

УДК 676.26

О ПРИЧИНАХ ИЗМЕНЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БУМАЖНЫХ ОБЕЗЗОЛЕННЫХ ФИЛЬТРОВ ПРИ ИХ ОБРАБОТКЕ В УНИПОЛЯРНОМ КОРОННОМ РАЗРЯДЕ

© Л.Р. Галеева*, М.Ф. Галиханов, С.В. Гильфанова

*Казанский национальный исследовательский технологический университет,
ул. Карла Маркса, 68, Казань, 420015, Республика Татарстан (Российская
Федерация), e-mail: L.musina@yandex.ru*

В работе представлены результаты исследования структуры и свойств бумажных обеззоленных фильтров «Синяя лента». Показано, что фильтровальная бумага «Синяя лента» имеет достаточно высокую плотность с относительно малым количеством и размеров пустот (пор) между волокнами. При обработке фильтров в поле коронного разряда наблюдается повышение их механических свойств на 3.5–6%, что вызвано преимущественно усилением межволоконных сил связей. Реализация повышенных электростатических сил связей в структуре листа приводит к увеличению сопротивления внешней растягивающей силе, необходимой для разрыва бумажного фильтра. Наблюдаемые зависимости связаны с ориентацией и упорядочиванием элементов структуры целлюлозно-бумажного материала, с ростом потенциала двойного электрического слоя на поверхности волокон под действием носителей заряда, инжектируемых в объем бумаги из коронного разряда и с образованием гетерозаряда за счет ориентации полярных группировок целлюлозы, сегментов макромолекул во время электретирирования. Это подтверждается ростом ζ -потенциала волокон обеззоленных фильтров при обработке в отрицательном коронном разряде – установлено, что значение дзета-потенциала волокон электретирированных обеззоленных фильтров на 18% больше, чем для исходных. Достигнутые результаты увеличения физико-механических свойств обеззоленных фильтров позволяют повысить эффективность их применения.

Ключевые слова: обеззоленные фильтры, электретирирование, дзета-потенциал, отрицательный коронный разряд, электростатические связи, двойной электрический слой.

Введение

На фоне ужесточения требований к качеству продукции, выпускаемой в различных отраслях производства, необходимо постоянное совершенствование технологии производства и модифицирование целлюлозно-бумажных материалов (ЦБМ), в том числе фильтрующих видов бумаги и картона с целью повышения их эксплуатационных характеристик [1–3]. Известно, что значительный вклад в формировании прочности бумажного листа оказывают водородные связи, силы Ван-дер-Ваальса и силы трения между волокнами [4–9]. При этом вклад водородных связей составляет примерно 75%. Значительный вклад в формирование уровня прочностных свойств бумажного листа вносят и электростатические связи [10, 11].

Ранее проведенными исследованиями установлено, что при воздействии на бумажные материалы полем отрицательного коронного разряда (электретирирования) наблюдается повышение их потребительских свойств [12–16]. Например, обработанные в униполярном коронном разряде ЦБМ имеют повышенные физико-механические и фильтрующие характеристики [15, 16]. Повышение их прочностных свойств объяснялось ориентацией дипольных групп структурных элементов бумаги и повышением уровня электростатических связей между волокнами. Улучшение эффективности фильтрации было объяснено осаждением мелкодисперсных частиц на фильтро-

Галеева Ляйсан Рафаиловна – доцент кафедры технологии переработки полимеров и композиционных материалов, кандидат технических наук,
e-mail: L.musina@yandex.ru

Галиханов Мансур Флоридович – профессор кафедры технологии переработки полимеров и композиционных материалов, доктор технических наук,
e-mail: mgalikhanov@yandex.com

Гильфанова Светлана Владимировна – аспирант кафедры технологии переработки полимеров и композиционных материалов, e-mail: svetlana-volkova-1994@mail.ru

* Автор, с которым следует вести переписку.

вальной бумаге за счет сил кулоновского притяжения. Особый интерес и практическую значимость представляет изучение стабильности эксплуатационных свойств после длительного использования фильтровальных материалов в жидкостях, которая, в том числе, зависит от наличия и сохранения приобретенного компонентами бумаги в результате электретирирования заряда. Электретные полимерные фильтры (на основе полипропилена, полиэтилена, полилактида и т.д.) давно изучаются в научной литературе и применяются в промышленности [17–20].

