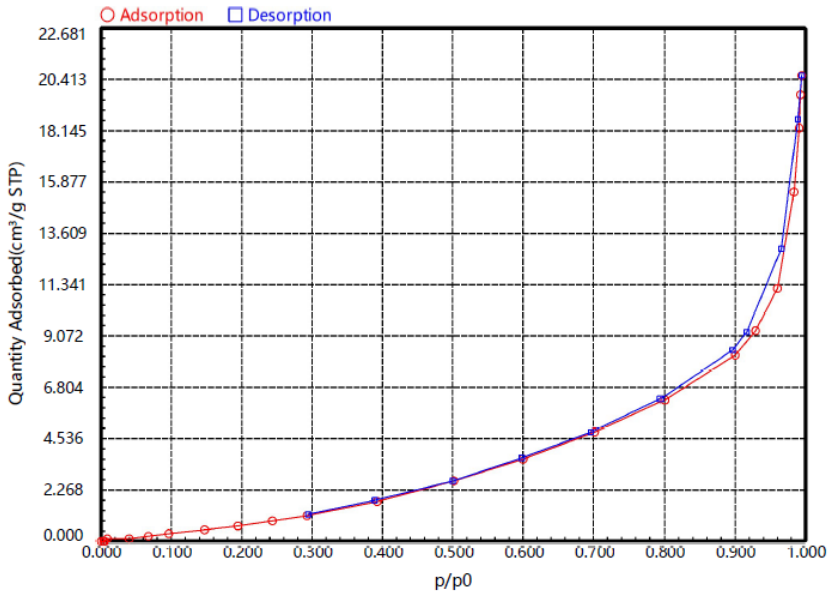


Рис. 4. Кривая изотерм адсорбции для черного тонера марки HP1010/1200

Полипропилен и полилактид находятся на разных концах трибологического ряда. При трении таких материалов происходит интенсивный перенос электронов от материала с положительного конца ряда (донора электронов) к материалу с отрицательного конца (акцептору электронов), в результате чего первый приобретает выраженный положительный заряд, а второй – отрицательный. Чем больше расстояние между материалами в трибоэлектрическом ряду, тем сильнее трибоэлектрический эффект и тем выше величина генерируемого электростатического заряда. Трение усиливает контакт между поверхностями, способствуя образованию химических связей в зонах соприкосновения и облегчая квантово-механическое туннелирование электронов через межфазный барьер. Электроны, занимающие наивысшие энергетические уровни на поверхности донора, туннелируют в низшие незанятые уровни акцептора до достижения локального равновесия. При этом на границе контакта материалов формируется потенциальный барьер, препятствующий обратному перетоку заряда и обеспечивающий длительное сохранение электростатического заряда. На этом принципе основан и механизм трибополяризации (трибоэлектретирования) диэлектриков. ПЛА, расположенный на положительном конце трибологического ряда, при трении с ПП (материалам отрицательного конца трибологического ряда) заряжается положительно, тогда как полипропилен – отрицательно (табл. 1).

Табл. 1. Электретные свойства сеток из полипропилена и полилактида, после трения друг об друга в течение 15 секунд

Фильтрующий материал, состоящий из двух сеток	Электретные свойства сеток после трения			
	Материал сетки	$V_э$, кВ	$\sigma_{эф}$, мкКл/м^2	E, кВ/м
ПП + ПЛА-м	ПП	+0,040	+3,5	+0,031
	ПЛА-м	–0,011	–0,3	–0,003
ПП + ПЛА-ж	ПП	+0,044	+3,6	+0,033
	ПЛА-ж	–0,017	–0,5	–0,005
ПП + ПЛА-ч	ПП	+0,060	+4,5	+0,039
	ПЛА-ч	–0,042	–1,5	–0,014

В работе [15] показано, что цветные ПЛА обладают лучшими электретными свойствами по сравнению с ненаполненным полимером. Интересно было оценить и влияние

