Статья поступила в редакцию: 14.10.2026
Статья принята к публикации: 20.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 537.2+678.5+677.21

Исследование процесса электризации при фрикционном взаимодействии полимерных, композиционных полимерных материалов и покрытий с хлопком-сырцом в зависимости от вида и природы полимеров и наполнителей

Нормуродов Анвар Азамат Ўғли
соискатель
Государственного учреждения "Фан ва тараккиёт"
Ташкентский государственный технический университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: bozorboyev1983@mail.ru
Бозорбоев Шухрат Абдурахимович
д-р филос. по техн. наук, (PhD),
ст. научн. сотр.,
ГУП "Фан ва тараккиёт",
Ташкентский государственный технический университет
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Рахимкулова Тулкиной Мухтаровна
докторант (PhD)
Государственного учреждения "Фан ва тараккиёт",
Ташкентский государственный технический университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Эргашев Нурбек Эркинович
соискатель
Государственного учреждения "Фан ва тараккиёт",
Ташкентского государственного технического университета,
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Холматова Элдора Абдуназаровича
соискатель
Государственного учреждения "Фан ва тараккиёт" Ташкенсткий государственный технический университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Study of the electrification process during frictional interaction between polymeric materials, polymer-based composite materials and coatings with raw cotton, depending on the type and nature of polymers and fillers

Normurodov Anvar Azamat ugli
Research Applicant,
State Institution "Fan va Taraqqiyot,"
Tashkent State Technical University, Tashkent, Republic of Uzbekistan

Библиографическое описание: Исследование процесса электризации при фрикционном взаимодействии полимерных, композиционных полимерных материалов и покрытий с хлопком-сырцом в зависимости от вида и природы полимеров и наполнителей // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Нормуродов А.А.Ў. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23600

Bozorboev Shukhrat Abdurakhimovich
Doctor of Philosophy (PhD) in Technical Sciences,
Senior Researcher
State Unitary Enterprise "Fan va Taraqqiyot,"
Tashkent State Technical University, Tashkent, Republic of Uzbekistan
Rakhimkulova Tulkynoy Mukhtarovna
PhD Doctoral Student
State Institution "Fan va Taraqqiyot,"
Tashkent State Technical University, Tashkent, Republic of Uzbekistan
Ergashev Nurbek Erkinovich
Applicant
at the State Institution "Fan va Tarakkiyot"
Tashkent State Technical University,
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Kholmatov Eldor Abdunazarovich
Applicant
State Institution "Fan va Tarakkiyot"
Tashkent State Technical University,
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В статье представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов электризации полимерных и композиционных полимерных материалов и покрытий при фрикционном взаимодействии с хлопком-сырцом в зависимости от вида и природы полимеров и наполнителей. Исследованы закономерности образования и утечки электростатических зарядов на поверхности покрытий на основе термореактивных полимеров ЭД-16, ФАЭД-20 и ФАЭИС-30, а также влияние степени сшивки макромолекул, содержания отвердителя и пластификатора на интенсивность электризации. Установлено, что характер электризации определяется природой полимерного связующего, электрофизическими свойствами наполнителей и их концентрацией в составе композиции. Показано, что введение электропроводящих наполнителей, таких как технический углерод, графит, железный порошок, алюминиевая и бронзовая пудра, способствует снижению поверхностной плотности электростатического заряда за счёт повышения электропроводности композиционных материалов и облегчения отвода зарядов. Выявлены особенности влияния минеральных, металлических и углеродсодержащих наполнителей на электрофизические и триботехнические свойства полимерных покрытий. Установленные закономерности могут быть использованы при разработке антифрикционных композиционных полимерных материалов с регулируемыми электростатическими свойствами для рабочих органов хлопкоперерабатывающих машин и механизмов. Практическая значимость работы заключается в возможности снижения накопления статического электричества, повышения износостойкости и долговечности покрытий, а также уменьшения пожароопасности технологических процессов переработки хлопка-сырца.

Abstract

This article presents the results of theoretical and experimental investigations into the electrification processes occurring during the frictional interaction of polymeric materials, polymer composites, and coatings with raw cotton, depending on the type and nature of the polymers and

fillers. The mechanisms governing the generation and dissipation of electrostatic charges on the surfaces of coatings based on thermosetting polymers ED-16, FAED-20, and FAEIS-30 are investigated, along with the effects of macromolecular crosslinking, hardener content, and plasticizer content on the intensity of electrification. It is established that the electrification behavior is determined by the nature of the polymer binder, the electrophysical properties of the fillers, and their concentration in the composite. The results demonstrate that the incorporation of electrically conductive fillers, such as carbon black, graphite, iron powder, aluminum powder, and bronze powder, helps reduce the surface charge density by increasing the electrical conductivity of composite materials and facilitating charge dissipation. The effects of mineral, metallic, and carbon-based fillers on the electrophysical and tribological properties of polymer coatings are identified. The established relationships can be used in the development of antifriction polymer composites with controllable electrostatic properties for the working components of cotton-processing machines and mechanisms. The practical significance of this study lies in its potential to reduce static electricity accumulation, improve the wear resistance and service life of coatings, and mitigate fire hazards during raw cotton processing.

Ключевые слова: электризация, трибоэлектрический эффект, фрикционное взаимодействие, хлопок-сырец, электростатический заряд, электропроводящие наполнители, электрофизические свойства.

Keywords: electrification, triboelectric effect, frictional interaction, raw cotton, electrostatic charge, electrically conductive fillers, electrophysical properties.

Введение

Анализ проведенных теоретических и экспериментальных исследований показал, что процессы взаимодействия композиционных полимерных материалов и покрытий из них с хлопком-сырцом имеет сложную природу. При этом специфика контактирующих тел (полимер-хлопок-сырец) обуславливается процессами электризации воздействующих на поверхностные слои полимерных покрытий и тем самым влияющих на их электрофизические и физико-механические свойства. Кроме того, показано, что уменьшение электризации полимерных покрытий способствует улучшению их антифрикционных свойств. Эти результаты позволяют направленно изменять и регулировать антифрикционные свойства полимерных покрытий, работающих при взаимодействии с хлопком-сырцом.

Так, возникновение электростатического заряда в контактной зоне полимер-хлопок отрицательно влияет на коэффициент трения, износостойкости и долговечности полимерных покрытий, а также усиливают пожароопастность в процессе переработки хлопка-сырца.

Устранение этих явлений, возможно, будет путем глубокого изучения и целенаправленного регулирования электрофизических и прочностных свойств материала и созданием эффективных составов антифрикционных композиционных материалов, обеспечивающие устранение возникновения и накапливания электростатического заряда в контектной зоне и низкие коэффициент трения, изнашивания и увеличения долговечности покрытий на их основе применяемых в деталях рабочих органов хлопкоперерабатывающих машин.