Свойства фильтровальной бумаги и картона зависят от свойств компонентов и технологических условий их изготовления. При этом на процесс фильтрации прежде всего влияют поверхностные свойства материала – электрокинетические и электростатические. Электрокинетические свойства проявляются практически во всех случаях взаимодействия бумажных фильтров с растворами электролитов [1].

Однако рассмотренные ранее подобные зависимости и изученные в литературе данные не дают полных сведений о реализации электрокинетического потенциала поверхности фильтровальных видов бумаги и картона. Полученные данные требуют анализа влияния электрического поля на волоконные частицы. Перспективным для этих целей видится метод определения дзета-потенциала (ζ -потенциал) волокон ЦБМ.

Электрокинетический потенциал характеризует электрохимическое равновесие на поверхности раздела фаз и зависит от свойств дисперсионной среды и дисперсной фазы, по его величине можно судить о мере интенсивности проявления электрокинетических явлений. Электрокинетическими явлениями называют группу явлений, в которых проявляется взаимосвязь электрических процессов и относительного перемещения дисперсионной среды и дисперсной фазы [21]. То есть ζ -потенциал – это и есть мера устойчивости коллоидной массы и является обоснованным экспериментальным определением [22]. Если говорить об электрокинетическом потенциале применительно к целлюлозно-бумажным материалам, то в качестве дисперсионной среды и дисперсной фазы выступает волокнистая гидросуспензия, представляющая собой гетерогенную систему растворенных в воде коллоидных компонентов бумажной композиции.

Таким образом, цель настоящих исследований – изучение комплекса прочностных и электрофизических свойств и их взаимосвязи для исходной фильтровальной бумаги и бумаги, обработанной в униполярном коронном разряде.

Экспериментальная часть

В качестве исследуемых образцов использовали обеззоленные фильтры «Синяя лента» (СЛ), выпускаемые по ТУ 6-09-1678-95. Толщина образцов составляет 180 мкм, масса – 80 г/м².

Механические характеристики бумажных фильтров при воздействии растягивающих нагрузок (разрывная длина (L), поглощение энергии при растяжении (Z), сопротивление разрыву (S), ТЕА-индекс (I_2), индекс сопротивления разрыву (D), модуль эластичности (E)) определяли на разрывной машине 81502-SN41100 по ISO 1924-2.

Структура фильтров фиксировалась с помощью цифрового микроскопа Bresser Junior 40x-1024x.

Часть образцов подвергали воздействию электрического поля, которое проводилось в отрицательном коронном разряде при напряжении, подаваемом на электрод $U_{эл} = 30$ кВ и времени обработки $\tau_{эл} = 30$ с (ЭСЛ). Перед этим образцов нагревали в термощкафу при 90 °С в течение 600 с.

Электретные характеристики (потенциал поверхности V_s , напряженность электрического поля E и эффективная поверхностная плотность заряда $\sigma_{эф}$) обеззоленных фильтров измеряли ежедневно на измерителе параметров электростатического поля ИПЭП-1, принцип действия которого основан на методе периодического экранирования приемного электрода, находящегося на некотором расстоянии от поверхности электрета.

Анализ электрокинетического потенциала волокон и наполнителей в водном растворе (ζ -потенциал твердых частиц) проводили на анализаторе Дзета-потенциал Mutek SZP-06. Методика испытания основана на том, что порция волокнистой гидросуспензии отбирается под вакуумом через впускное отверстие, а затем – в измерительную ячейку. На опорном электроде образуется волоконная подушка. После установления сигнала, когда волокно стабилизируется, прилагают давление в диапазоне от -0.2 до -0.4 бар. Колеблющийся поток жидкости проходит через волоконную подушку. При смещении возникает потенциал протекания, измеряемый электродами. Роспуск (диспергирование) фильтровальной бумаги перед анализом проводили на лабораторном дезинтеграторе в течение 10 мин при 1500 об/мин. Концентрация бумажных волокон в гидросуспензии составляла 1.5%.

