

**Безносова Влада Владиславна**

**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОРСА НА ВЫБОР  
РЕЖИМА ПРОЦЕССА ФЛОКИРОВАНИЯ И СТРУКТУРУ  
ВОРСОВОГО ПОКРОВА**

Специальность:

05.19.02 – Технология и первичная обработка текстильных материалов и сырья

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2019

Работа выполнена на кафедре технологии и проектирования текстильных изделий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»

Научный руководитель: **Иванов Олег Михайлович**,  
доктор технических наук, профессор  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», заведующий кафедрой технологии и проектирования текстильных изделий

Официальные оппоненты: **Борисова Елена Николаевна**,  
доктор технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургская государственная художественно-промышленная академия им. А.Л. Штиглица", начальник учебно-методического управления

**Рымкевич Ольга Васильевна**,  
кандидат технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации, доцент кафедры физики

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет»

Защита диссертации состоится «25» декабря 2019 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.236.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д.18, Круглый зал заседаний.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте «Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна» по адресу 191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 18, <https://www.sutd.ru/>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.236.01

Виктория Игоревна Вагнер

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время в нашей стране и за рубежом в разных отраслях промышленности, таких как: текстильная, автомобильная, мебельная, строительная, успешно применяется технология электрофлокирования. Электрофлокирование заключается в нанесении в электрическом поле заряженных и ориентированных силами поля волокон на клеевую поверхность. В результате получают нетканые материалы: искусственный велюр, замшу, бархат, обивочные и напольные покрытия, декоративные материалы с флокированными рисунками, технические полотна, флокированные нити и т.д., используя основу и два компонента: ворс и клей. Ворс представляет собой коротко нарезанные волокна заданной длины, он должен быть качественно окрашен, ровно нарезан, а также химически обработан для приобретения заряда, ориентации и движения в электрическом поле. Клей должен обладать адгезионными свойствами, а именно высокой адгезией к основе и синтетическим волокнам, а также электропроводностью, высокой способностью обеспечивать прочное закрепление ворса и эластичность материала.

Ранее в работах, посвященных технологии электрофлокирования, изучали физический механизм воздействия электрического поля на волокна, анализировали динамику изменения плотности ворсового покрова в процессе его нанесения в электрическом поле, рассматривали процесс зарядки волокон и их ориентацию. Все эти исследования носили общий характер и, до сих пор, остается много вопросов, решающим образом влияющих на совершенствование технологического процесса. В связи с этим необходимо дальнейшее развитие теоретических моделей осаждения заряженного ворса и его ориентации на материале с учетом геометрических и электрофизических свойств ворса, а также условий процесса зарядки и осаждения ворса на поверхность основы. Это позволит предложить определенные рекомендации по оптимизации технологического процесса электрофлокирования на производстве, то есть выбрать необходимые режимы флокирования с учетом свойств ворса.

Таким образом, для повышения экономической эффективности производства флокированных материалов и, как следствие, получения максимальной прибыли необходимо решение научной проблемы: изучить структуру ворсового покрова и исследовать взаимосвязь характеристик ворса и режима флокирования со скоростью протекания процесса и поверхностной плотностью ворсового покрова. В настоящей диссертационной работе предложен новый подход к анализу процесса формирования ворсового покрова. На основе четко сформулированных исходных положений, удалось разработать модель процесса зарядки ворса, позволившую рассчитывать максимально возможный заряд ворса разной длины; показана возможность определения оптимального межэлектродного расстояния при использовании разных критериев оптимизации технологического процесса.

**Цель работы** состоит в исследовании влияния электрофизических свойств ворса на выбор режима процесса флокирования и структуру ворсового покрова. Основными задачами исследования являются:

- экспериментальное исследование взаимосвязи параметров процесса флокирования со свойствами ворса;
- разработка новой модели формирования ворсового покрова;
- определение взаимосвязи технологических параметров со свойствами ворса;
- исследование формирования ворсового покрова с учетом изменения ориентации ворса на поверхности материала;
- оценка максимальной величины заряда;
- оценка основных факторов, влияющих на ориентацию ворса в процессе его движения между электродами;

- выбор оптимального расстояния между электродами на основе оценки ориентации ворса в процессе движения;
- оптимизация процесса электрофлокирования при выборе различных критериев для обеспечения качества выпускаемых изделий.

**Методы исследования.** В работе использованы теоретические и экспериментальные методы исследования на основе достижений в области технологии электрофлокирования. В теоретических расчетах применены методы дифференциального и интегрального исчисления. Моделирование и статистическая обработка экспериментальных данных проводилась с использованием приложения Microsoft Office Excel. При проведении экспериментальных исследований использованы современные методики и приборы.

**Научная новизна диссертационной работы** состоит в следующем:

- предложена методика оценки параметра ориентации ворса  $\sigma$  на основе распределения ворсинок по углам наклона к вертикали, путем изучения срезов флокированных образцов;
- выявлено изменение параметра ориентации  $\sigma$  по мере роста плотности ворсового покрова в процессе флокирования;
- предложена модель формирования ворсового покрова на основе использования понятия «постоянной времени»  $t$ ;
- на основе экспериментальных данных получена эмпирическая модель, связывающая сопротивление ворса с постоянной времени процесса, которая определяет скорость возрастания плотности ворсового покрова, т. е. производительность.
- построена модель зависимости плотности ворсового покрова от длительности флокирования с учетом динамики изменения ориентации ворса в процессе нанесения;
- предложена оценка максимального заряда ворса, на основе анализа распределения плотности заряда по длине в момент отрыва волокна от электрода;
- получена приближенная эмпирическая зависимость, связывающая максимальный заряд со свойствами ворса;
- проведен анализ ориентации ворса в процессе движения между электродами с учетом влияния электростатического и аэродинамического моментов.