Как было выше отмечено, возникновение электростатического заряда в контактной зоне полимер-хлопок отрицательно влияет на коэффициент трения, износостойкость и долговечность полимерных покрытий. В этом плане с целью выбора наиболее активных полимерных материалов для использования в качестве покрытий, ранее нами был проведен анализ условий работы машин и механизмов хлопкозаводов, так как в конечном итоге эффективность применения полимерных покрытий зависит от конструкции и назначения машин, материала, условий эксплуатации и т.п. Как отмечено в работах [8; с.134-142; 6; с. 16-17; 1; с.17-19; 7; с.32] машины и механизмы, применяемые для переработки хлопка-сырца, имеют конструктивные, технологические и целый ряд специфических недостатков, влияющих на природные свойства хлопка-сырца, и которые сводятся к следующему:

- повреждению хлопковых волокон и семян, возникновению шума и пожароопасности;
- высокий коэффициент трения;
- острые кромки заусенцев, шероховатость и субмикронеровности;
- повышенное пожараопастность, возникающих при ударение рабочих органов машин с твердыми включениями, находящимися в хлопке-сырце.

Как было сказано ранее, применение полимерных покрытий в рабочих органах машин и механизмов способствовало устранению или сведению до минимума целого ряда указанных недостатков. При этом покрытия будут работать в условиях статических и динамических нагрузок, а также вибрации, под воздействием климатических факторов и агрессивных сред.

В соответствие с вышеизложенным выбор полимерных материалов в качестве основы антифрикционных полимерных композиций осуществлялся последующим критериям:

- технологичность и экономичность используемого полимерного материала, методики и аппаратуры для нанесения покрытий на поверхности рабочих органов машин;
- комплекс необходимых для условий эксплуатации электрофизических и физико-механических свойств, сохраняющих стабильность при температурах от -20 до +80°С и влажности окружающей среды до 80 %, а также при воздействии климатических факторов и агрессивных сред;
- при работе на трение должны обладать высокими антифрикционными свойствами в диапазоне скоростей до 8м/с (иногда до 25 м/с) и нагрузок от 0,005 до 0,05 МПа и сравнительно низкой электризуемостью.

Были исследованы процессы трибоэлектризации при фрикционном взаимодействии термореактивных эпоксидных полимеров и его производных при трении с хлопком-сырцом.

Наиболее полно удовлетворяют общим и специальным требованиям и условиям эксплуатации при трении с хлопком-сырцом такие полимеры как ЭД-16, ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 которые и были выбраны в качестве основы для создания антифрикционных полимерных материалов функционального назначения. Эти полимерные материалы обладают наилучшими антифрикционными свойствами, высокой теплостойкостью, технологичностью получения покрытий.

В качестве полимерной матрицы исследованы термореактивные связующие: эпоксидно-диановая смола **ЭД-16**, фурано-эпоксидный олигомер ФАЭД-20 и фурано-эпоксид-сланцевый олигомер ФАЭИС-30. В качестве отвердителя использовался полиэтиленполиамин (ПЭПА)

в количестве: 12 мас.ч. на 100 мас.ч. для ЭД-16; 25–30 мас.ч. для ФАЭД-20 и ФАЭИС-30. В качестве пластификатора применялся дибутилфталат (ДБФ) с варьированием концентрации от 5 до 25 мас.ч.

Для регулирования электрофизических и триботехнических свойств вводились наполнители со следующими дисперсными характеристиками (средний размер частиц ($d_ч$):

Минеральные: каолин ($d_ч$= 2 – 5 мкм), тальк ($d_ч$ = 5 – 10 мкм);

Углеродсодержащие: графит серебристый ($d_ч$ = 10 – 15 мкм), технический углерод / сажа ($d_ч$ 30 – 50 нм);

Металлические и оксиды: железный порошок ПЖВ ($d_ч$ = 40 – 60 мкм), алюминиевая пудра ПАП-2 (чешуйчатая, толщина частиц 0,25 – 0,5 мкм), бронзовая мука ($d_ч$ = 15 – 25 мкм), закись меди CuO и оксид железа Fe_2O_3 ($d_ч$ = 1 – 3 мкм).

Режимы смешения, нанесения и отверждения покрытий

Смешение компонентов осуществлялось в лопастном микросмесителе со скоростью вращения ротора 600 об/мин при температуре 40–50 °C в течение 15–20 минут для достижения однородного распределения дисперсной фазы и снижения вязкости композиции. Отвердитель ПЭПА вводился непосредственно перед нанесением.

В качестве подложки использовались пластины и рабочие элементы из конструкционной стали марки Ст3. Подготовка поверхности подложки включала механическую очистку (пескоструйная обработка до шероховатости Ra = 2,5 – 3,2 мкм), обезжиривание органическими растворителями (ацетон, толуол) и последующую сушку. Композиции наносились методом пневматического распыления и поливом. Толщина сформированных покрытий составляла строго 250±20 мкм, контроль толщины выполнялся магнитным толщиномером.

Режим ступенчатого отверждения покрытий: выдержка при комнатной температуре (20±2 °C) — 24 часа, последующая термообработка при температуре 80 °C в течение 4 часов и окончательная стабилизация при 120 °C в течение 2 часов для достижения максимальной степени сшивки макромолекул.

Характеристики контртела (хлопка-сырца) и условия кондиционирования

Во фрикционном контакте использовался хлопок-сырец селекционного сорта С-6524 (промышленный сорт 1, ручной сбор). Перед проведением испытаний волокнистая масса подвергалась принудительной сушке и последующему кондиционированию по ГОСТ 6433.1 – 71 в эксикаторах над насыщенными растворами солей для фиксации стандартной влажности хлопка-сырца на уровне 8,0±0,5 %.

Параметры испытательной среды и трибометрии

Триботехнические испытания и замеры электризации выполнялись на дисковом трибометре (конфигурация «диск — волокнистая масса») в соответствии с O‘z DSt 3330:2018. Параметры испытательной среды в лабораторной камере поддерживались стационарными: температура воздуха 20±2 °C, относительная влажность 65±5 %. Режимы трения: скорость скольжения V = 6 м/с, удельное давление P = 0,05 МПа.

Измерения электрических параметров изоляции и поверхностного сопротивления проводились на постоянном напряжении по ГОСТ 6433.2 – 71 с использованием тераомметра Е6-13 и электрометра В7-30.

Определение величины заряда статического электричества

Образующиеся заряды в зоне трения снимали при помощи электродов. Величины зарядов статического электричества определяли, измеряя величину потенциала при помощи вольтметра С-50 по методике, описанной в работе [13; с.15]. Для предотвращения утечки зарядов, образовавшихся в результате трения, отдельные детали и узлы трибометра изолировали фторопластовыми прокладками. Образующиеся заряды в зоне трения снимали при помощи электродов. Величины зарядов статического электричества и их плотности определяли, измеряя величину потенциала при помощи вольтметра С-50.

