

Раздел 3. Экологическая безопасность

УДК 677.494

ИННОВАЦИОННЫЕ ЭЛЕКТРЕТНЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ ПОЛИПРОПИЛЕНОВЫХ И ПОЛИЛАКТИДНЫХ ВОЛОКОН: ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА И ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ

Загидуллина И.А.¹, Болдышева В.К.², Шакиров Т.Р.³

^{1,3} ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», 420015, Казань, ул. Карла Маркса, 68, e-mail: ¹zagidullina_inna@mail.ru, ³timur.shakirov1993@mail.ru

² «Институт прикладных исследований» Академии наук Республики Татарстан, 420111, Казань, ул. Баумана, 20, e-mail: bkarasuno@yandex.ru

Аннотация. В статье рассматривается разработка и исследование композиционных электретных волокон на основе полипропилена (ПП) с диоксидом кремния и полилактида (ПЛА) с техническим углеродом для эффективной фильтрации мелкодисперсных частиц. Показано, что трибоэлектризация сеток из этих волокон значительно влияет на фильтрацию воздуха от частиц ксерографических порошков, причем ПП-композиция при отрицательном заряде улучшает фильтрационную эффективность, тогда как ПЛА с положительным зарядом этого эффекта почти не демонстрирует. Исследование подтверждает перспективность сочетания синтетических и биоразлагаемых полимеров для создания высокоэффективных и экологически безопасных фильтров.

Ключевые слова композитные электретные волокна, полипропилен, полилактид, фильтрация мелкодисперсных частиц, трибоэлектризация, фильтрующие материалы, ксерографические порошки, экологически безопасные фильтры.

ВВЕДЕНИЕ

В условиях роста глобальной экологической нагрузки фильтроматериалы играют ключевую роль в сохранении чистоты воздуха и воды, снижении выбросов загрязняющих веществ и поддержании здоровья экосистем [1]. Особенно актуальны эффективные фильтры с высокой способностью улавливать мелкодисперсные частицы (PM2.5 и меньше), способствующие снижению риска заболеваний и улучшению качества жизни [2].

Современные фильтрующие материалы постоянно совершенствуются с целью повышения эффективности очистки воздуха и воды при минимальном энергопотреблении и снижении негативного влияния на окружающую среду. Одним из перспективных направлений является использование электретных фильтров, в которых полимерные волокна получают и сохраняют электрический заряд, значительно повышающий способность улавливать микрочастицы [2, 3].

Полипропилен (ПП) традиционно применяется для производства электретных волокнистых материалов, благодаря химической стойкости, доступности и хорошей электретируемости, однако он плохо разлагается в природе, создавая проблему утилизации [4, 5]. В связи с этим полилактид (ПЛА) как биоразлагаемый полимер становится перспективной альтернативой: он обеспечивает сопоставимую фильтрационную эффективность, обладает способностью к электрическому заряду и быстрее разлагается, снижая экологический след фильтров. Технология электретирования PLA-материалов позволяет достичь фильтрационной эффективности до 99,5% и высокой стабильности заряда даже при воздействии влаги и температуры [6-8].

Комбинация синтетических полипропиленовых волокон с биоразлагаемыми полилактидными волокнами открывает новые перспективы в создании не только высокоэффективных, но и экологически безопасных фильтров [9]. С экономической точки зрения, такие фильтры обладают потенциалом снижения затрат промышленных предприятий за счет большей долговечности, возможности восстановления и меньшего негативного воздействия на окружающую среду, что уменьшает расходы на утилизацию и штрафы за загрязнение. Смешивание ПП- и ПЛА-волокон в структуре фильтра реализует баланс между долговечностью и биоразлагаемостью, расширяя сферу применения таких материалов в очистке промышленных выбросов, вентиляции и бытовых системах.

Экологический аспект использования фильтров на основе ПЛА подтверждается снижением отходов и уменьшением воздействия на свалки, учитывая быстрое биоразложение и возможность переработки после срока службы. Кроме того, высокая эффективность фильтрации частиц пыли снижает количественные потери загрязняющих веществ в атмосферу и водные объекты, что актуально для нормативного соответствия и снижения штрафов.