**Практическая значимость работы** заключается в следующем:

- выявлена взаимосвязь постоянной времени с электрофизическим свойством ворса – его электрическим сопротивлением;
- разработан новый способ прогнозирования предельной плотности ворсового покрова на основе измерения только двух параметров: электрического сопротивления ворса  $R$  и плотности ворсового покрова  $n$ , получаемую при заданной длительности флокирования. Данный способ позволяет определить производительность процесса, а именно рассчитать время, необходимое для получения требуемой плотности и скорость достижения флокируемого материала;
- разработана модель расчета максимального значения заряда для ворса различных геометрических размеров при разной напряженности электрического поля;
- предложена методика оценки оптимального расстояния между электродами, обеспечивающая наилучшую начальную ориентацию ворса и подтверждена экспериментально;
- предложены критерии оптимизации, важные для технологического процесса, позволяющие определить оптимальное расстояние между электродами.

**Апробация результатов работы.** Результаты диссертации докладывались на международных и всероссийских научных конференциях: Международная научно-практическая конференция «Современные тенденции легкой и текстильной промышленности: инновации, эффективность, экологичность (Херсон, 2016), Всероссийская научная конференция молодых ученых «Инновации молодежной науки» (Санкт-Петербург, 2016), Международная научно-практическая конференция соискателей высшего образования и молодых ученых «Молодежь в науке и производстве - 2019:

Инновационные технологии легкой промышленности» (Херсон, 2019), Всероссийская научная конференция молодых ученых «Инновации молодежной науки» (Санкт-Петербург, 2019).

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 15 научных статьях, из них 7 в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 6 глав, выводов, списка использованной литературы (49 источников). Основное содержание изложено на 154 страницах машинописного текста, иллюстрировано 62 рисунками и содержит 46 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулирована актуальность диссертационной работы, цель и задачи исследования, методы исследования, научная новизна и практическая значимость.

В **первой главе** приводится обзор научной литературы по теме диссертации. Описывается технология электрофлокирования и области ее применения. Представлена сырьевая база для данной технологии. Дана оценка основным свойствам ворса: геометрическим и электрофизическим. На базе проведенных ранее исследований, изложены механизмы, связанные с процессом приобретения ворсом заряда. Рассмотрены представления об ориентации ворса, его максимальной плотности и процессе образования ворсового покрова на основе работ Бершева Е.Н, Семенова В.А., Шляхтенко П.Г. Рассмотрено влияние основных технологических параметров на производительность процесса флокирования.

**Вторая глава** посвящена ориентации ворса на поверхности флокированного материала. Ориентация ворса определяется углом наклона ворсинок к вертикальному положению относительно поверхности материала. Можно предполагать, что распределение ворсинок по углам наклона приблизительно соответствует нормальному закону распределения. Это распределение характеризуется параметром  $\sigma$ , который определяет ориентацию ворса на поверхности материала в целом (1):

$$P(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\varphi-\varphi_0)^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – угол наклона ворсинок;  $\varphi_0$  – значение угла, соответствующее центру распределения.

Предполагается, что на начальном этапе все ворсинки, достигшие поверхности, внедряются в клеевой слой. В этом случае мы имеем начальное распределение плотности ворса по углам наклона к вертикали (рис.1). По мере роста поверхностной плотности ворсового покрова  $n$  достичь поверхности могут только ворсинки с высокой степенью ориентации (конечное распределение). Ворс, имеющий значительное отклонение от вертикали имеет высокую вероятность наткнуться на ранее закрепившийся ворс и не достичь клеевого слоя. Для обоснования этого предположения была применена экспериментальная методика оценки параметра ориентации на основе распределения ворсинок по углам наклона к вертикали (1). В одинаковых условиях были изготовлены образцы с использованием нескольких отличных друг от друга ворсов при различном времени нанесения. Далее была проведена фотосъемка поперечных срезов флокированных образцов при помощи прибора MICROCOLOR 2000 250B-LAB,

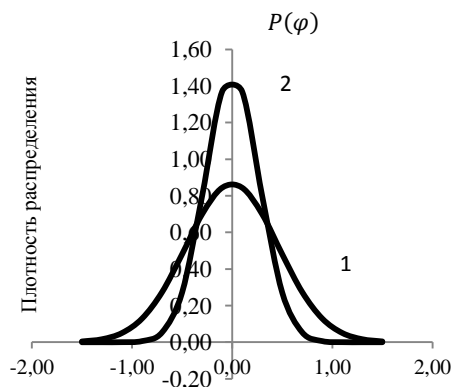


Рисунок 1 – Плотность распределения ворса по углам наклона к вертикали; 1 – начальное распределение; 2 – конечное распределение



Рисунок 2 – Микрофотографический комплекс MICROCOLOR 2000 250B-LAB

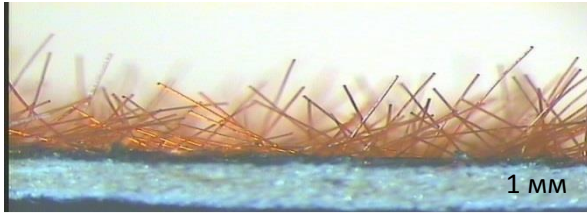


Рисунок 3 – Увеличенное изображение среза флокированного образца (время нанесения  $t = 4с$ )



Рисунок 4 – Увеличенное изображение среза флокированного образца (время нанесения  $t = 8с$ )

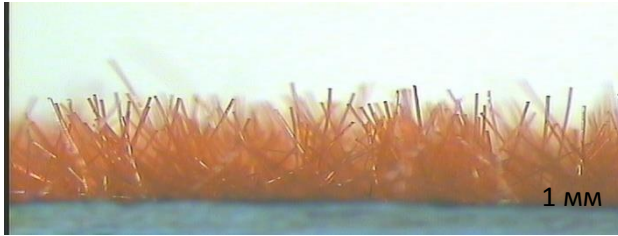


Рисунок 5 – Увеличенное изображение среза флокированного образца (время нанесения  $t = 12с$ )

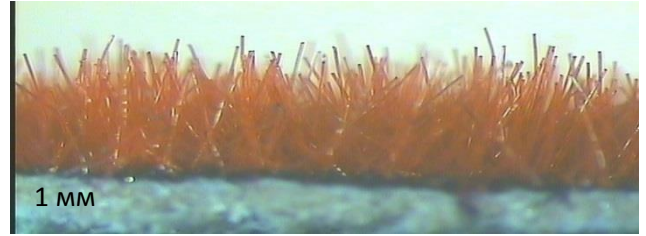


Рисунок 6 – Увеличенное изображение среза флокированного образца (время нанесения  $t = 16с$ )