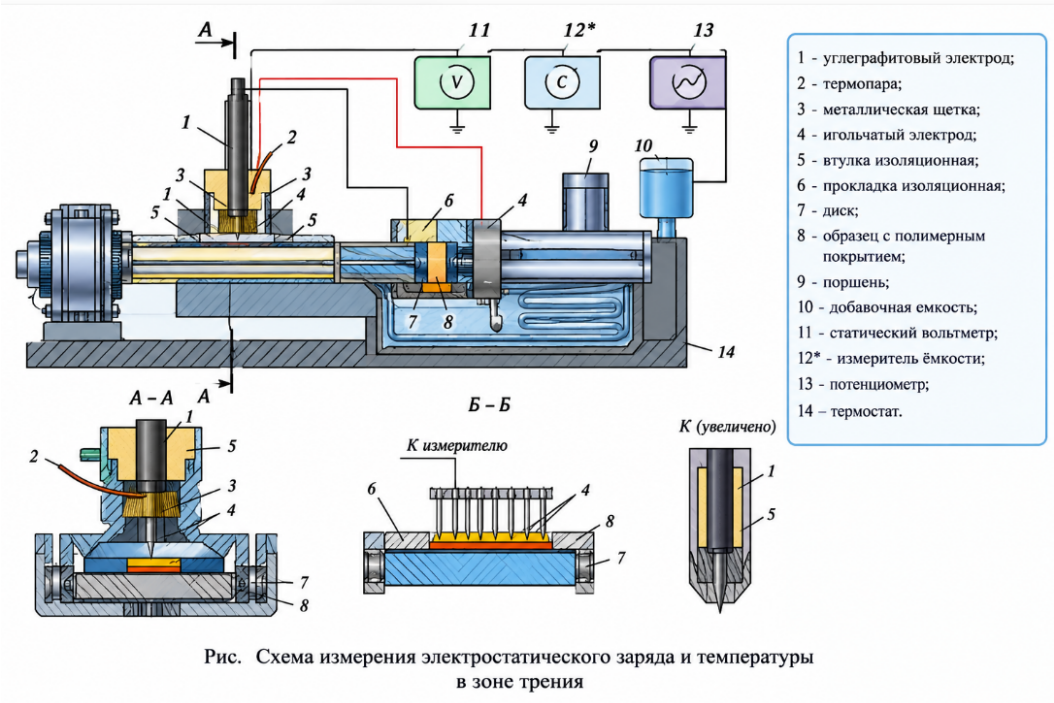


Рис. Схема измерения электростатического заряда и температуры в зоне трения

Рисунок 1. Схема измерения электрического заряда и температуры в зоне трения

В первом варианте (рис. 1) съём зарядов производился с помощью металлической щетки, на концах которой крепили гибкие проволочки. При таком измерении зарядов появляется дополнительная погрешность из-за электризации самой щетки.

Нами применен датчик, устанавливаемый на определенном расстоянии от заряженной поверхности полимерного покрытия, но позволяющий более просто получать надежные данные. Датчик представляет собой металлическую пластинку с игольчатыми электродами,

погруженными в хлопок. Величина заряда измеряется статическим вольтметром, которая передается с заряженной поверхности на датчик по электростатической индукции. При этом опыты показали, что точность измерений величин зарядов при контактном и бесконтактном съеме зарядов практически одинакова. Датчик изолируется от корпуса установки фторопластовыми прокладками. Изоляция зоны трения с использованием высоких диэлектрических свойств фторопласта повышает точность измерения электростатических зарядов. Этому способствует также добавочная ёмкость в измерительной цепи.

Образующиеся заряды в зоне трения снимали при помощи электродов. Величины зарядов статического электричества определяли, измеряя величину потенциала при помощи вольтметра С-50 по методике, описанной в работе [13; с.15]. Для предотвращения утечки зарядов, образовавшихся в результате трения, отдельные детали и узлы трибометра изолировали фторопластовыми прокладками. Образующиеся заряды в зоне трения снимали при помощи электродов. Величины зарядов статического электричества и их плотности определяли, измеряя величину потенциала при помощи вольтметра С-50.

В первом варианте (рис. 1) съём зарядов производился с помощью металлической щетки, на концах которой крепили гибкие проволочки. При таком измерении зарядов появляется дополнительная погрешность из-за электризации самой щетки.

Нами применен датчик, устанавливаемый на определенном расстоянии от заряженной поверхности полимерного покрытия, но позволяющий более просто получать надежные данные. Датчик представляет собой металлическую пластинку с игольчатыми электродами, погруженными в хлопок. Величина заряда измеряется статическим вольтметром, которая передается с заряженной поверхности на датчик по электростатической индукции. При этом опыты показали, что точность измерений величин зарядов при контактном и бесконтактном съеме зарядов практически одинакова. Датчик изолируется от корпуса установки фторопластовыми прокладками. Изоляция зоны трения с использованием высоких диэлектрических свойств фторопласта повышает точность измерения электростатических зарядов. Этому способствует также добавочная ёмкость в измерительной цепи.

По известной ёмкости системы и потенциалу, измеренному статическим вольтметром, величину заряда определяли по формуле

$$Q = U(C_{ВК} + C_{с} + C_{дк}), \quad (1)$$

где $C_{вк}$ - ёмкость статического вольтметра;

$C_{с}$ - ёмкость трущейся пары;

$C_{дк}$ - ёмкость добавочного конденсатора;

U - напряжение, измеренное статическим вольтметром.

Максимальный заряд статического электричества достигается при разном времени трения с хлопком-сырцом. В результате исследования кинетика образования зарядов статического электричества установлено, что время образования максимального заряда для всех полимерных материалов колеблется от 20 до 145 с. Поэтому во всех экспериментах величину зарядов статического электричества измеряли через 180 с после начала опыта.

Принцип измерения и условия заземления

Максимальный заряд статического электричества достигается при разном времени трения с хлопком-сырцом. В результате исследования кинетика образования зарядов статического электричества установлено, что время образования максимального заряда для всех полимерных материалов колеблется от 20 до 145 с. Поэтому во всех экспериментах величину зарядов статического электричества измеряли через 180 с после начала опыта.

Определение поверхностной плотности электростатического заряда ($q_з$) осуществлялось бесконтактным методом электростатической индукции. Конструкция установки включала подвижный приводной диск с испытуемым покрытием, прижимное устройство с кассетой для хлопка-сырца и плоский металлический датчик-зонд (электрод-приемник), подключенный к электрометру.

Для исключения внешних наводок все металлические узлы трибометра и экранирующие оплетки кабелей были стационарно заземлены на общий лабораторный контур. Перед каждым циклом трения остаточный заряд полностью снимался заземленной медной пластиной. Временной регламент эксперимента строго контролировался: время между прекращением трения (остановом диска) и началом замера плотности остаточного заряда составляло строго 2±0,5 секунды.

Для качественной оценки процессов электризации полимерных покрытий были выполнены исследования кинетики электризации, которые показали, что наиболее быстро и больше электризуются полярные фурано-эпоксид-сланцевые и фурано-эпоксидные олигомеры (табл.1).