Экономические выгоды использования инновационных фильтров включают снижение расходов на обслуживание и замену благодаря повышенной стабильности заряда и долговечности, а также экономию энергии за счет уменьшения сопротивления воздушному потоку. Дополнительно, использование современных фильтров способствует улучшению репутации предприятий в сфере устойчивого развития, что положительно влияет на инвестиционную привлекательность. Применение оборудования с высокоэффективными фильтрами уменьшает количество простоев и ремонтов, повышая производительность производственных процессов и снижая операционные затраты. В совокупности, внедрение таких фильтров способствует устойчивому развитию как промышленных отраслей, так и рынка очистки воздуха и воды.

Комплексное изучение полипропиленовых и полилактидных электретенных волокон перспективно для создания эффективных, экологически чистых и экономически целесообразных фильтров.

Было показано, что введение различных добавок (наполнителей) в полимеры (в частности, в полипропилен и в полилактид) повышает их электретенные свойства и улучшает устойчивость электретенного эффекта [10-15]. Следовательно, использование волокон из композиционных материалов должно привести к большей эффективности очистки воздуха от пылевых частиц.

Исходя из вышеизложенного, целью данной работы стало получение полипропиленовых и полилактидных композиционных электретенных волокон и изучение их применимости для фильтрации мелкодисперсных частиц.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве объектов исследования были использованы волокна из композиции полипропилена с диоксидом кремния и композиции полилактида с техническим углеродом. Фильтрующие материалы были напечатаны в виде волокон, собранных в сетки размерами 200*200 мм на 3D-принтере Creality K1 MAX с программным обеспечением OrcaSlicer. Температура печати составляла 220°C.

Сетки переводили в электретенное состояние трибоэлектризацией, для чего ПП и ПЛА сетки подвергали трению друг об друга в течение 30 секунд. Потенциал поверхности (V_s) сеток определяли на приборе ИПЭП-1.

О фильтрационных характеристиках сеток судили по количеству ксерографических тонирующих порошков XV 80 Yellow и KNPC Blue, которые задерживались на сетках после просеивания. 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. Визуализацию сеток до и после фильтрации осуществляли с помощью лабораторного оптического микроскопа Saike Digital SK2009HDMI-T.

Определение характеристик пористой структуры частиц порошков проводилось на анализаторе удельной поверхности и размеров пор «TOP 200» (Altamira Instruments, LLC) 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%). Адсорбционная удельная поверхность частиц определялась по методу БЭТ, а объем и размера пор - по методу ВЖН.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для начала охарактеризовали ксерографические порошки. Цветные порошки были выбраны для того, чтобы можно было легче визуализировать из на бесцветной (для полипропиленовых композиционных волокон) и черных (для полилактидных композиционных волокон) сетках. Ксерографические порошки имеют достаточно малый размер частиц (2-15 мкм) неправильной формы с пористой поверхностью, о чем свидетельствуют значения удельной поверхности и объема и размера пор в таблице 1.

Таблица 1.
Результаты определения удельной поверхности и пористости

Ксерографический порошок	Размер частиц, мкм	Удельная поверхность по БЭТ, м ² /г	Объем пор, см ³ /г	Средний размер пор, нм
KNPC (синий)	2-5	13,61	0,04	11,53
XV80 (желтый)	3-15	8,04	0,03	15,30

При просеивании порошков через сетки выявилась следующая картина, показанная в таблице 2.

Таблица 2.
Масса порошка, задержавшихся на полимерных сетках после просеивания

Ксерографический порошок	Масса задержавшегося порошка, г/м ²			
	на ПП-сетке	на электретной ПП-сетке	на ПЛА-сетке	на электретной ПЛА-сетке
KNPC (синий)	2,78	6,36	4,44	3,04
XV80 (желтый)	5,11	8,11	3,11	3,31

Видно, что количество порошка, задерживающегося на полимерной сетке после просеивания, зависит от вида полимерной композиции и от состояния сеток – исходного или электретного. Можно констатировать следующее. Во-первых, на сетке задерживается очень малое количество порошка. Это объясняется тем, что сетки являются лишь модельными образцами, имитирующими фильтровальные материалы – размер их ячеек во много раз превышает размер частиц ксерографических порошков.