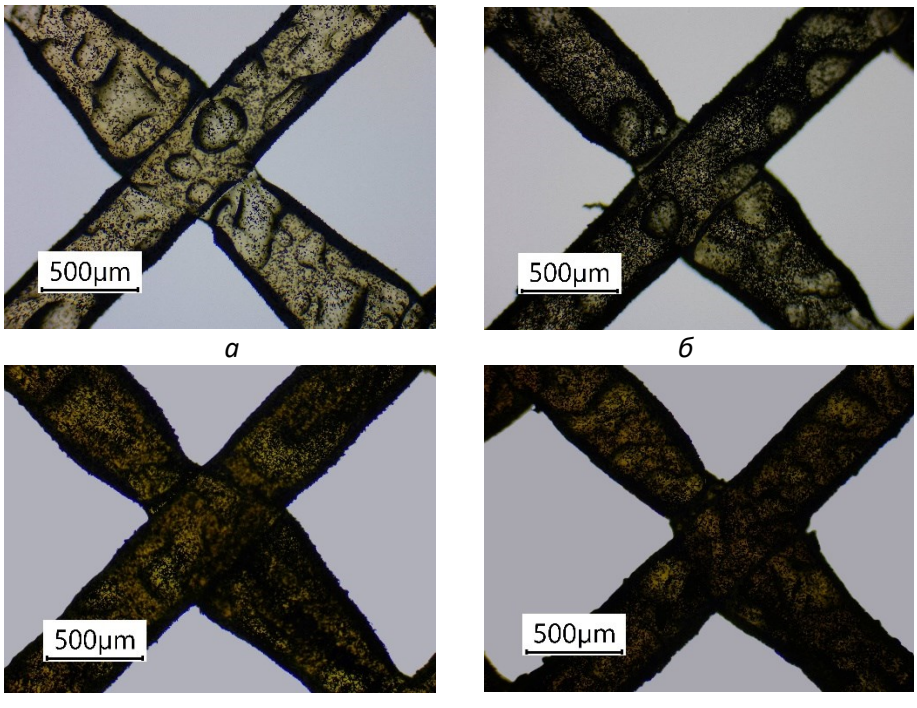
наличия цветного красителя на электретные свойства и на уровень фильтрационной эффективности сеток на основе полимеров.

Для оценки эффективности фильтрации сеток ксерографический порошок просеивался через исходные двухслойный сетки, состоящие из однородных и разнородных материалов, и такие же двухслойные сетки, но после трибополяризации. Оказалось, что количество порошка, оставшегося на двухслойных сетках после просеивания, зависит от вида полимерной композиции и от состояния сеток – исходного или трибополяризованного (табл. 2).

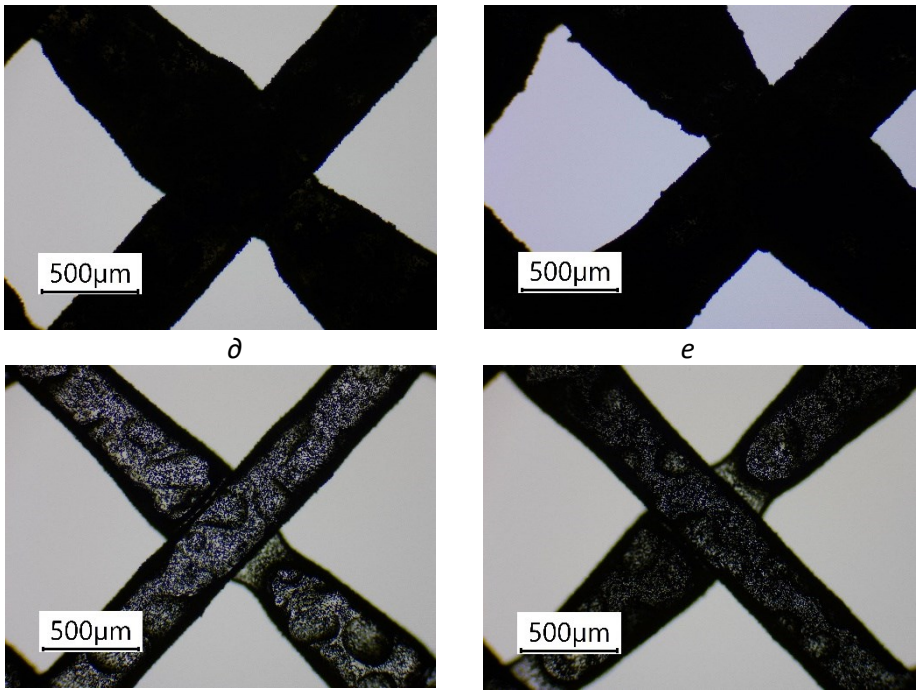
Табл. 2. Масса частиц порошка тонера, оставшихся на двухслойных сетках из полипропилена и полилактида после просеивания