Таблица 1. Зависимость скорости образования и утечки поверхностной плотности заряда полимерных покрытий при их различном времени взаимодействие с хлопком-сырцом со скоростью скольжения V = 6м/с и удельным давлением P = 0,05 Мпа

$\tau_{кв}$ композиционных полимеров с хлопком-сырцом	**Вид полимерного материала**								
	ЭД-16			**ФАЭД-20**			**ФАЭИС-30**		
	$V_{об.з}$, кс	**$q_з$, $q\cdot10^6$ Кл/м^2**	**$V_{ут\cdot з}$, $q\cdot10^6$ Кл/м^2**	**$V_{об.з}$, кс**	**$q_з$, $q\cdot10^6$ Кл/м^2**	**$V_{ут\cdot з}$, $q\cdot10^6$ Кл/м^2**	**$V_{об.з}$, кс**	**$q_з$, $q\cdot10^6$ Кл/м^2**	**$V_{ут\cdot з}$, $q\cdot10^6$ Кл/м^2**
0,04	1,2	35	52	1,2	70	64	1,2	75	69
0,08	2,4	42	45	2,4	75	50	2,4	78	62
0,12	3,6	43	32	3,6	76	42	3,6	79	49
0,16	4,8	43	22	4,8	76	32	4,8	80	46
0,20	6,0	46	18	6,0	78	29	6,0	82	38

Для качественной оценки процессов электризации полимерных покрытий были выполнены исследования кинетики электризации, которые показали, что наиболее быстро и больше электризуются полярные фурано-эпоксид-сланцевые и фурано-эпоксидные олигомеры (табл.1).

Примечание: $\tau_{кв}$-время контактного взаимодействия, τ кс;

$V_{об.з}$-скорость образования заряда, τ кс;

$q_з$-плотность образованного заряда, $q \cdot 10^6$ Кл/м^2

$V_{ут.\ з}$- скорость утечки образующихся заряда, $q \cdot 10^6$ Кл/м^2

Экспериментально доказано, что полярные фурано-эпоксидные (ФАЭД-20) и фурано-эпоксид-сланцевые (ФАЭИС-30) покрытия обладают более высокой начальной скоростью электризации (плотность образованного заряда $q_з$ = 70 – $75 \cdot 10^6$ Кл/м² уже при времени контактного взаимодействия t = 0,04 кс) по сравнению с базовым эпоксидным олигомером ЭД-16 ($q_з$ = $35 \cdot 10^6$ Кл/м²). При этом процессы релаксации (утечки) заряда протекают медленно: даже через длительное время релаксации (6,0 кс) плотность остаточного заряда на покрытиях ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 удерживается на высоком уровне (29 – $38 \cdot 10^6$ Кл/м²), что подтверждает необходимость их обязательного модифицирования электропроводящими наполнителями.

При этом, отмечено, что степень электризации полимерных покрытий определяется как скоростью образования, так и скоростью утечки зарядов и зависит от природы полимера.

Установлено, что после прекращения фрикционного взаимодействия полимерных покрытий с хлопком-сырцом, заряды длительное время сохраняются на поверхности покрытий (табл. 1).

При этом, отмечено, что степень электризации полимерных покрытий определяется как скоростью образования, так и скоростью утечки зарядов и зависит от природы полимера.

Установлено, что после прекращения фрикционного взаимодействия полимерных покрытий с хлопком-сырцом, заряды длительное время сохраняются на поверхности покрытий (табл. 1).

Исследования процессов электризации показали, что под действием температуры в зоне трения полимерные покрытия на основе ЭД-16, ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 незначительно изменяют электропроводность с увеличением температуры в контактной зоне полимер-хлопок.

Такой характер электропроводности от температуры определяет процессы установления равновесного состояния между образованием и утечкой электростатических зарядов.

Показано, что объяснить зависимость электризации от вида и природы полимерных покрытий только с точки зрения современной теории донорно-акцепторного взаимодействия не представляется возможным, так как в стабильном режиме трения, полимерные покрытия всегда приобретали положительный знак зарядов, а хлопок-сырец – отрицательный знак. При этом выявлена зависимость электризации от степени «сшивки” для термореактивных полимеров.

С увеличением степени сшивки макромолекул термореактивных полимеров при взаимодействии с хлопком-сырцом возрастает образование электризации в контактной зоне трущихся пар.

Возрастание электризации при увеличении содержания отвердителя ПЭПА до 25 – 30 мас.ч. у ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 и до 12 мас.ч. у ЭД-16 связано с возрастанием степени структурирования и сшивки макромолекул и, соответственно, уменьшением электропроводности и возрастанием микротвердости. При этом уменьшается утечка зарядов и изменяется характер контактного взаимодействия полимерных покрытий с хлопком-

сырцом. Дальнейшее увеличение содержания ПЭПА приводит к снижению поверхностной плотности электростатических зарядов, что объясняется пластифицирующим воздействием избыточного количества отвердителя на полимерную систему, в результате чего увеличивается гибкость полимерной цепи и, соответственно, электропроводность.

Возрастание электризации при увеличении содержания отвердителя ПЭПА до 25 – 30 мас.ч. у ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 и до 12 мас.ч. у ЭД-16 связано с возрастанием степени структурирования и сшивки макромолекул и, соответственно, уменьшением электропроводности и возрастанием микротвердости. При этом уменьшается утечка зарядов и изменяется характер контактного взаимодействия полимерных покрытий с хлопком-сырцом. Дальнейшее увеличение содержания ПЭПА приводит к снижению поверхностной плотности электростатических зарядов, что объясняется пластифицирующим воздействием избыточного количества отвердителя на полимерную систему, в результате чего увеличивается гибкость полимерной цепи и, соответственно, электропроводность.

При увеличении концентрации пластификатора ДБФ в составе ЭД-16, ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 электризация вначале уменьшается и при содержании 10 – 15 мас.ч. возрастает. Дальнейшее увеличение содержания ДБФ в покрытиях снижает их электризацию. Такую зависимость электризации от содержания ДБФ можно объяснить эффектом «антипластификации», в результате которой при малых концентрациях ДБФ за счет более плотной упаковки цепей и физического «сшивания» полимера уменьшается электропроводность и возрастает электризация покрытий. Увеличение концентрации ДБФ более 15 мас.ч. способствует усилению подвижности цепей макромолекул полимера и, соответственно, к возрастанию утечки зарядов за счет увеличения электропроводности.

Зависимость поверхностной плотности электростатических зарядов от технологических параметров полимерной матрицы (содержания ПЭПА и ДБФ) имеет строгое физико-химическое обоснование. Экспериментально зафиксированный рост электризации при увеличении содержания отвердителя ПЭПА до критических значений (25–30 мас.ч. для ФАЭД-20/ФАЭИС-30 и 12 мас.ч. для ЭД-16) обусловлен прямой корреляцией между ростом микротвердости и падением электропроводности системы из-за высокой плотности сшивания макромолекул. Падение электризации при избытке ПЭПА доказано эффектом химической пластификации. Аналогично, экстремальный характер кривой при введении пластификатора ДБФ (рост заряда в диапазоне 10–15 мас.ч.) экспериментально подтвержден явлением антипластификации**,** приводящим к аномально плотной упаковке полимерных цепей, росту жесткости и снижению путей утечки электростатического заряда.