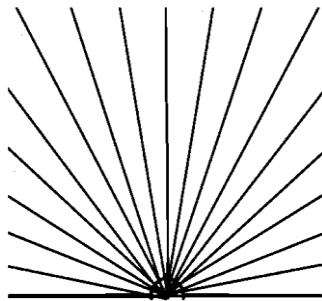


Рисунок 7 – Шаблон для оценки угла наклона

внешний вид которого представлен на рисунке 2. Увеличенные изображения срезов флокированных образцов для одного из ворсов за разные промежутки времени нанесения показаны на рисунках 3-6. По полученным изображениям видно, что с ростом поверхностной плотности ворсового покрова ориентация улучшается. Измерение ориентации производилось визуально путем подсчета количества четко видимых по всей длине ворсинок, в интервалах по  $10^\circ$  от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  в одну и другую стороны от центра распределения. В качестве средства измерения использовался шаблон, имеющий лучи с соответствующими интервалами углов наклона. Шаблон для оценки угла наклона ворсинки представлен на рисунке 7. Относительное количество ворсинок в каждом интервале получали путем деления абсолютного числа ворсинок по каждому интервалу на суммарное количество исследованных ворсинок. Зависимость расчетных значений относительного количества ворсинок от угла наклона (1) (кривая - 1) и полученные экспериментальные значения (гистограмма - 2) представлены на рисунке 8. Зная вид зависимости (1), с помощью функции «Поиск решения» программы Excel легко определить значение параметра ориентации  $\sigma$ , обеспечивающее минимум суммы квадратов отклонения расчетных (1) и экспериментальных данных по относительному количеству ворсинок в каждом интервале. Таким образом, критерием определения параметра  $\sigma$  является следующее соотношение:

$$\sum (P_s(\varphi) - P_p(\varphi))^2 = \min. \quad (2)$$

Для эксперимента было выбрано три вида ворса из полиамидного волокна разной длины и разным электрическим сопротивлением: ворс 1 – длиной  $l = 1$  мм и  $R = 135$  МОм; ворс 2 – длиной  $l = 1$  мм и  $R = 32$  МОм; ворс 3 – длиной  $l = 0,5$  мм и  $R = 128$  МОм. Используя указанный ворс, было изготовлено несколько образцов. Каждый образец выполнен за разные промежутки времени от  $t = 1с$  до  $t = 16с$  при напряжении  $U = 36$  кВ.

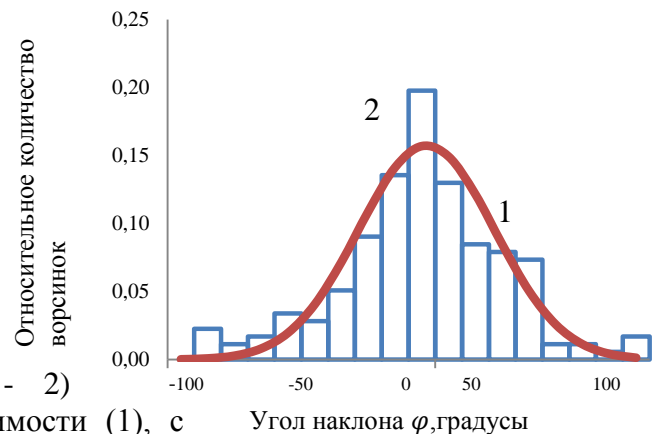


Рисунок 8 – Экспериментальная (1) и расчетная (2) зависимости относительного количества ворсинок от угла наклона

Одновременно для каждого образца фиксировали время нанесения ворса и полученную плотность ворсового покрова. Все полученные результаты: время нанесения, поверхностная плотность ворсового покрова и соответствующий им параметр ориентации  $\sigma$ , рассчитанный по описанной выше методике, сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Расчетные значения параметра ориентации для ворса 1,2,3

	Ворс 1 $l=1$ мм, $R = 135$ МОм				Ворс 2 $l=1$ мм, $R=32$ МОм			Ворс 3 $l=0,5$ мм, $R = 128$ МОм			
$t$ , с	4	8	12	16	5	10	15	2	5	10	15
$n$ , г/м <sup>2</sup>	30,6	47,8	66,9	71,6	35,6	74,4	94,4	35,6	73,8	83,8	82,5
$\sigma$ ,град	44,7	37,8	36,3	31,4	32,1	25,4	20,9	34,7	25,6	25,4	23,5
$n_{max}$ , г/м <sup>2</sup>	91,59				201,9			88,2			
$\sigma_0$ , град	52,5				38,8			39,2			
$\sigma_{max}$ ,град при $n_{max}$	25,8				11,1			13,4			

На основе данных таблицы 1 получены зависимости между параметром ориентации  $\sigma$  и плотностью ворсового покрова для трех типов ворса (рис. 9, а,б,с).