Обсуждение результатов

Фильтры «Синяя лента» имеют достаточно высокую плотность (рис. 1) и используются для отделения от растворов мелкокристаллических осадков [23]. На представленных фотографиях четко видна поверхностная структура и расположение структурных элементов обеззолненных фильтров с относительно малым количеством и размеров пустот (пор) между волокнами.

Согласно требованиям нормативных документов, на соответствие которым выпускается фильтровальная бумага, некоторые показатели (например, сопротивление продавливанию) необходимо определять во влажном состоянии. Связано это с тем, что бумажные фильтры «Синяя лента» относятся к фильтрам медленной фильтрации и процесс фильтрования идет достаточно долго, а увлажнение при этом может негативно сыграть на их работоспособности. Однако интерес представляют и значения прочностных характеристик фильтровальной бумаги как целлюлозно-бумажного материала и в сухом состоянии, чему и посвящена настоящая работа. Хотя, конечно, прочность сухих лабораторных фильтров не является лимитирующим фактором их использования.

К основным прочностным свойствам, определяемым для ЦБМ, относятся разрывная длина L (длина полоски бумаги, которая порвется под влиянием сил собственной тяжести) и сопротивление разрыву S (максимальная растягивающая сила, выдерживаемая образцом до его разрыва). Однако не менее информативными и интересными, позволяющими оценить работоспособность фильтров во время его эксплуатации, являются следующие свойства:

– поглощение энергии при растяжении Z и ТЕА-индекс I_z характеризуют отношение количества энергии, затраченной при растяжении испытуемого образца до его разрыва, к площади и к массе одного квадратного метра соответственно;

– индекс сопротивления разрыву I – это отношение прочности при растяжении к массе продукции площадью один квадратный метр.

Результаты определения этих характеристик целлюлозно-бумажных материалов до и после электретирирования представлены в таблице 1.

Видно (табл. 1), что при обработке фильтров в поле коронного разряда наблюдается повышение их механических свойств на 4.4–6%. Безусловно, изменение свойства нельзя назвать значительным, оно на грани ошибки эксперимента. Но нельзя не заметить, что для всех параметров бумаги при электретирировании наблюдается отклонение в сторону их увеличения, что позволяет делать общий вывод о положительном влиянии обработки на механические свойства материала.

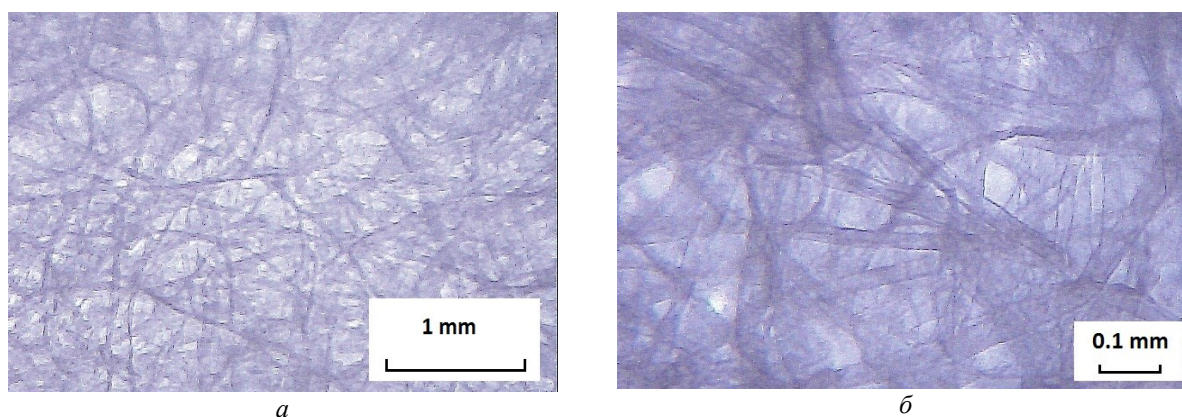


Рис. 1. Фотография поверхности обеззолненных бумажных фильтров «Синяя лента» с увеличением 4× (а) и 10× (б)

Таблица 1. Физико-механические свойства фильтров «Синяя лента» до и после обработки униполярным коронным разрядом