Исследования показали, что при фрикционном взаимодействии полимерных покрытий с хлопком-сырцом образующиеся электростатические заряды способствуют активизации поверхностных слоев покрытий и хлопка-сырца и их существенным структурным и физико-химическим изменениям. Об увеличении активности поверхностных слоев покрытий в реакциях термоокисления кислородом воздуха, а также об изменении кристалличности свидетельствуют соответствующие экзотермические пики на термограммах, а также данные рентгеноструктурного анализа и изменения в интенсивности полос поглощения в ИК-спектрах полимерных покрытий, снятых для исходных образцов и после фрикционного взаимодействия с хлопком-сырцом [2; с.235-243].

Показано, что чем выше активность полимера в реакциях термоокисления, на что указывает увеличение оптической плотности полос поглощения, связанных с колебаниями кислородсодержащих групп в ИК-спектрах полимеров, тем меньше полимер электризуется. Отмечены также структурные изменения и в хлопковом волокне, причем электризация активизирует процессы химического взаимодействия продуктов деструкции с хлопковой целлюлозой, о чем свидетельствуют ИК-спектры хлопкового волокна [2; с.235-243].

Показано, что чем выше активность полимера в реакциях термоокисления, на что указывает увеличение оптической плотности полос поглощения, связанных с колебаниями кислородсодержащих групп в ИК-спектрах полимеров, тем меньше полимер электризуется. Отмечены также структурные изменения и в хлопковом волокне, причем электризация активизирует процессы химического взаимодействия продуктов деструкции с хлопковой целлюлозой, о чем свидетельствуют ИК-спектры хлопкового волокна [2; с.235-243].

Прямым доказательством протекания механохимических процессов в зоне фрикционного контакта служат данные ИК-спектроскопии, термогравиметрии и рентгеноструктурного анализа (РСА) исходных и отработанных образцов. На термограммах зафиксированы четкие экзотермические пики, свидетельствующие об интенсификации реакций термоокисления поверхностных слоев покрытий кислородом воздуха под воздействием генерируемого статического электричества. Спектральный анализ показал рост оптической плотности полос поглощения кислородсодержащих функциональных групп в полимерах. В самом хлопковом волокне ИК-спектры зафиксировали появление новых связей, подтверждающих химическое взаимодействие продуктов деструкции полимера с макромолекулами хлопковой целлюлозой**,** активированное трибоэлектрическим полем.

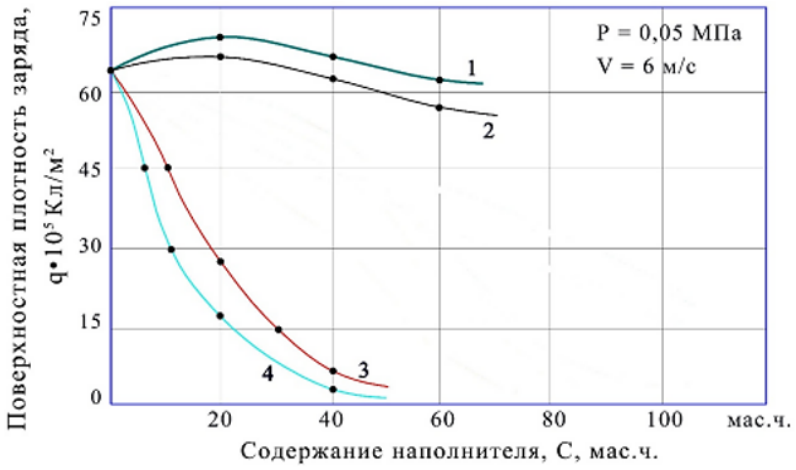
Таким образом, результаты исследований позволили установить основные закономерности электризации полимерных покрытий при трении скольжения с хлопком сырцом в зависимости от вида и природы термореактивных материалов. Как видно из полученных результатов термореактивные полимеры при трении с хлопком-сырцом наиболее быстро 0,04 – 0,06 кс электризуются и значение плотности заряда находится в пределах 64 – 75 $\sigma \cdot 10^6$ Кл/м^2, а полимерных покрытий с хлопком-сырцом электрические заряды длительное время сохраняются на поверхности покрытий. Так, у покрытий из ФАЭД-20, ЭД-16 и ФАЭИС 30 плотность заряда после 6,0 кс находится в пределах 28 – 10 $\sigma \cdot 10^6$ Кл/м^2.

Одним из путей регулирования электрофизических, электростатических и антифрикционных свойств полимерных материалов является введение в их состав электропроводящих и полупроводниковых органоминеральных наполнителей. Кроме того, введение органоминеральных наполнителей позволяет улучшить триботехнические свойства полимерных покрытий за счет оптимального регулирования их физико-механических свойств – микротвердости, адгезии, прочности, температуры стеклования и др.

Далее было исследовано влияние электрофизических свойств и концентрации выбранных наполнителей на процесс электризации полимерных покрытий с хлопком-сырцом.

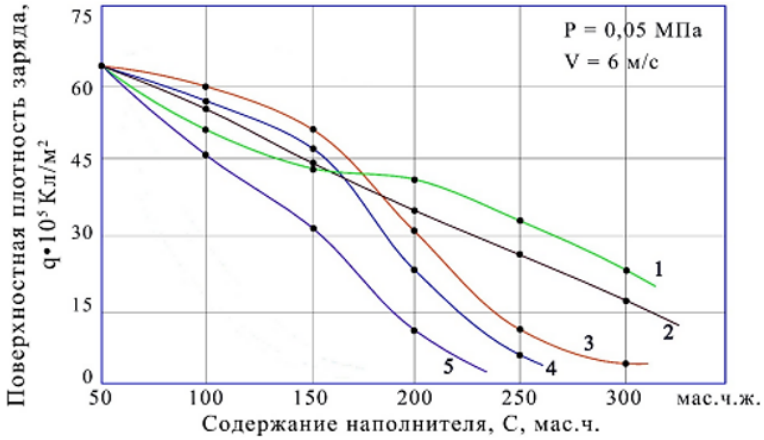
Результаты исследований показали, что при введении наполнителей, независимо от вида полимера и наполнителя, положительная полярность покрытия и отрицательная хлопка-сырца, сохранялись в установившемся режиме трения скольжения. На рис. 1 – 3 пред

ставлены результаты экспериментальных исследований по влиянию содержания наполнителей минеральных (а) и металлических (б) на электризацию выбранных полимерных материалов при трении скольжения с хлопком-сырцом. Как видно, введение минерального наполнителя каолина несколько увеличивают электризацию покрытий при содержании 20 – 40 мас.ч. у ЭД-16, ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 и при более высоких концентрациях лишь незначительно уменьшает поверхностью плотность зарядов. Такое влияние каолина на электризацию полимерных покрытий, очевидно, связано с их достаточно высокими электроизоляционными свойствами . Содержание каолина до 20 – 40 мас.ч. в составе ЭД-16, ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 не изменяет электрофизических свойств покрытий и в то же время влияет на физико-механические свойства (рис.1, 2, 3,), что и вызывает некоторый рост поверхностной плотности зарядов. Уменьшение электризации покрытий при дальнейшем увеличении содержания каолина очевидно связано с уменьшением $\rho\rho_v$ и $\rho\rho_s$ композиции, так как электрофизические свойства самих наполнителей ниже, чем связующего.