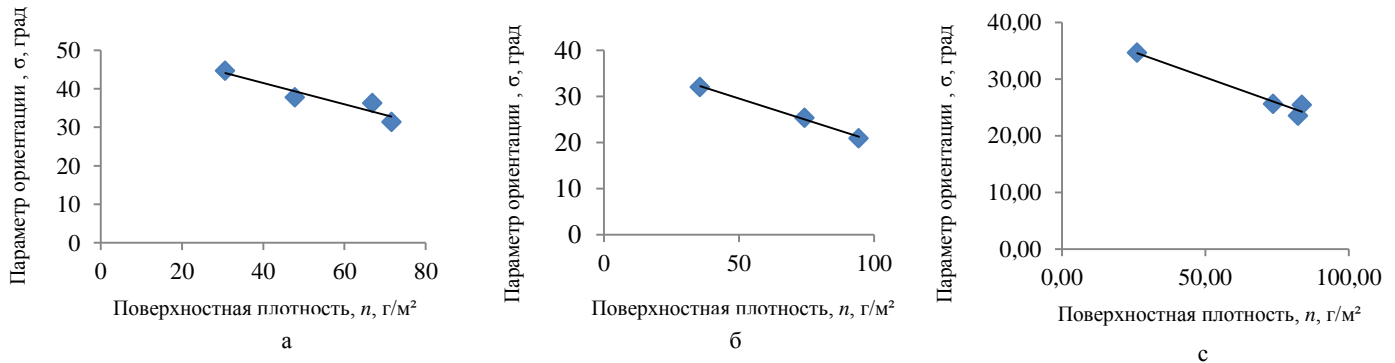


Рисунок 9 – Зависимость параметра ориентации от величины поверхностной плотности ворса (а -  $l = 1$  мм и  $R = 135$  МОм; б -  $l = 1$  мм и  $R = 32$  МОм; с -  $l = 0,5$  мм и  $R = 128$  МОм

Как видно из графиков, можно утверждать, что численное значение  $\sigma$  в любой момент времени нанесения связана с функцией от начальной ориентации,  $\sigma_0$ , и полученные экспериментальные данные описываются линейной зависимостью:

$$\sigma(n) = \sigma_0 - kn, \quad (3)$$

где  $\sigma_0$  – параметр ориентации ворса на поверхности материала в начальный момент;  $k$  – эмпирический коэффициент, отвечающий за быстроту изменения параметра ориентации  $\sigma$ .

С ростом плотности ворсового покрова ориентация улучшается и зависит от начальной ориентации  $\sigma_0$ . Чем меньше значение параметра ориентации ворса на поверхности материала в начальный момент, тем лучше конечная ориентация и тем выше будет значение плотности ворсового покрова.

В третьей главе предложена модель формирования ворсового покрова на основе использования понятия «постоянной времени». Хорошо известно соотношение, описывающее процесс формирования ворсового покрова:

$$n(t) = n_{max} \left( 1 - e^{-\frac{P}{n_{max}}t} \right), \quad (4)$$

где  $n_{max}$  – величина предельной плотности ворсового покрова, г/мм<sup>2</sup>;  $t$  – длительность нанесения ворса, с;  $P$  – скорость подачи ворса к флокируемой поверхности, г/(м<sup>2</sup>с).

Для более четкого выявления характера влияния свойств ворса на технологические параметры, предложена новая модель, в которой вместо скорости подачи ворса  $P$  ввели иной технологический параметр – постоянную времени  $\tau$ . Она будет определять скорость роста плотности ворсового покрова. Тогда предлагаемая ранее математическая модель

формирования плотности ворса в зависимости от времени нанесения будет выглядеть следующим образом:

$$n(t) = n_{max}(1 - e^{-t/\tau}). \quad (5)$$

В данной модели (5) технологические параметры четко разделены. Величину предельной плотности  $n_{max}$  ворсового покрова можно заменить на характеристику ориентации ворса на поверхности основы, которая определяется параметром распределения ворсинок по углам наклона к вертикали  $\sigma$ . Их взаимосвязь была определена в следующем виде:

$$n_{max} = \frac{\sqrt{2\pi}T}{d\sigma_{max}}, \quad (6)$$

где  $l$  – длина ворса, мм;  $d$  – диаметр ворса, мм;  $T$  – линейная плотность, текс  $\sigma_{max}$  – параметр распределения ворсинок, рад. ( $\sigma_{max} = \sigma(n_{max})$ ).

Учитывая зависимости (5) и (6), модель формирования плотности ворсового покрова от времени будет выглядеть:

$$n(t) = \frac{\sqrt{2\pi}T}{d\sigma_{max}}(1 - e^{-t/\tau}). \quad (7)$$

На базе полученной модели (7) можно получить технологические параметры  $\sigma_{max}$  и  $\tau$ . Используя опцию «Поиск решения» программы Excel, вычисляли такие значения  $\sigma_{max}$  и  $\tau$ , при которых достигается минимум суммы квадратов отклонения расчетных (7) и экспериментальных значений плотности ворсового покрова от времени  $n(t)$ .

Постоянная времени  $\tau$  позволяет исследовать ее взаимосвязь с электрофизическим свойством ворса – электрическим сопротивлением  $R$ . Для исследования данной взаимосвязи были использованы 10 разных ворсов, имеющих одинаковую природу и геометрические размеры ( $l = 0,5$  мм,  $T = 0,33$  текс), но разное сопротивление и коэффициент зарядки. Таким образом, с помощью микрометрического датчика, были измерено электрическое сопротивление и рассчитано значение постоянной времени  $\tau$  для 10 разных ворсов. Сводные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные значения постоянной времени  $\tau$  для разных ворсов

Номер ворса	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R$ , МОм	4,1	5,8	27	58	70	115	125	150	240	460
$\tau$ , с	2,3	4,9	6,6	4,6	3,3	2,7	3,2	3,18	2,2	2,02

Для математического описания полученных экспериментальных результатов взаимосвязи постоянной времени и электрического сопротивления ворса предложена модель вида:

$$\tau = \tau_0 \left( 1 + \ln \frac{R}{R_0} e^{-k \left( \frac{R}{R_0} \right)^2} \right). \quad (8)$$

где  $\tau_0$ ,  $R_0$  и  $k$  – эмпирические константы, получаемые методом наименьших квадратов на основе экспериментальных данных. Размерность  $R_0$  – МОм,  $\tau_0$  – с,  $k$  – безразмерная величина.