Фильтрующий материал, состоящий из двух сеток		Масса порошка, г/м^2	Изменение массы порошка при трибополяризации сеток, %
ПП + ПЛА-м	до трибополяризации	3,6	–
ПП + ПЛА-ж		4,0	–
ПП + ПЛА-ч		4,2	–
ПП + ПЛА-м	после трибополяризации	5,0	+38,9
ПП + ПЛА-ж		6,0	+50,0
ПП + ПЛА-ч		9,0	+114,3

Видно, что после трибополяризации ПП и ПЛА сеток из ПП и ПЛА масса порошка тонера, оставшегося на двухслойных сетках, увеличивается. Наглядно это видно на фотографиях сеток после просеивания порошка (рис. 5).



а *б* *в* *г*



д *е*

ж *з*

Рис. 5. Фотография сеток из полилактида «Молочный» (*а, б*), полилактида «Желтый» (*в, г*), полилактида «Дикая пантера» (*д, е*) и полипропилена (*ж, з*) после просеивания порошка тонера. Сетки без трибополяризации (*а, в, д, ж*) и после трибополяризации (*б, г, е, з*)

Может показаться, что на двухслойных сетках остается очень малое количество порошка. Однако не стоит забывать, что в данном случае сетки являются лишь модельными фильтрующими системами. Низкая эффективность механического улавливания порошка исходными сетками обусловлена существенным размерным несоответствием: дисперсность частиц тонера на два порядка (в 100-150 раз) меньше характерного размера ячеек сеток.

Возникновение у сеток электрического поля вследствие трибоэлектризации закономерно интенсифицирует процесс удерживания частиц тонера. Рост фильтрующей способности сеток при этом весьма заметен: масса задерживаемого сетками порошка возрастает в 1,4-2,1 раза (табл. 2). Механизм фильтрации электретными фильтроматериалами базируется на синергетическом действии механических и электростатических сил.

Следует отметить, что применение традиционных методов электретирования (в частности, униполярного коронного разряда) позволяет достичь значительно более высоких поверхностных потенциалов и, как следствие, максимальной эффективности фильтрации. Вместе с тем разработка гибридных волокнистых систем на основе полипропиленовых и полилактидных волокон обеспечивает энергонезависимость фильтра, т.к. ведет к появлению эффекта спонтанной поляризации (возникновения объемного заряда): деформация материала в процессе эксплуатации инициирует непрерывную контактную трибополяризацию волокон, способствуя возникновению и постоянному поддержанию электретного состояния фильтра.

Дополнительным преимуществом подобных двухкомпонентных фильтрующих систем может быть расширение сферы их использования. Наличие полимерных компонентов различной химической природы и полярности позволяет сохранить электростатическую активность фильтра как в неполярных, так и в слабополярных средах. Масштабирование технологии получения таких гетерогенных нетканых полотен представляется перспективным на основе процессов совместной соэкструзии полипропилена и полилактида (например, по технологиям meltblown или spundbond).