а

1-каолин; 2-тальк; 3-графит; 4-сажа

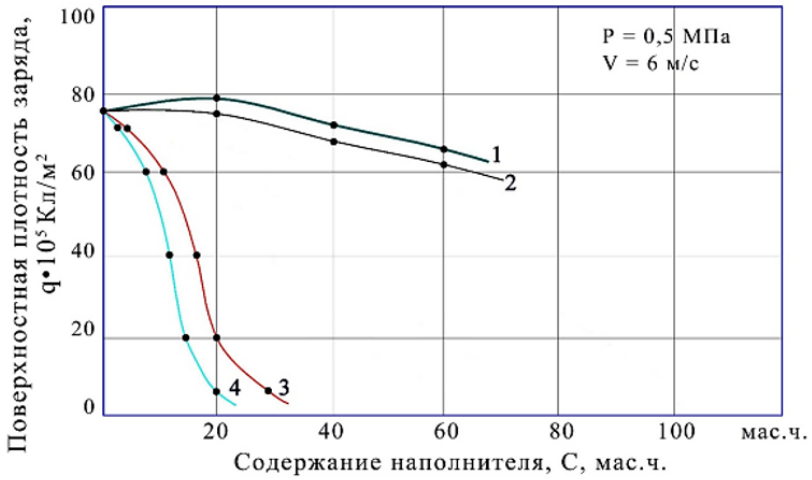


б

1-окись меди; 2-окись железа; 3-железный порошок; 4-алюминиевая пудра;

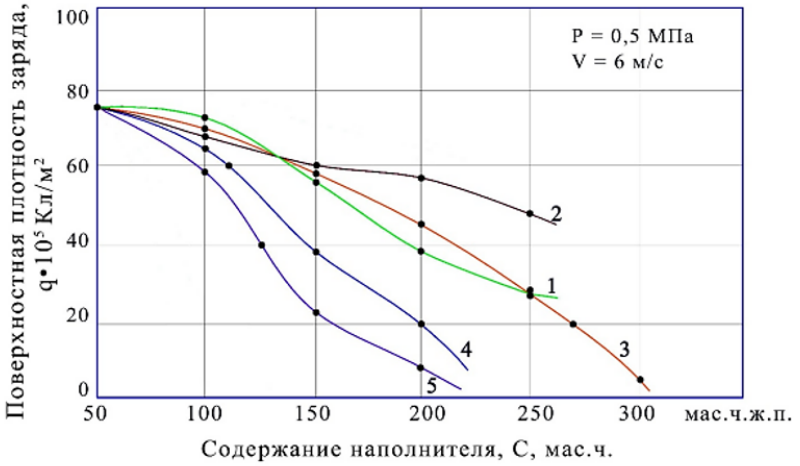
5-бронзовая мука

Рисунок 2. Зависимость поверхностной плотности заряда композиционных полимерных покрытий на основе ЭД-16 от вида и содержания минеральных (а) и металлических (б) наполнителей



а

1-каолин; 2-тальк; 3-графит; 4-сажа

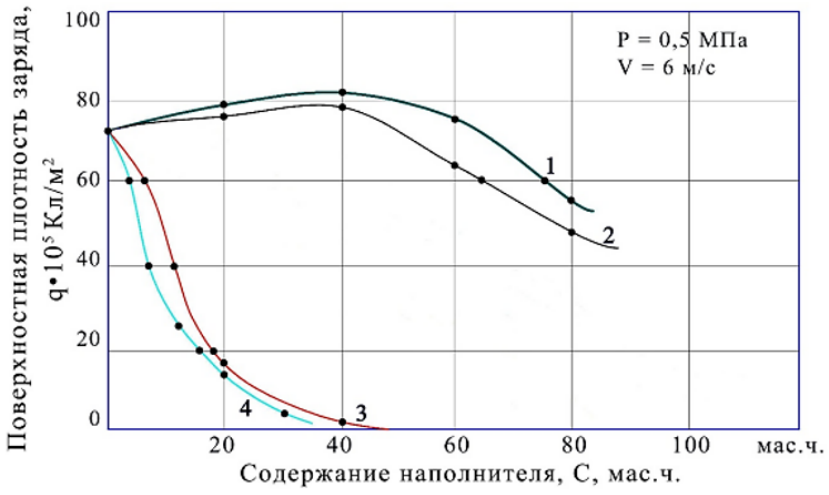


б

1-окись меди; 2-окись железа; 3-железный порошок; 4-алюминиевая пудра;

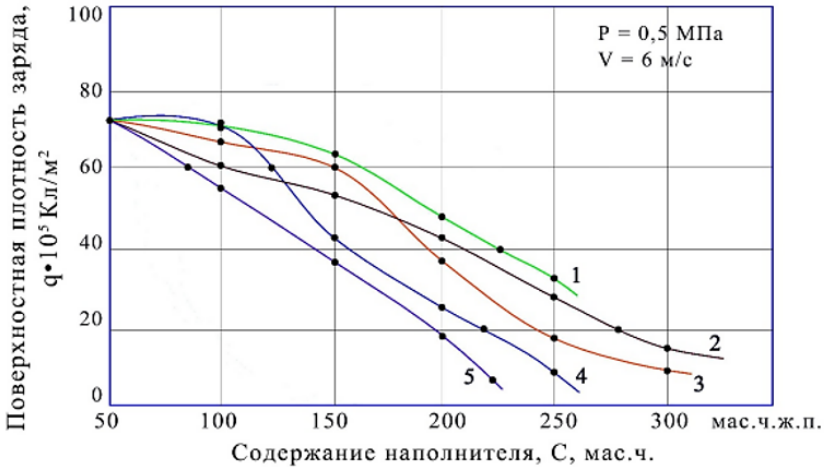
5-бронзовая мука

Рисунок 3. Зависимость поверхностной плотности заряда полимерных покрытий на основе ФАЭИС-30 от вида и содержания минеральных (а) и металлических (б) наполнителей



а

1-каолин; 2-тальк; 3-графит; 4-сажа



б

1-окись меди; 2-окись железа; 3-железный порошок; 4-алюминиевая пудра;

5-бронзовая мука

Рисунок 4. Зависимость поверхностной плотности заряда полимерных покрытий на основе ФАЭД-20 от вида и содержания минеральных (а) и металлических (б) наполнителей

При введении каолина в состав эпоксидных и фурано-эпоксидных полимеров, в процессе термообработки образуются продукты термодеструкции, которые абсорбируясь на поверхности каолина, способствуют образованию пространственной сетки [3; с.129-130], что в значительной мере влияет на электропроводность композиции и соответственно электризацию покрытий. Наибольшее снижение поверхностной плотности зарядов, как и следовало ожидать, наблюдается при введении таких электропроводящих наполнителей, как железный порошок, алюминиевая и бронзовая пудра, сажа и графит.