Наименование образца	L , км	Z , Дж/м ²	S , Н/м	I_z , Дж/г	I , Нм/г
СЛ	4.94	51.6	4456	0.56	48.4
ЭСЛ	5.16	54.7	4654	0.59	50.6
Изменение показателя, %	+4.4	+6	+4.4	+5.4	+4.5

При проведении испытаний какой-либо анизотропичности в свойствах фильтровальной бумаги не наблюдалось. Это может быть связано с тем, что либо бумага была изготовлена на листоотливной форме, где нет машинного и поперечного направления [2], либо на формирующем устройстве с наклонной сеткой, когда скорость потока бумажной массы соответствует скорости сетки и получается фильтровальная бумага с изотропными свойствами [1]. Анализ свойств не менее чем десяти образцов для каждого испытания это подтвердили.

Безусловно, свойства ЦБМ во многом зависят от длины волокна, их гибкости. Но повышение показателей физико-механических свойств для электретируемых образцов фильтровальной бумаги вызвано преимущественно усилением межволоконных сил связей – реализация повышенных электростатических сил связей в структуре листа приводит к увеличению сопротивления внешней растягивающей силе, необходимой для разрыва бумажного фильтра.

Можно предложить следующие объяснения наблюдаемой зависимости.

Во-первых, под воздействием поля коронного разряда в диэлектрике может происходить ориентация и упорядочивание структурных элементов, повышение степени кристалличности полимера, ведущее к его упрочнению [24–26]. На основании этих данных можно предположить, что увеличение механических свойств бумажных материалов после электретирувания связана с возможной ориентацией элементов структуры целлюлозно-бумажного материала. Однако это маловероятно. Об этом говорит и тот факт, что действие коронного разряда не привело к видимым изменениям толщины и плотности фильтровальных бумаг.

Во-вторых, усиление межволоконного взаимодействия фильтровальной бумаги при электретирувании происходит за счет возрастания потенциала двойного электрического слоя на поверхности волокон под действием носителей заряда, инжектируемых в объем бумаги из коронного разряда. Об этом свидетельствует тот факт, что в отрицательной короне в воздухе образуются ионы O_2^- , CO_3^- , $(H_2O)_nCO_3^-$, которые осаждаются в поверхностных слоях обрабатываемого материала [27, 28].

Исследования по изучению электретных характеристик (табл. 2) показали, что обработка в униполярном коронном разряде бумажных фильтров не приводит к получению материала с высокими и стабильными электретными свойствами.

Спад заряда электретов обеззоленных фильтров объясняется полярной природой компонентов бумаги и, как следствие, высокой удельной объемной электропроводностью материала. Однако несмотря на непродолжительное время удержания заряда, можно предположить, что воздействие заряда приводит к необратимым явлениям, происходящими в структуре материала и от которых зависят практические свойства бумаги, так как изменение механических свойств фильтров проводили не ранее, чем через месяц после их электретирувания.

В-третьих, рост электростатических сил связей в бумаге обусловлен образованием гетерозаряда за счет ориентации полярных группировок целлюлозы, сегментов макромолекул во время электретирувания, в результате чего поверхность волокон приобретает заряд. Это должно сопровождаться возрастанием ζ -потенциала волокон обеззоленных фильтров при электретирувании. Результаты измерения дзета-потенциала волокон образцов представлены на рисунке 2.

Сравнивая результаты для исходных и электретируемых обеззоленных фильтров, видим, что значение ζ -потенциала волокон ЭСЛ больше на 18%, чем для волокон СЛ, что подтверждает сделанное предположение.

Таблица 2. Электретные свойства бумажных обеззоленных фильтров «Синяя лента»

Материал	Начальные значения			Значения через 10 суток после электретирувания		
	V_3 , кВ	E , кВ/м	$\sigma_{эф}$, мкКл/м ²	V_3 , кВ	E , кВ/м	$\sigma_{эф}$, мкКл/м ²
ЭСЛ	0.08	5.18	0.045	0.001	0.26	0.0014