Адекватность полученной математической модели хорошо иллюстрируется на рисунке 10. Интерес представляет то, что на основании полученной модели оказалось возможным прогнозировать получаемую предельную плотность ворсового покрова  $n_{max}$  на основе измерения только двух параметров: электрического сопротивления ворса  $R$  и плотности ворсового покрова  $n$ , получаемую при заданной длительности флокирования. Для ворса с заранее неизвестными свойствами измеряем электрическое сопротивление. После этого на основе соотношения (8) определяем величину постоянной времени  $\tau$ . Далее измеряем плотность ворсового покрова при определенной длительности

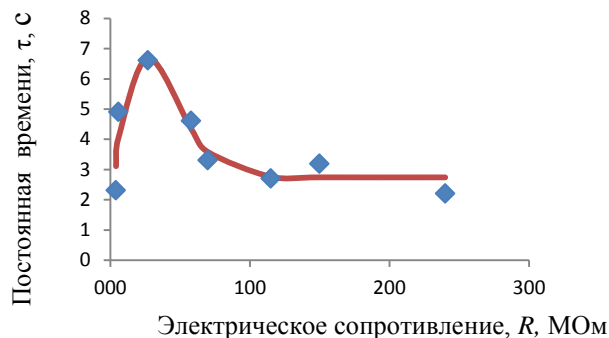


Рисунок 10 – Зависимость постоянной времени от электрического сопротивления



флокирования  $t$ . На основе выражения (5) при вычисленном значении  $\tau$  (8), зная время флокирования  $t$  и плотность  $n(t)$  вычисляем значение  $n_{max}$ :

$$n_{max} = \frac{n(t)}{1 - e^{-t/\tau}}. \quad (9)$$

Одновременно на основе серии измерений плотности ворсового покрова от времени нанесения  $n(t)$  также определяли значение  $n_{max}$  (4), используя метод наименьших квадратов. Результаты оценки  $n_{max}$  по (9) и (4) с хорошей точностью совпадают. Это свидетельствует о хорошей адекватности полученной эмпирической модели (8).

Модель формирования ворсового покрова (5) можно развить с учетом изменения ориентации ворса  $\sigma$  по мере заполнения поверхности материала (3). При этом, исходное положение для построения новой модели формирования ворсового покрова остается прежним: производная плотности ворсового покрова от времени пропорциональна доле свободной площади на поверхности, заполняемой ворсом в процессе флокирования:

$$\frac{dn}{dt} \sim 1 - \frac{ndl\sigma}{\sqrt{2\pi}}. \quad (10)$$

Учитывая в выражении (10), что  $\sigma(n) = \sigma_0 - kn$ , а вместо знака пропорциональности используем коэффициент пропорциональности  $K$ :

$$\frac{dn}{dt} = K \left( 1 - \frac{dl(\sigma_0 - kn)}{\sqrt{2\pi}} n \right), \quad (11)$$

то после математических преобразований получаем модель вида:

$$n = n_1 \frac{1 - e^{t/\tau}}{1 - \frac{n_1}{n_2} e^{t/\tau}}, \quad (12)$$

где  $n_1$  и  $n_2$  – корни квадратного уравнения

$$n_{1,2} = \frac{\sigma_0}{2k} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{2k}\right)^2 - \frac{\sqrt{2\pi}}{dlk}}. \quad (13)$$

Значения плотности ворса, полученные по модели (5) и (12) можно сопоставить как между собой, так и с экспериментальными значениями. Наглядно это можно увидеть на рисунке 11 и отметить хорошее совпадение результатов. Предложенная модель (12) достаточно трудоемка для расчета, но позволяет оценить плотность ворсового покрова с учетом изменения ориентации ворса на поверхности.

**Четвертая глава** посвящена изучению процесса приобретения ворса заряда. От его величины зависит прочность закрепления волокон в клеевом слое и плотность ворсового покрова.

Предложенные ранее модели по определению заряда волокна давали расхождение с реальными значениями зарядов. Поэтому рассмотрим следующий подход к этому вопросу. Условия, которым должно подчиняться распределение плотности заряда вдоль волокна, хорошо известны:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho, \quad \vec{D}(x) = 0, \quad (14)$$

где  $\rho$  – объемная плотность заряда, Кл/м<sup>3</sup>;  $D$  – электрическая индукция, В/м.

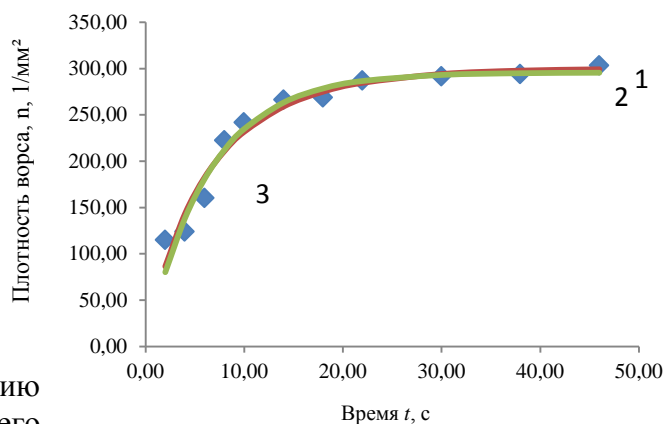


Рисунок 11 - Зависимость плотности ворса от времени нанесения: 1 – модель (12), 2 – модель (4), 3 – экспериментальные значения  $n$ .

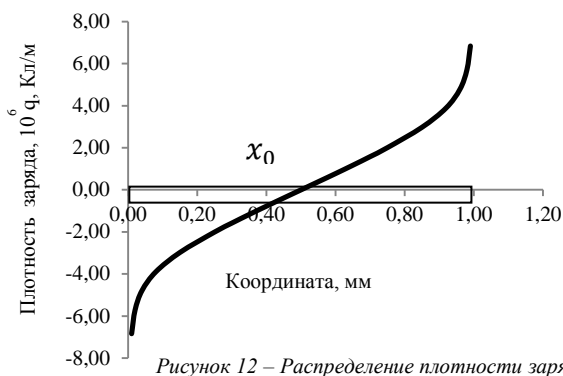


Рисунок 12 – Распределение плотности заряда, согласно Ланаду Л.Д. и Ливицица Е.М. (15)

Согласно этим условиям, для электропроводного волокна в любой его точке напряженность должна равняться нулю. Функциональная зависимость, описывающая распределение плотности заряда  $\gamma(x)$  для незаряженного проводника в электрическом поле с напряженностью  $E$  представлена в работе Ландау Л.Д. и Лившица Е.М. и имеет следующий вид:

$$\gamma(x) = \frac{4\pi\epsilon_0 E x}{\ln\left(4\frac{l^2/4-x^2}{d^2/4}\right)-2}, \quad (15)$$

где  $l$  – длина проводника (волокна), м;

$d$  – диаметр проводника, м.