Во-вторых, после трибоэлектризации сеток количество задерживающихся частиц порошка на них изменяется, причем для полипропиленовой оно увеличивается в ~1,6 (для синего порошка) и в ~2,3 (для желтого порошка) раза, а для поллилактидной – почти не изменяется, даже несколько снижается (таблица 2). Это наглядно видно и на фотографиях сеток с задержавшимся на их волокнах частицами порошков на рисунке 1.

Это связано с тем, что после трения сеток друг об друга у них появляется постоянное электрическое поле с потенциалом поверхности –0,34 кВ для сетки из композиции полипропилена с аэросилом и +0,19 кВ для сетки из композиции полилактида с техническим углеродом.

Электретные фильтры улавливают частицы загрязнений не только за счет механических сил, но и за счет электрических. Это наглядно видно на рисунке 1. Например, на волокнах полипропилена частицы синего порошка находятся непосредственно на волокнах (рис. 1б), а на электретных полипропиленовых волокнах частиц порошка намного больше и они прилипли и к краям волокон (рисунк 1в). Как правило, частицы тонирующего порошка заряжены или отрицательно, или положительно (как применяемые KNPC и XV80). Учитывая, что ПП при трении заряжается отрицательно, а ПЛА — положительно, становится ясно, почему при трибоэлектризации количество порошка на ПП-волокнах, заряженных отрицательно, увеличивается, а на ПЛА-волокнах, имеющих тот же знак заряда, что и порошок — нет (таблица 2).

Конечно, при электретировании сеток распространенными методами коронного разряда или термополяризации значения их электретных свойств, а, следовательно, и эффективность фильтрации будет значительно выше. Также, не стоит забывать, что в промышленной фильтрации используют не сетки, а нетканые волокнистые материалы, у которых и размер ячеек меньше, и площадь волокон намного больше. Можно предположить, что при применении двухкомпонентных полимерных волокнистых материалов на основе полипропилена и полилактида будет происходить трение волокон друг от друга, что приведет к их трибополяризации и, как следствие, повышению фильтрующей способности фильтров на их основе.