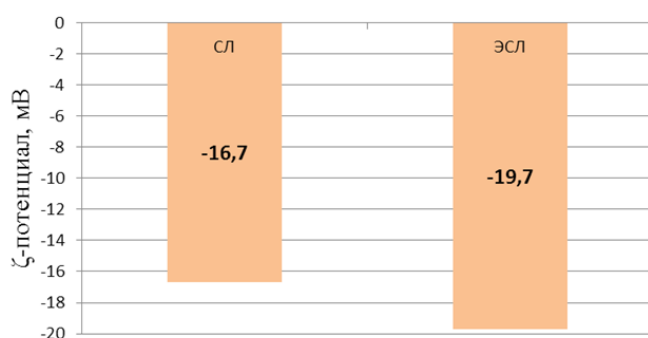


Рис. 2. ζ -потенциал волокон бумажных обеззоленных фильтров

Выводы

Таким образом, в ходе проведенных исследований было показано, что электретирирование приводит к упрочнению структуры обеззоленных фильтров и повышению сопротивления внешним растягивающим нагрузкам за счет увеличения ζ -потенциала волокон.

При обработке фильтров в поле коронного разряда наблюдается повышение их механических свойств на 4,4–6%, что вызвано преимущественно усилением межволоконных сил связей. Реализация повышенных электростатических сил связей в структуре листа приводит к увеличению сопротивления внешней растягивающей силе, необходимой для разрыва бумажного фильтра. Наблюдаемые зависимости связаны с ориентацией и упорядочиванием элементов структуры целлюлозно-бумажного материала, с ростом потенциала двойного электрического слоя на поверхности волокон под действием носителей заряда, инжектируемых в объем бумаги из коронного разряда и с образованием гетерозаряда за счет ориентации полярных группировок целлюлозы, сегментов макромолекул во время электретирирования. Это подтверждается ростом ζ -потенциала волокон обеззоленных фильтров при обработке в отрицательном коронном разряде – установлено, что значение дзета-потенциала волокон электретирированных обеззоленных фильтров на 18% больше, чем для исходных.

Достигнутые результаты увеличения физико-механических свойств обеззоленных фильтров позволят повысить эффективность их применения.

Список литературы

1. Канарский А.В. Фильтровальные виды бумаги и картона для промышленных технологических процессов. М., 1991. 272 с.
2. Фляте Д.М. Свойства бумаги. М., 1986. 680 с.
3. Imani R., Talaiepour M., Dutta J., Ghobadinezhad M.R., Hemmasi A.H., Nazhad M.M. Production of antibacterial filter paper from wood cellulose // *BioResources*. 2011. Vol. 6, issue 1. Pp. 891–900.
4. Salminen L.I. Drying-induced stress state of inter-fibre bonds // *Journal of Pulp and Paper Science*. 1996. Vol. 22, issue 10. Pp. J402–J407.
5. Haslach Jr. H.W. A model for drying-induced microcompressions in paper: Buckling in the interfiber bonds // *Composites Part B: Engineering*. 1996. Vol. 27, issue 1. Pp. 25–33. DOI: 10.1016/1359-8368(95)00003-8.
6. Delgado-Fornué E., Contreras H.J., Toriz G., Allan G.G. Adhesion between cellulosic fibers in paper // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2010. Vol. 25, issue 6–7. Pp. 597–614. DOI: 10.1163/016942410X530951
7. Дулькин Д.А., Спиридонов В.А., Комаров В.И., Блинова Л.А. Свойства целлюлозных волокон и их влияние на физико-механические характеристики бумаги и картона. Архангельск, 2011. 176 с.
8. Fornué E.D., Allan G.G., Quiñones H.J.C., González G.T., Saucedo J.T. Fundamental aspects of adhesion between cellulosic surfaces in contact – A review // *O Papel*. 2011. Vol. 72, issue 9. Pp. 85–90.
9. Иванова Е.И., Смолин А.С., Звонарева Т.К., Иванов-Омский В.И. Исследование системы водородных связей в бумаге // *Химия растительного сырья*. 2015. №1. С. 181–185. DOI: 10.14258/jcprpm.201501400.
10. Кожевников С.Ю., Ковернинский И.Н. Межволоконные электростатические связи в бумаге // *Химия растительного сырья*. 2012. №3. С. 197–202.
11. Смолин А.С., Бисальски М., Шабель С., Шабиев Р.О. Влияние размола и фракционирования на электроповерхностные свойства целлюлозных гидросуспензий // *Химия растительного сырья*. 2011. №3. С. 183–192.
12. Perepelkina A.A., Galikhanov M.F., Musina L.R. Effect of unipolar corona discharges on properties of pulp-and-paper materials // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2015. Vol. 51, no. 2. Pp. 138–142. DOI: 10.3103/S1068375515020118.
13. Назмиева А.И., Галиханов М.Ф., Мусина Л.Р. Изучение физико-механических свойств и процесса биоразложения модифицированной мешочной бумаги // *Изв. вузов. Лесной журнал*. 2017. №5. С. 150–158. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.5.150.
14. Мусина Л.Р., Галиханов М.Ф., Волкова С.В. Управление эксплуатационными свойствами фильтровальной бумаги с помощью униполярного коронного разряда // *Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов: материалы IV международной научно-технической конференции*. Архангельск, 2017. С. 114–119.
15. Мусина Л.Р., Галиханов М.Ф., Нафикова А.Р. Влияние электретирирования на деформационные и прочностные свойства бумажных фильтров // *Вестник Технологического университета*. 2017. Т. 20, №6. С. 48–50.
16. Мусина Л.Р., Галиханов М.Ф. Влияние электретирирования на сорбционные и фильтрующие свойства фильтровальной бумаги // *Химия растительного сырья*. 2017. №2. С. 155–161. DOI: 10.14258/jcprpm.2017021782.
17. Ploeanu M.C., Notinger P.V., Dumitran L.M., Tabti B., Antoniu A., Dascalescu L. Surface potential decay characterization of non-woven electret filter media // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2011. Vol. 18, issue 5. Pp. 1393–1400. DOI: 10.1109/TDEI.2011.6032807.
18. Xiao H., Song Y., Chen G. Correlation between charge decay and solvent effect for melt-blown polypropylene electret filter fabrics // *Journal of Electrostatics*. 2014. Vol. 72, issue 4. Pp. 311–314. DOI: 10.1016/j.elstat.2014.05.006.