Данное распределение плотности заряда показано на рисунке 12. В нашем случае волокно находится на поверхности электрода. Каждому элементу заряда, распределенного вдоль волокна соответствует его зеркальное отражение на таком же расстоянии от поверхности электрода, но с противоположным знаком. Такое распределение показано на рисунке 13 ( $l = 1,0$  мм  $E = 5$  кВ/см). Для того, чтобы ворсинка оторвалась от электрода ближний к электроду заряд должен стечь. При этом распределение

плотности заряда на ворсинке, естественно, изменится. Чтобы новое распределение плотности заряда удовлетворяло условиям (14), будем считать его соответствующим распределению (15), но при длине в два раза большей длины ворсинки. То есть распределение (15) сохраняется, но для ворсинки вместе с ее «изображением», что показано на рисунке 14. При таком распределении ворсинка оторвется поверхности электрода. Для расчета максимального заряда волокна удобно аппроксимировать зависимость (15) полиномом третьей степени. Новое распределение плотности заряда показано на рисунке 15, а его математический вид:

$$\gamma(x) = E \cdot (ax^3 + bx), \quad (16)$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты полинома;  $E$  – напряженность электрического поля, кВ/см.

Для ворса с параметрами:  $l = 1,0$  мм,  $d = 20$  мкм,  $T = 0,33$  текс функция  $\gamma(x)$  будет иметь вид:

$$\gamma(x) = 9,02 \cdot 10^{-6} x^3 + 1,03 \cdot 10^{-11} \quad (17)$$

Для определения максимального заряда необходимо проинтегрировать выражение (16) по длине ворсинки.

$$q_{max} = E \int_0^l (ax^3 + bx) dx = \frac{El^2}{2} \left( \frac{al^2}{2} + b \right). \quad (18)$$

Приближенная эмпирическая зависимость, связывающая максимальный заряд с напряженностью и длиной ворса:

$$q_{max} = 4,75 \cdot 10^{-13} l \cdot E(l + 0,63). \quad (19)$$

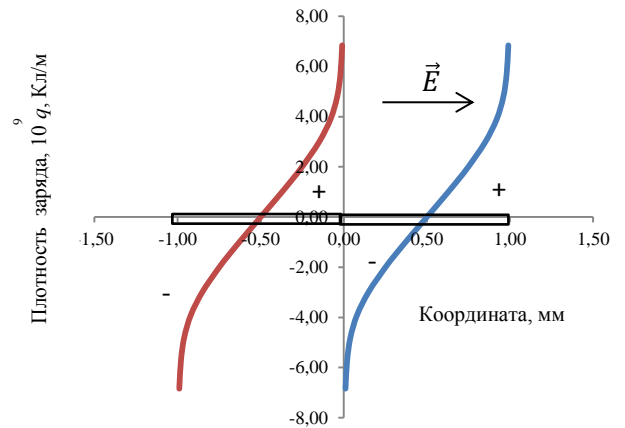


Рисунок 13 – Распределение плотности заряда вдоль волокна с его зеркальным отражением на электроде

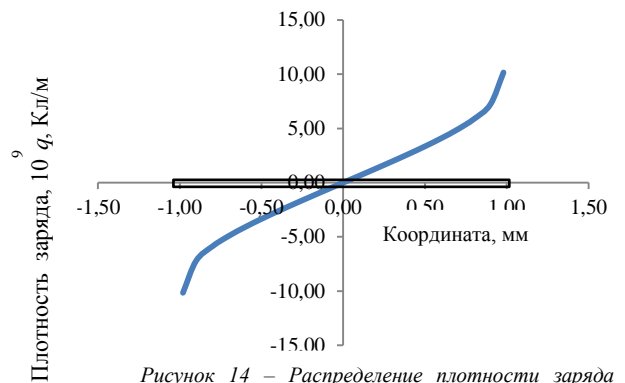


Рисунок 14 – Распределение плотности заряда вдоль волокна для ворсинки вместе с ее изображением

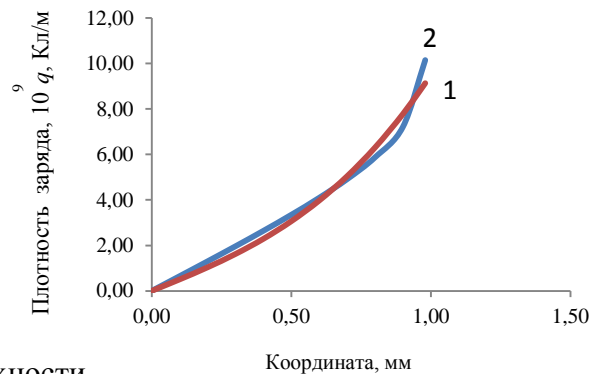


Рисунок 15 – Аппроксимация распределения плотности заряда 1 – распределение плотности заряда вдоль волокна согласно (15); 2 – распределение плотности заряда согласно (16).

На основе теоретических положений предложенная модель зарядки ворса (18) позволяет получить значения максимальных зарядов ворса разной длины и соответствующие реальным данным.

Величина заряда связана с электропроводностью ворса  $\lambda$ . Заряд ворса одинаковой длины  $l = 0,5$  мм измеряли емкостным методом при постоянной напряженности  $E = 2,75$  кВ/см. Для определения электропроводности измеряли сопротивление ворса с помощью микрометрического датчика, подключенного к тераомметру. Максимальный заряд при данной напряженности  $q_{max} = 6,27 \cdot 10^{-13}$  Кл. Результаты экспериментов, представленных в таблице 3, показали, что все измеренные значения заряда не превышают этой величины.