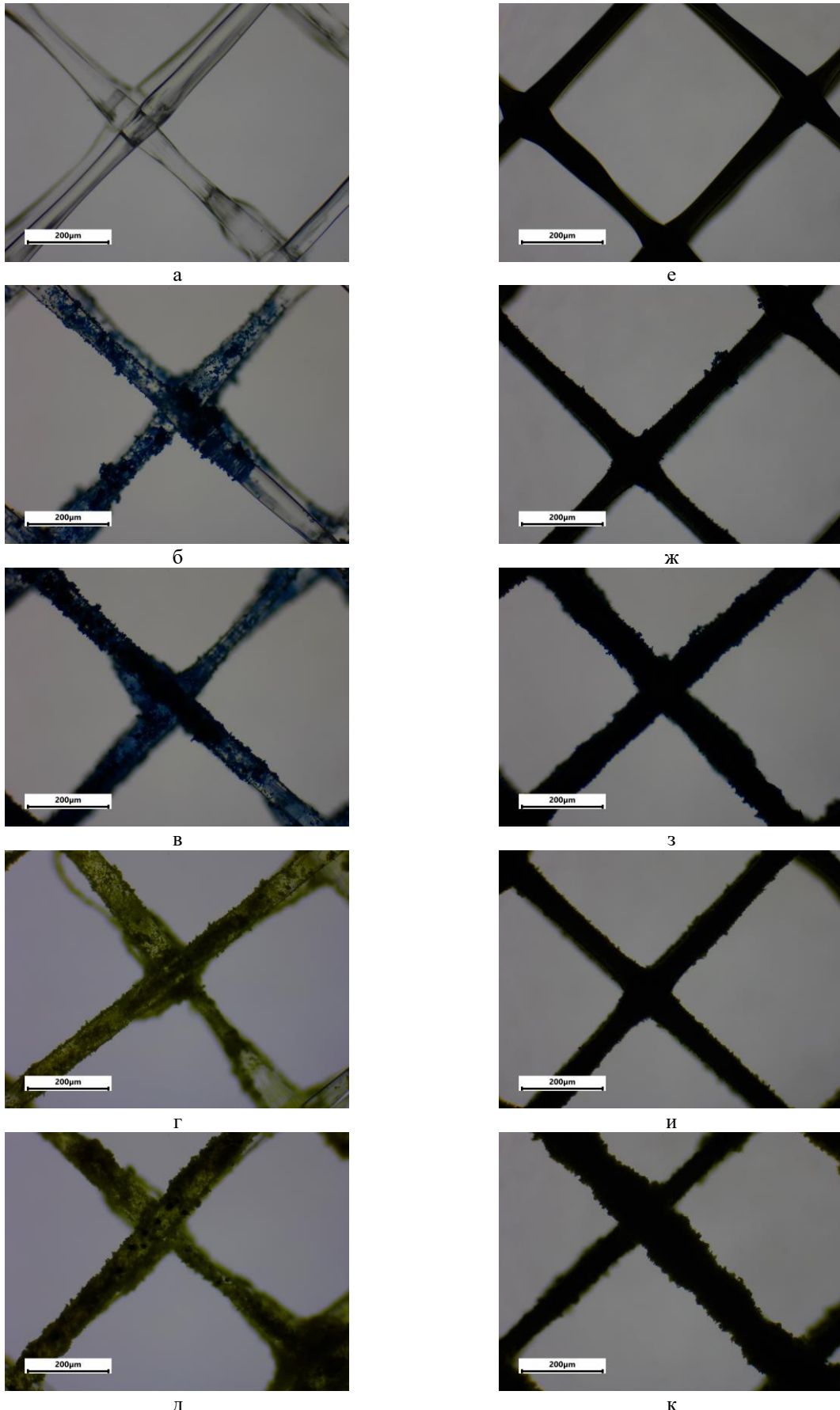


Рис. 1. Фотографии полипропиленовых (а-д) и полилактидных (е-к) сеток до (а, е) и после просивания через них ксерографического порошков — синего КНРС (б, в, ж, з) и желтого XV80 (г, д, и, к) с увеличением 4×: исходные сетки (а, б, г, е, ж, и) и сетки после трибоэлектретирования (в, д, з, к)

ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе показано, что трибоэлектризация сеток из ПП-композиатов приводит к увеличению количества отфильтрованных частиц порошков в 1,6–2,3 раза, в то время как для ПЛА-сеток наблюдается снижение или незначительное изменение степени фильтрации. Отрицательный заряд ПП-волокон после трения способствует притяжению противоположно заряженных загрязняющих частиц, улучшая эффективность фильтрации. ПЛА-волокна с зарядом того же знака, что и частицы, не демонстрируют аналогичного эффекта.

Использование сочетания полипропиленовых и полилактидных волокон в фильтрах может обеспечить баланс между долговечностью и биоразлагаемостью, снижая экологический след при сохранении высокой фильтрационной способности. Применение композиционных электретенных фильтров потенциально снижает энергетические и эксплуатационные затраты промышленных предприятий, а также уменьшает выбросы загрязняющих веществ в атмосферу и водные объекты.

Для повышения фильтрационной эффективности промышленных материалов рекомендуется применять двухкомпонентные нетканые волокнистые структуры.

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).