19. Yu B., Han J., Sun H., Zhu F., Zhang Q., Kong J. The preparation and property of poly(lactic acid)/tourmaline blends and melt-blown nonwoven // *Polymer Composites*. 2015. Vol. 36, issue 2. Pp. 264–271. DOI: 10.1002/pc.22939.
20. Wang Y., Lin Z., Zhang W. Comparison of effects of particle charging, media characteristics, humidity and aerosols on loading performance of electret media // *Building and Environment*. 2020. Vol. 179. 106962. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106962.
21. Шабиев Р.О., Смолин А.С. Анализ электрокинетических параметров бумажной массы. СПб., 2012. 80 с.
22. Бельский Д., Балаханов Д., Лесников Е. Определение дзета-потенциала: краткий обзор основных методов // *Аналитика*. 2017. №3. С. 82–89.
23. Комаров В.И., Галкина Л.А., Лаптев Л.Н. и др. Технология целлюлозно-бумажного производства: в 3 т. Т. II. Производство бумаги и картона. Ч. 2. основные виды и свойства бумаги, картона, фибры и древесных плит. СПб., 2006. 499 с.
24. Вертячих И.М., Воронежцев Ю.И., Гольдаде В.А., Пинчук Л.С. Свойства полимерных электретных материалов, сформированных в контакте с разнородными металлами // *Пластические массы*. 1986. №3. С. 30–32.
25. Гольдаде В.А. Электретные композитные материалы на основе полимеров: основные свойства и новые области применения // *Механика композитных материалов*. 1998. Т. 34, №2. С. 153–162.
26. Mochalova E.N., Limarenko N.A., Galikhanov M.F., Deberdeev R.Ya. Effect of the Amount of Curing Agent, Curing Temperature, and Polarization on Physicomechanical Characteristics of Epoxyamine Adhesive Compositions Based on DER-331 Oligomer // *Polymer Science, Series D*. 2016. Vol. 9, no. 4. Pp. 396–401. DOI: 10.1134/S1995421216040122.
27. Yovcheva T. Corona charging of synthetic polymer films. New York, 2010. 60 p.
28. Kestelman V.N., Pinchuk L.S., Goldade V.A. *Electrets in Engineering: Fundamentals and Applications*. Boston-Dordrecht-London, 2000. 281 p.