Таблица 3-Экспериментальные значения заряда

Ворс	Удельная электропроводность, $\lambda, \text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$	Заряд, $q, \text{Кл}$
1	$(1,46 \pm 0,05) \cdot 10^{-7}$	$(3,44 \pm 0,14) \cdot 10^{-13}$
2	$(5,65 \pm 0,14) \cdot 10^{-8}$	$(5,57 \pm 1,2) \cdot 10^{-13}$
3	$(1,05 \pm 0,03) \cdot 10^{-7}$	$(3,90 \pm 0,74) \cdot 10^{-13}$
4	$(2,15 \pm 0,25) \cdot 10^{-8}$	$(3,06 \pm 0,51) \cdot 10^{-13}$
5	$(1,79 \pm 0,08) \cdot 10^{-8}$	$(4,09 \pm 0,68) \cdot 10^{-13}$
6	$(2,25 \pm 0,56) \cdot 10^{-8}$	$(4,68 \pm 0,25) \cdot 10^{-13}$

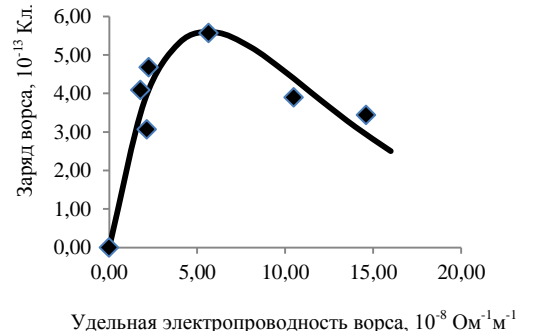


Рисунок 16 – Зависимость заряда ворса от удельной электропроводности

На рисунке 16 показана зависимость заряда ворса от электропроводности. На основе экспериментальных данных получено эмпирическое соотношение для расчета заряда:

$$q = q_{max} \frac{\lambda}{\lambda_0} e^{-k \frac{\lambda}{\lambda_0}}, \quad (20)$$

где  $\lambda_0$  – эмпирический коэффициент, имеющий размерность электропроводности,  $\text{Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ ,  $k$  – безразмерный коэффициент. Для ворса разной длины и при разной напряженности электрического поля значения коэффициентов  $\lambda_0$  и  $k$  будут отличаться.

Ранее в главе 2 было показано, что ориентация ворса на поверхности флюорированного материала определяется его ориентацией  $\sigma_0$  в начальный момент, поэтому:

**в пятой главе** рассмотрены основные факторы, влияющие на ориентацию ворса в процессе его движения между электродами и условия, обеспечивающие наилучшую ориентацию. Ориентацию заряженного ворса при движении в электрическом поле определяют два момента сил. Первый момент – это момент силы электростатического взаимодействия  $\vec{M}_1$ . Он действует на ворсинку в электрическом поле и ориентирует ее в направлении вектора напряженности электрического поля. Этот момент можно считать постоянным, поскольку заряд ворсинки и напряженность электрического поля в процессе движения существенно не меняются. С учетом нелинейного распределения плотности заряда вдоль ворсинки (16) формула для электростатического момента имеет вид:

$$M_1 = Fl \cdot \sin \alpha = qEl \cdot \sin \alpha = \beta E^2 \cdot \sin \alpha \cdot \int_0^l (ax^3 + bx) x dx = \beta E^2 \cdot \sin \alpha \cdot l^3 \left( \frac{al^2}{5} + \frac{b}{3} \right), \quad (21)$$

где  $l$  – длина ворса, м;  $a, b$  – коэффициенты полинома, описывающего распределение плотности заряда, для ворса заданной длины;  $E$  – напряженность электрического поля, кВ/см;  $\beta$  – доля максимально возможного значения заряда, определяющая реальную величину заряда в интервале от 0 до  $q_{max}$ ;  $\alpha$  – угол между осью ворсинки и направлением вектора напряженности.

Второй момент, который в свою очередь также влияет на ориентацию ворсинки – это момент силы аэродинамического сопротивления  $\vec{M}_2$ . Он стремится развернуть ворсинку перпендикулярно скорости ее движения:

$$M_2 = F_c \sin \alpha \cdot \frac{l}{2} \delta, \quad (22)$$

где  $F_c$  – сила аэродинамического сопротивления (5.6);  $l$  – длина волокна, м;  $v$  – скорость движения ворсинки, м/с;  $\alpha$  – угол между осью ворсинки и направлением вектора скорости;  $\delta$  – относительная доля площади, перекрываемая проекциями всех ворсинок.

Рассмотрим изменение моментов  $M_1$  и  $M_2$  в процессе движения ворсинки между электродами. Пока скорость ворсинки мала, ориентация улучшается, и, если даже ось ворсинки по какой-либо причине отклонилась от вектора напряженности на некоторый угол  $\alpha$ , то под действием момента электростатической силы она вновь восстановится. То есть пока момент электростатического взаимодействия  $M_1$  преобладает над аэродинамическим моментом  $M_2$ , ориентация восстанавливается ( $M_1 > M_2$ ). Можно предположить, что с ростом скорости в некоторый момент ворсинка вступает в стадию неустойчивой ориентации (точка  $x_0$ ). При случайном отклонении ее оси на тот же угол  $\alpha$  начинает преобладать момент  $M_2$  и ориентация нарушается ( $M_2 > M_1$ ). Таким образом, условия потери ориентации ворсинки зависят от скорости ее движения и критического угла  $\alpha$ . Критический угол – это угол, при котором ворсинка теряет ориентацию при данной скорости. Критический угол  $\alpha$  потери вертикальной ориентации ворсинки от скорости движения можно рассчитать при условии равенства моментов  $M_1 = M_2$ . Если скорость  $v$  движения ворсинки мала, то критический угол  $\alpha$  достаточно велик ( $12^\circ - 17^\circ$ ), т.е. вероятность того, что она отклонится на больший угол небольшая. Далее, на некотором расстоянии от электрода  $h \approx 6 - 8$  см, критический угол снижается (приблизительно  $\alpha \approx 3^\circ$ ), и большая часть ворсинок может терять ориентацию. В расчетах  $\alpha$  принимали  $3^\circ$ . На основе вышеперечисленных предположений и проведенных расчетов, согласно (21), (22) на рисунке 17 а, б показано изменение моментов  $M_1$  и  $M_2$  от координаты ворсинки при ее движении между электродами.