Заключение

Таким образом, в работе экспериментально подтверждена способность сеток полимерной пары «полипропилен – полилактид» к взаимной трибополяризации за счет существенного различия их положения в трибоэлектрическом ряду. Это применимо для создания энергонезависимых фильтров (с эффектом самовозникающего и самоподдерживающегося заряда). В результате контактного трения полипропилен приобретает положительный поверхностный потенциал, а полилактид выступает акцептором электронов с отрицательным потенциалом. Введение добавок (красителей) в полилактид существенно интенсифицирует процесс накопления электростатического заряда и, следовательно, фильтрующую способность сеток на его основе. Трибополяризация сеток повышает массу удерживаемого порошка тонера, моделирующего загрязнения, в 1,4–2,1 раза (на 38,9–114,3% в зависимости от типа красителя) за счет электростатического взаимодействия с дисперсными частицами.

Список литературы

1. Sutherland K. Filters and Filtration Handbook Fifth Edition. – Burlington: Butterworth-Heinemann, 2008. – 507 p.
2. Sun F. The Performance Testing and Analysis of Common New Filter Materials: A Case of Four Filter Materials / F. Sun, X. Zhang, T. Xue et al. // Materials. – 2024. – Vol. 17. – 2802. DOI: https://doi.org/10.3390/ma17122802
3. Li K. Research of electret air filter: A review / K. Li, G. Feng, T. Chen, H. Zhao // Polymers for Advanced Technologies. – 2024. – Vol. 35, Issue 6.– e6454, DOI: https://doi.org/10.1002/pat.6454
4. Zhang, H. Design of electret polypropylene melt blown air filtration material containing nucleating agent for effective PM2.5 capture / H. Zhang, J. Liu, X. Zhang, C. Huang, X. Jin // RSC Adv. – 2018. – 8. – 7932. DOI: https://doi.org/10.1039/c7ra10916d
5. Cai R., Zhang L.-Zh. Progress and perspective of polymer electret-based PM2.5 filtration: Efficiencies, regeneration, and energy implications / R. Cai, L.-Zh. Zhang // Energy. – 2023.– 283(1): 128504. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128504
6. Abdurasul M. Polypropylene Fibers: Properties, Production, and Applications / M. Abdurasul, J. Asalkhon // Miasto Przyszłości. – 2025. – Vol. 58. – P. 417-419. DOI: https://miastoprzyszlosci.com.pl/index.php/mp/article/view/6217
7. Wang Z. Study on charge characteristic of melt-blown polypropylene electret fabric by hydrocharging technique / Z. Wang, G. Chen, X. Hong et al.// Journal of Electrostatics. – 2022.– V. 116. – 103683, DOI: https://doi.org/10.1016/j.elstat.2022.103683
8. Kurbanov M.A. On the Electret Effect in Polymer–Ferroelectric Piezoceramic Composites with Various Values of the Electronegativity of the Polymer Matrix and Piezophase Cations. / M.A. Kurbanov, I.S. Ramazanova, Z.A. Dadashev et al. // Semiconductors. – 2018. – Vol. 52, No. 1. – P. 64-70, DOI: https://doi.org/10.1134/S1063782618010128
9. Chen Z. Study on the correlation between surface structure and electret property for polypropylene film / Z. Chen, G. Chen, C. Rao // Gongneng Cailiao/Journal of Functional Materials. 2017. – V. 8, N 8. – P. 08014-08017. DOI: https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9731.2017.08.003
10. Zhu Q. Electrostatic Properties of Nonwoven Masks Made of Polylactic Acid / Q. Zhu, S. Kiuchi, M. Pennington et al.// ACS Omega. – 2025. – 10(27). – 29522-29529. DOI: https://doi.org/10.1021/acsomega.5c02906
11. Zhao B. Polylactic acid-based composite filter with multi-gradient structure developed for high efficiency particulate matter filtration and NH3 purification / B. Zhao, M. Han, Q. Wang et al.// Separation and Purification Technology. – 2025. – V. 354. – 129354. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129354