Поступила в редакцию 23 мая 2020 г.

После переработки 7 декабря 2020 г.

Принята к публикации 8 декабря 2020 г.

Для цитирования: Галеева Л.Р., Галиханов М.Ф., Гильфанова С.В. О причинах изменения механических свойств бумажных обеззоленных фильтров при их обработке в униполярном коронном разряде // *Химия растительного сырья*. 2021. №1. С. 337–343. DOI: 10.14258/jcprm.2021017783.

*Galeyeva L.R.**, Galikhanov M.F., Gilfanova S.V. ABOUT THE REASONS FOR THE CHANGE IN THE MECHANICAL PROPERTIES OF PAPER ASHLESS FILTERS DURING THEIR PROCESSING IN A UNIPOLAR CORONA DISCHARGE

Kazan National Research Technological University, st. Karla Marksa, 68, Kazan, 420015, Republic of Tatarstan (Russian Federation), e-mail: L.musina@yandex.ru

The article presents the study results of the structure and properties of paper ashless filters "Blue tape". It is shown that the "Blue tape" filter paper has a fairly high density with a relatively small number and size of voids (pores) between the fibers. When processing filters in the corona discharge field, an increase in their mechanical properties by 3.5–6% is observed, this is mainly due to the strengthening of the interfiber bond forces. The implementation of increased electrostatic bonding forces in the sheet structure leads to an increase in the resistance to the external tensile force necessary to break the paper filter. The observed dependences are associated with the orientation and ordering of the pulp and paper material structural elements, with an increase in the potential of the double electric layer on the fibers surface under the charge action carriers injected into the paper volume from the corona discharge and with the formation of a hetero charge due to the orientation of the polar cellulose groups and macromolecule segments during electretting. This is confirmed by the increase in the ζ – potential of the fibers of filters during processing in a negative corona discharge - it was found that the zeta – potential value of electret ashless filters is 18% higher than for the initial ones. The achieved results of increasing the ashless filters physico- mechanical properties will increase the efficiency of their use.

Keywords: ashless filters, electretting, zeta - potential, negative corona discharge, electrostatic bonds, double electric layer.

* Corresponding author.