Причем наиболее эффективно снижают электризацию полимерных покрытий сажа и графит, что обусловлено ее высокой электропроводностью вследствие чего удельное поверхностное и удельное объемное сопротивления полимерных покрытий резко снижается при 10 мас.ч. сажи у ФАЭД-20, ФАЭИС-30 и ЭД-16.

При этом увеличивается пути утечки зарядов и, соответственно, снижается электризация покрытий. Высокая электропроводность полимерных покрытий при введении электропроводящих наполнителей обусловлено образованием цепочечной структуры в объеме полимера. [9;]

При этом общий характер уменьшения поверхностной плотности зарядов с увеличением содержания электропроводящих наполнителей, очевидно, связан с тем, что в трехкомпонентной системе хлопок-сырец-полимер-наполнитель, участки контактирования хлопка-сырца с наполнителем увеличиваются, вследствие чего образующиеся заряды на поверхности полимерного покрытия отводятся по цепочке, образованной электропроводящим наполнителем. Более эффективное воздействие сажи по сравнению с графитом на процессы электризации полимерных покрытий, несмотря на ее большее удельное электрическое сопротивление, связано с взаимодействием полимеров с активной поверхностью частиц сажи вследствие наличия на их поверхности функциональных групп, содержащих двойные связи [9;] и способных образовывать химические связи, особенно с полярными полимерами.

Результаты исследований показали, что сажа эффективнее снижает электризацию ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 по сравнению с ЭД-16. Это обусловлено, очевидно, лучшей их совместимостью сажи с ФАЭД-20 и ФАЭИС-30, так как эти смолы менее вязкие и распределение частиц наполнителя происходит более равномерное объему покрытия.

Введение алюминиевой пудры в состав полимерных материалов, несмотря на снижение электризации полимерных покрытий, приводит к ухудшению антифрикционных свойств покрытий. При этом ухудшение физико-механических свойств обусловлено способностью алюминиевой пудры комковаться и образовывать микродефекты. В то же время меньшая способность алюминиевой пудры снижать электризацию по сравнению с сажей связана с ее более высоким электрическим сопротивлением и меньшей активностью взаимодействия с полимерной матрицей.

Окись меди по своим электрофизическим свойствам является [4; с.45-46] полупроводником и поэтому введение ее в состав полимерного покрытия приводило к небольшому снижению электризации и по способности воздействия на электростатическое свойства покрытие занимает промежуточное положение между каолином и алюминиевой пудрой.

Для корректной интерпретации трибоэлектрических процессов необходимо разграничивать электрофизические свойства исходных фаз и готового композита. Исходный хлопок-сырец и чистые термореактивные матрицы (ЭД-16, ФАЭД-20, ФАЭИС-30) являются выраженными диэлектриками с удельным объемным сопротивлением $p_v > 10^{12}$ Ом·м. Вводимые наполнители разделены по своей природе на диэлектрики (каолин, тальк), полупроводники (оксиды металлов) и проводники (металлы, технический углерод, графит).

Экспериментально установлено, что оценка трибоэлектризации только по массовой концентрации (С, мас.ч.) искажает физическую картину. Из-за существенного различия в плотности исходных порошков (для сажи $\gamma \approx 1{,}8$ г/см³, для железного порошка $\gamma \approx 7{,}8$ г/см³) при одинаковом массовом содержании их объемная доля (φ, % об.) в готовом композите различается более чем в 4 раза.

Резкое падение поверхностной плотности зарядов $q_з$ при введении всего 10 мас.ч. сажи (или графита) объясняется достижением порога перколяции (критической объемной доли $ф_{крит}$), при котором наноразмерные частицы технического углерода (30-50 нм) с высоким распределением формируют сплошную пространственную цепочечную сетку в объеме полимера. В то же время для железного порошка ПЖВ из-за его высокой плотности и крупного размера частиц (40-60 мкм) порог протекания ($ф_{крит}$) достигается лишь при высоких массовых наполнениях (более 150–200 мас.ч.), когда крупные глобулы железа соприкасаются друг с другом.

Дополнительным фактором выступает переходное контактное сопротивление на границе раздела «полимерное связующее – наполнитель». Высокая полярность фурано-эпоксидных олигомеров ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 способствует снижению потенциального барьера на границе с активной поверхностью сажи, содержащей кислородсодержащие функциональные группы. Это минимизирует контактное сопротивление между частицами наполнителя в готовом композите и облегчает мгновенный отвод наведенного хлопком статического заряда по сформированным проводящим каналам. Удельное поверхностное и удельное объемное сопротивления полимерных покрытий при этом резко снижаются.

Природа полимерных материалов также оказывает влияние на распределение частиц наполнителя в объеме покрытия [11-12]. Так, у менее вязких фурано-эпоксидных покрытий наблюдается более равномерное распределение частиц наполнителей, за исключением железного порошка. Это приводит к более значительному снижению электризации ФАЭД-20 и ФАЭИС-30 по сравнению с ЭД-16.

Заключение

Исследованы электрофизические свойства органоминеральных наполнителей для получения композиционных материалов. Установлено, что выбранные органоминеральные наполнители по своим электрофизическим свойствам вполне подходят для разработки из них антифрикционных композиционных полимерных материалов и покрытий на их основе, обладающих низким электростатическим зарядом.

Исследованы электрофизические свойства термореактивных полимеров ЭД-16, ФАЭД-20 и ФАЭИС-30, а также наполненных органоминеральными наполнителями композиций на их основе. Выявлены закономерности влияния органоминеральных наполнителей на электрофизические свойства композиций на основе ЭД-16, ФАЭД-20 и ФАЭИС-30. При этом минеральные неорганические наполнители повышают электроизоляционные свойства, а углеграфитовые, металлические и оксиды металлов улучшают электропроводность композиционных полимерных материалов и покрытий на их основе.

Изучены процессы электризации полимерных и композиционных полимерных материалов и покрытий на их основе при контактном взаимодействии с хлопком-сырцом в зависимости от вида и природы полимеров и органоминеральных наполнителей. Показано, что под действием температуры, возникающей в зоне трения, незначительно изменяется

теплопроводность композиций на основе ЭД-16, ФАЭД-20 и ФАЭИС-30. Установлены основные закономерности электризации композиционных полимерных покрытий при трении скольжения с хлопком-сырцом зависит от вида и природы полимеров.