12. Perna G. 3D-Printed Piezoelectret Based on Foamed Polylactic Acid for Energy-Harvesting and Sensing Applications / G. Perna, F. Bonacci, S. Caponi et al.// Nanomaterials. – 2023. – 13. – 2953. DOI: https://doi.org/10.3390/nano13222953
13. Guzhova A. Study of electret state in polylactic acid with nanosized filler by dielectric spectroscopy / A. Guzhova, I. Lounev, M. Galikhanov et al. // AIP Conf. Proc. – 2016. – 17481:020007. DOI: https://doi.org/10.1063/1.4954341
14. Zagidullina I.A. The study of the electret properties of polylactic acid and mineral fillers / I.A. Zagidullina, M.F. Galikhanov, R.I. Kamalova et al. // AIP Conference Proceedings. 2020. V. 2313. N 1. P. 050048. DOI: 10.1063/5.0033479
15. Galikhanov M., Guzhova A., Zagidullina I. Improvement of Electret Properties of Polylactide by Loading Mineral Fillers / M. Galikhanov, A. Guzhova, I. Zagidullina // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 2022. – 29 (3): 784–787. – DOI: https://doi.org/10.1109/TDEI.2022.3173499
16. Галиханов М.Ф. Исследование электретных свойств полилактидных пластинок с воздушными полостями, полученных методом 3D-печати / М.Ф. Галиханов, В.К. Болдышева, Ю.М. Хантимерова и др. // Электроника, фотоника и киберфизические системы.– 2025. – Т. 5, № 4. – С. 28-36.
17. Загидуллина И.А., Болдышева В.К., Шакиров Т.Р. Инновационные электретные фильтры на основе полипропиленовых и полилактидных волокон: экологические преимущества и экономический потенциал / И.А. Загидуллина, В.К. Болдышева, Т.Р. Шакиров // Экономика строительства и природопользования. – 2025. – № 2 (95). – С.44-49.
18. Zagidullina I.A. Production of Polypropylene and Polylactide Meshes Using Additive Technologies and Studies of their Structures and Properties / I.A. Zagidullina, M.F. Galikhanov, Yu.M. Khantimerova et al.// Fibre Chemistry. – 2025. – Vol. 57, No. 4. – P. 226-232. DOI: https://doi.org/10.1007/s10692-026-10647-5

NON-VOLATILE FILTER MATERIALS BASED ON POLYPROPYLENE AND POLYLACTIDE MESHES

M.F. Galikhanov [1,2], V.K. Boldysheva [2], I.F. Timerbaev [2]

[1]Russian Academy of Engineering
9, Bldg. 4, Gazetny Lane, Moscow, 125009, Russian Federation

Institute of Applied Research of the Tatarstan Academy of Sciences,
36a, Levo-Bulachnaya St., Kazan, 420111, Russian Federation

Absrtact. The mechanism of increasing the filtration efficiency of model mesh structures based on a polymer pair "polypropylene - polylactide" due to their contact mutual tribopolarization is investigated. The model meshes are made by layer-by-layer deposition (FDM printing) of polypropylene and polylactide with various dyes. It has been established that due to the significant difference in the position of polymers in the triboelectric series, polypropylene is positively charged during mutual friction, while polylactide is negatively charged. An assessment of the filtration capacity using toner powder showed that tribopolarization increases the mass of trapped microparticles by 1.4–2.1 times compared with unpolarized grids due to the appearance of an electrostatic field in the grids. The introduction of dyes into polylactide intensifies the accumulation of electrostatic charge and increases filtration efficiency. The results obtained substantiate the prospects of creating hybrid fibrous filter materials with the effect of a self-sustaining electret charge during operational deformations.

Keywords: filtration, additive technologies, polymer composites, polypropylene, polylactide, filtration grids, tribopolarization, electret properties, surface potential.

Материалы представлены на НПС с международным участием «Актуальные научные и прикладные задачи в области фильтроматериалов» (г. Казань, 17-18 августа 2026г.).
Статья представлена в редакцию 27 августа 2026 г.