References

1. Kanarskiy A.V. *Fil'troval'nyye vidy bumagi i kartona dlya promyshlennykh tekhnologicheskikh protsessov*. [Filter papers and cardboard for industrial technological processes]. Moscow, 1991, 272 p. (in Russ.).
2. Flyate D.M. *Svoystva bumagi*. [Paper properties]. Moscow, 1986, 680 p. (in Russ.).
3. Imani R., Talaiepour M., Dutta J., Ghobadinezhad M.R., Hemmasi A.H., Nazhad M.M. *BioResources*, 2011, vol. 6, issue 1, pp. 891–900.
4. Salminen L.I. *Journal of Pulp and Paper Science*, 1996, vol. 22, issue 10, pp. J402–J407.
5. Haslach Jr. H.W. *Composites Part B: Engineering*, 1996, vol. 27, issue 1, pp. 25–33. DOI: 10.1016/1359-8368(95)00003-8.
6. Delgado-Fornué E., Contreras H.J., Toriz G., Allan G.G. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2010, vol. 25, issue 6–7, pp. 597–614. DOI: 10.1163/016942410X530951.
7. Dul'kin D.A., Spiridonov V.A., Komarov V.I., Blinova L.A. *Svoystva tsellyuloznykh volokon i ikh vliyaniye na fiziko-mekhanicheskiye kharakteristiki bumagi i kartona*. [Properties of cellulose fibers and their effect on the physical and mechanical characteristics of paper and cardboard]. Arkhangelsk, 2011, 176 p. (in Russ.).
8. Fornué E.D., Allan G.G., Quiñones H.J.C., González G.T., Saucedo J.T. *O Papel*, 2011, vol. 72, issue 9, pp. 85–90.
9. Ivanova Ye.I., Smolin A.S., Zvonareva T.K., Ivanov-Omskiy V.I. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2015, no. 1, pp. 181–185. DOI: 10.14258/jcprm.201501400. (in Russ.).
10. Kozhevnikov S.YU., Koverninskiy I.N. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2012, no. 3, pp. 197–202. (in Russ.).
11. Smolin A.S., Bisal'ski M., Shabel' S., Shabiyev R.O. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2011, no. 3, pp. 183–192. (in Russ.).
12. Perepelkina A.A., Galikhanov M.F., Musina L.R. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2015, vol. 51, no. 2, pp. 138–142. DOI: 10.3103/S1068375515020118.
13. Nazmiyeva A.I., Galikhanov M.F., Musina L.R. *Izvestiya vuzov Lesnoy zhurnal*, 2017, no. 5, pp. 150–158. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.5.150.
14. Musina L.R., Galikhanov M.F., Volkova S.V. *Problemy mekhaniki tsellyulozno-bumazhnykh materialov: materialy IV mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. [Problems of the mechanics of pulp and paper materials: materials of the IV international scientific and technical conference]. Arkhangelsk, 2017, pp. 114–119. (in Russ.).
15. Musina L.R., Galikhanov M.F., Nafikova A.R. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2017, vol. 20, no. 6, pp. 48–50. (in Russ.).
16. Musina L.R., Galikhanov M.F. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2017, no. 2, pp. 155–161. DOI: 10.14258/jcprm.2017021782. (in Russ.).
17. Plopeanu M.C., Notingher P.V., Dumitran L.M., Tabti B., Antoniu A., Dascalescu L. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, vol. 18, issue 5, pp. 1393–1400. DOI: 10.1109/TDEI.2011.6032807.
18. Xiao H., Song Y., Chen G. *Journal of Electrostatics*, 2014, vol. 72, issue 4, pp. 311–314. DOI: 10.1016/j.elstat.2014.05.006.
19. Yu B., Han J., Sun H., Zhu F., Zhang Q., Kong J. *Polymer Composites*, 2015, vol. 36, issue 2, pp. 264–271. DOI: 10.1002/pc.22939.
20. Wang Y., Lin Z., Zhang W. *Building and Environment*, 2020, vol. 179, 106962. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.106962.
21. Shabiyev R.O., Smolin A.S. *Analiz elektrokineticheskikh parametrov bumazhnoy massy*. [Analysis of electrokinetic parameters of paper pulp]. 2012, 80 p. (in Russ.).
22. Belen'kiy D., Balakhanov D., Lesnikov Ye. *Analitika*, 2017, no. 3, pp. 82–89. (in Russ.).
23. Komarov V.I., Galkina L.A., Laptev L.N. and others. *Tekhnologiya tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva: v 3 t. T. II. Proizvodstvo bumagi i kartona. CH. 2. osnovnyye vidy i svoystva bumagi, kartona, fibry i drevesnykh plit*. [Technology of pulp and paper production: in 3 vol. Vol. II. Production of paper and cardboard. Part 2. main types and properties of paper, cardboard, fiber and wood-based panels]. St. Petersburg, 2006, 499 p.
24. Vertyachikh I.M., Voronezhnev YU.I., Gol'dade V.A., Pinchuk L.S. *Plasticheskiye massy*, 1986, no. 3, pp. 30–32. (in Russ.).
25. Gol'dade V.A. *Mekhanika kompozitnykh materialov*, 1998, vol. 34, no. 2, pp. 153–162. (in Russ.).
26. Mochalova E.N., Limarenko N.A., Galikhanov M.F., Deberdeev R.Ya. *Polymer Science, Series D*, 2016, vol. 9, no. 4, pp. 396–401. DOI: 10.1134/S1995421216040122.
27. Yovcheva T. Corona charging of synthetic polymer films. New York, 2010. 60 p.
28. Kestelman V.N., Pinchuk L.S., Goldade V.A. *Electrets in Engineering: Fundamentals and Applications*. Boston-Dordrecht-London, 2000. 281 p.

Received May 23, 2020

Revised December 7, 2020

Accepted December 8, 2020

For citing: Galejeva L.R., Galikhanov M.F., Gilfanova S.V. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2021, no. 1, pp. 337–343. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2021017783.