Показано, что при введении наполнителей железного порошка, алюминиевой и бронзовой пудры, сажи и графита снижается электризация композиционных полимерных покрытий, что обусловлено их высокой электропроводностью, вследствие чего удельное поверхностное и удельное объемное сопротивления полимерных покрытий резко снижаются.

Разработаны оптимальные составы антифрикционных композиционных полимерных материалов и покрытий на их основе, позволяющих утечки образующихся электрических зарядов, предназначенных для нанесения их на поверхности рабочих органов хлопкоперерабатывающих машин и механизмов, а также исследованы их электрофизические и физико-механические свойства, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к материалам рабочих органов машин и механизмов, работающих в условиях контактного взаимодействия с хлопко-сырцом.

Список литературы

1. Амиров Г.А. Исследование влияния средств механизации и пневмотранспортных установок на качество волокна: Автореферат дис…. канд.тех. наук. – Ташкент, 1976. – 26 с.
2. Дехант И., Данц Р., Киммер В., Шмольке Р. Инфракрасная спектроскопия полимеров. – М.: Химия, 1976. – 472 с.
3. Джалилов Н.Х., Негматов С.С. и др. Электризация композиционных полимерных материалов на основе фурано-эпоксидных олигомеров при трении с хлопком-сырцом // Композиционные полимерные материалы и их применение в народном хозяйстве: Тез.докл. I Всесоюзн.конф. – 1983. – С. 129–130.
4. Джалилов Н.Х., Негматов С.С. и др. Исследование влияния электропроводящих наполнителей на трибоэлектрические процессы при взаимодействии полимерных покрытий с хлопком-сырцом // Механоэмиссия и механохимиия твердых тел: Тез. докл. YIII Всесоюзн. Симпозиума. – 1981. – С. 45–46.
5. Негматов С.С., Джумабаев А.Б., Джалилов Н.Х. Физико-химические процессы при фрикционном взаимодействии композиционных полимерных материалов с волокнистой массой // «Триботехника-87»: Сб.докл.конф. – 1987. – С. 159–166.
6. Раджапов У.Р. Исследование пневмотранспорта хлопковых семян в горизонтальном трубопроводе: Автореферат дис…. канд.тех наук. – Ташкент, 1974. – 23 с.
7. Тихомиров Г.А. Влияние влажности хлопка-сырца на процесс джинирования. Обзорная информация. – Ташкент: УзНИИНТИ, 1970. – 32 с.
8. Шполянский Д.М. Комплексная механизация уборки хлопка. – М.: Высшея школа, 1972. – 319 с.
9. Stauffer D., Aharony A. Introduction to Percolation Theory. 2nd ed. – London: Taylor & Francis, 1994.

10. Šutka A., Lapčinskis L., He D., Kim H., Berry J.D., Bai J., Knite M., Ellis A.V., Jeong C.K., Sherrell P.C. Engineering Polymer Interfaces: A Review toward Controlling Triboelectric Surface Charge // Advanced Materials Interfaces. – 2023. – T. 10, № 26. – Art. 2300323. – DOI: 10.1002/admi.202300323.
11. Živičnjak J., Rogale D. Applicable measurement systems for determining the amount of electrostatic charge generated on textile materials // Tekstil. – 2022. – T. 71, № 2. – P. 113–119.
12. Sharma S., Verma A., Rangappa S.M., Siengchin S., Ogata S. Recent progressive developments in conductive-fillers based polymer nanocomposites (CFPNC's) and conducting polymeric nanocomposites (CPNC's) for multifaceted sensing applications // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – T. 26. – P. 5921–5974. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.08.300.
13. Джалилов Н.Х. Исследование закономерностей процесса электризации полимерных покрытий при фрикционном взаимодействии с хлопком-сырцом: Автореф. дис. … канд. техн. наук.- Ташкент. – 1984. – 21 с.

References

1. Amirov G.A. [Study of the influence of mechanization means and pneumatic transport installations on fiber quality: Author's abstract of dissertation.. Candidate of Technical Sciences]. – Tashkent, 1976. – 26 s (In Russ.).
2. Dekhant I., Dants R., Kimmer V., Shmol'ke R. [Infrared spectroscopy of polymers]. – M.: Khimiya, 1976. – 472 s (In Russ.).
3. Dzhalilov N.Kh., Negmatov S.S. i dr. [Electrification of composite polymer materials based on furan-epoxy oligomers during friction with raw cotton] // Kompozitsionnye polimernye materialy i ikh primenenie v narodnom khozyajstve: Tez.dokl. I Vsesoyuzn.konf. – 1983. (In Russ.).
4. Dzhalilov N.Kh., Negmatov S.S. i dr. [Study of the influence of electrically conductive fillers on triboelectric processes during the interaction of polymer coatings with raw cotton] // Mekhanoemissiya i mekhanokhimiiya tverdykh tel: Tez. dokl. YIII Vsesoyuzn. Simpoziuma. – 1981. (In Russ.).
5. Negmatov S.S., Dzhumabaev A.B., Dzhalilov N.Kh. [Physicochemical processes during frictional interaction of composite polymer materials with fibrous mass] // «Tribotekhnika-87»: Sb.dokl.konf. – 1987. (In Russ.).
6. Radzhapov U.R. [Study of pneumatic transport of cotton seeds in a horizontal pipeline: Author's abstract of dissertation.. Candidate of Technical Sciences]. – Tashkent, 1974. – 23 s (In Russ.).
7. Tikhomirov G.A. [Effect of raw cotton moisture content on the ginning process. Review information]. – Tashkent: UzNIINTI, 1970. – 32 s (In Russ.).
8. Shpolyanskij D.M. [Comprehensive mechanization of cotton harvesting]. – M.: Vyssheya shkola, 1972. – 319 s (In Russ.).
9. Stauffer D., Aharony A. Introduction to Percolation Theory. 2nd ed. – London: Taylor & Francis, 1994.

10. Šutka A., Lapčinskis L., He D., Kim H., Berry J.D., Bai J., Knite M., Ellis A.V., Jeong C.K., Sherrell P.C. Engineering Polymer Interfaces: A Review toward Controlling Triboelectric Surface Charge // Advanced Materials Interfaces. – 2023. – Vol. 10, No. 26. – Art. 2300323. – DOI: 10.1002/admi.202300323.
11. Živičnjak J., Rogale D. Applicable measurement systems for determining the amount of electrostatic charge generated on textile materials // Tekstil. – 2022. – Vol. 71, No. 2. – P. 113–119.
12. Sharma S., Verma A., Rangappa S.M., Siengchin S., Ogata S. Recent progressive developments in conductive-fillers based polymer nanocomposites (CFPNC's) and conducting polymeric nanocomposites (CPNC's) for multifaceted sensing applications // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Vol. 26. – P. 5921–5974. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.08.300.
13. Dzhalilov N.Kh. Investigation of the Regularities of the Electrification of Polymer Coatings during Frictional Interaction with Raw Cotton: Abstract of the Dissertation for the Degree of Candidate of Technical Sciences. Tashkent. – 1984. – 21 P.