ЛИТЕРАТУРА

1. Sutherland, K. *Filters and Filtration Handbook Fifth Edition* / K. Sutherland. – Burlington: Butterworth-Heinemann, 2008. – 507 p.
2. 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: 10.1039/c7ra10916d.
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. <https://doi.org/10.1002/pat.6454>
4. Galikhanov, M.F. Unipolar Corona Discharge Effect on Fil-tering Capacity of Polypropylene Non-Woven Fabrics / M.F. Galikhanov // *Fibre Chemistry.* – 2017. – Vol. 48. № 6. – P. 473-477. DOI: 10.1007/s10692-017-9820-z
5. Abdurasul, M. Polypropylene Fibers: Properties, Production, and Applications. / M. Abdurasul, J. Asalkhon // *Miasto Przyszłości.* – 2025. – Vol. 58, – P. 417-419. <https://miastoprzyszlosci.com.pl/index.php/mp/article/view/6217>
6. Zhu, Q. Electrostatic Properties of Nonwoven Masks Made of Polylactic Acid / Q. Zhu, S. Kiuchi, M. Pennington, T. Hashimoto, K. Sugihara // *ACS Omega.* – 2025. – 10(27). – 29522-29529. doi: 10.1021/acsomega.5c02906.
7. 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: 10.1016/j.seppur.2024.129354
8. Shang, H. Bioelectret poly(lactic acid) membranes with simultaneously enhanced physical interception and electrostatic adsorption of airborne PM0.3 / H. Shang, K. Xu, T. Li et al. // *J Hazard Mater.* – 2023. – V. 458. 132010. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2023.132010
9. Lyu, L. An insight into the benefits of substituting polypropylene with biodegradable polylactic acid face masks for combating environmental emissions / L. Lyu, H. Peng, C. An, H. Sun, X. Yang, H. Bi // *Sci Total Environ.* – 2023. – V. 905. 167137. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.167137
10. Viraneva, A. Electret properties of PP/ZnO and PP/CuO composite films / A. Viraneva, T. Yovcheva, M. Galikhanov // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.* – 2015. – T. 22. № 3. – C. 1343-1348. DOI: 10.1109/TDEI.2015.7116320
11. Kilic, A. Improving electret properties of PP filaments with barium titanate / A. Kilic, E. Shim, B. Yeol et al. // *J. Electrostat.* – 2013. – Vol. 71, – pp. 41-47. DOI: 10.1016/j.elstat.2012.11.005
12. Kaczmarek, H. Piezo-electrets from polypropylene composites doped with mineral fillers /

H. Kaczmarek, M. Chylińska, E. Klimiec et al. // Pure Appl. Chem. – 2019; – 91(6): – 967–982. <https://doi.org/10.1515/pac-2018-0702>

13. Guzhova, A.A. Charge depth in polylactic acid electret filled with fine filler / A.A. Guzhova, M.F. Galikhanov // Bulgarian Chemical Communications. – 2015. – Vol. 47. Special Issue B. – Pp. 103-108.

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. – vol. 2313. no. 1. – pp. 050048. DOI: 10.1063/5.0033479

15. Galikhanov M., Guzhova A., Zagidullina I. 2022. Improvement of Electret Properties of Polylactide by Loading Mineral Fillers. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 29 (3): 784–787. DOI: 10.1109/TDEI.2022.3173499

INNOVATIVE ELECTRET FILTERS BASED ON POLYPROPYLENE AND POLYLACTIDE FIBERS: ECOLOGICAL ADVANTAGES AND ECONOMIC POTENTIAL

¹Zagidullina I.A., ²Boldysheva V.K., ³Shakirov T.R.

^{1,3}Kazan National Research Technological University, Kazan

²Institute of Applied Research, Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan

Annotation. This article discusses the development and study of composite electret fibers based on polypropylene (PP) with silicon dioxide and polylactide (PLA) with technical carbon for effective filtration of fine particles. It is shown that the triboelectrification of networks made from these fibers significantly affects the filtration of air from xerographic toner particles, with the PP composite under a negative charge improving filtration efficiency, whereas the PLA with a positive charge shows almost no such effect. The study confirms the promise of combining synthetic and biodegradable polymers to create highly efficient and environmentally safe filters.

Keywords: composite electret fibers, polypropylene, polylactide, fine particle filtration, triboelectrification, filtering materials, xerographic toner particles, environmentally safe filters.