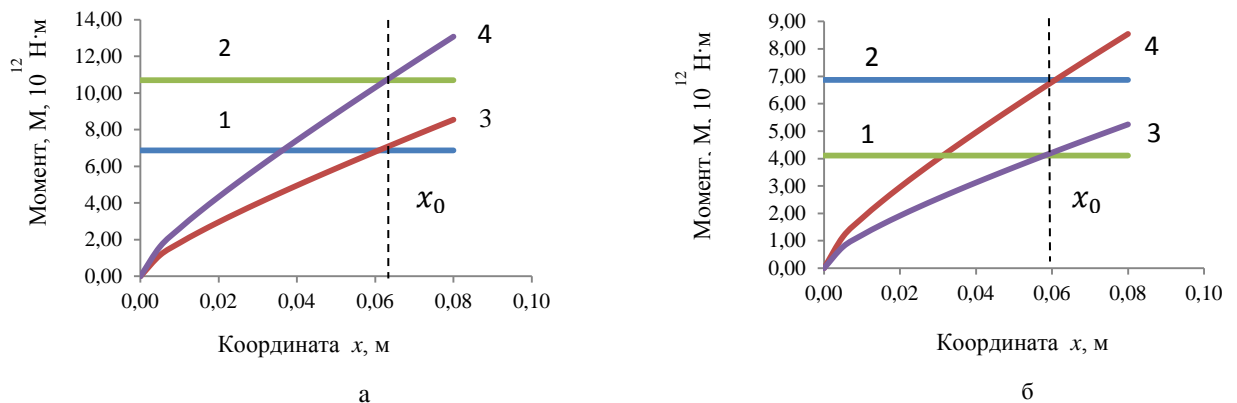


Рисунок 17– Изменение моментов  $M_1$  и  $M_2$  от координаты ворсинки: а – (1 –  $M_1$  при  $E = 4$  кВ/см; 2 –  $M_1$  при  $E = 5$  кВ/см; 3 –  $M_2$  при  $E = 4$  кВ/см; 4 –  $M_2$  при  $E = 5$  кВ/см); б – (1 –  $M_1$  при  $q = 5,47 \cdot 10^{-13}$  Кл; 2 –  $M_1$  при  $q = 9,12 \cdot 10^{-13}$  Кл; 3 –  $M_2$  при  $q = 5,47 \cdot 10^{-13}$  Кл; 4 –  $M_2$  при  $q = 9,12 \cdot 10^{-13}$  Кл)

Можно предположить, что ориентация улучшается в тот момент, когда ворсинка достигает координаты  $x < x_0$ , то есть до возникновения неустойчивого равновесия и наилучшее расстояние между электродами – когда точка неустойчивого равновесия  $x_0$  совпадает с межэлектродным расстоянием  $h$  ( $x_0 = h$ ). Это такое расстояние, при котором ворсинка не успеет войти в зону неустойчивого равновесия и потерять ориентацию. Для определения расстояния  $h$  пользовались численным методом. Пример для 2 вариантов расчета показан в таблице 4. Первый вариант расчета – режимы флокирования разные, но ворс с одинаковыми электрофизическими свойствами, второй вариант – один режим флокирования, но ворс с разными электрофизическими свойствами.

Таблица 4 - Значение межэлектродного расстояния  $h$ , при котором выполняется условие  $x_0 = h$ 

1 вариант $l = 0,5$ мм; $d = 20$ мкм; $q_{max} = 9,12 \cdot 10^{-13}$ ; $E = 4$ кВ/см			2 вариант $l = 0,5$ мм; $d = 20$ мкм; $k_{max} = 2,28 \cdot 10^{-18}$					
$\beta$	$x_0 = h$ , м	$v$ , м/с	$\beta$	$E$ , кВ/см	$q$ , Кл	$q_{max}$ , Кл	$x_0 = h$ , м	$v$ , м/с
0,1	$3,18 \cdot 10^{-2}$	1,93	0,4	3	$2,74 \cdot 10^{-13}$	$6,84 \cdot 10^{-13}$	$4,18 \cdot 10^{-2}$	6,42
0,2	$4,04 \cdot 10^{-2}$	3,93						
0,3	$4,51 \cdot 10^{-2}$	5,58						
0,4	$4,83 \cdot 10^{-2}$	7,01		4	$3,65 \cdot 10^{-13}$	$9,12 \cdot 10^{-13}$	$4,83 \cdot 10^{-2}$	9,22
0,5	$5,06 \cdot 10^{-2}$	8,29						
0,6	$5,23 \cdot 10^{-2}$	9,46						
0,7	$5,38 \cdot 10^{-2}$	10,5		5	$4,56 \cdot 10^{-13}$	$11,4 \cdot 10^{-13}$	$5,27 \cdot 10^{-2}$	12,05
0,8	$5,49 \cdot 10^{-2}$	11,6						
0,9	$5,59 \cdot 10^{-2}$	12,5						
1	$5,67 \cdot 10^{-2}$	13,4	6	$5,47 \cdot 10^{-13}$	$13,7 \cdot 10^{-13}$	$5,59 \cdot 10^{-2}$	14,9	

Указанные предположения проверены экспериментально. Эксперимент заключался в определении плотности ворсового покрова при изменении расстояния между электродами от  $h = 4$  см до  $h = 10$  см с интервалом в 1 см изменяя, соответственно, напряжение от 16 до 40 кВ с сохранением постоянной напряженности. Время нанесения целесообразно выбрано  $t = 15$  с, так как, в этом случае, значение плотности ворса  $n$  будет приближаться к предельному значению  $n_{max}$ . Исследования проведены для ПА ворса длиной  $l = 0,5$  мм с различной электропроводностью и для ворса длиной  $l = 1,0$  мм при напряженности электрического поля  $E = 4$  кВ/см и  $E = 5$  кВ/см. Полученные экспериментальные данные плотности ворса от расстояния между электродами показаны на рисунке 18 а,б.

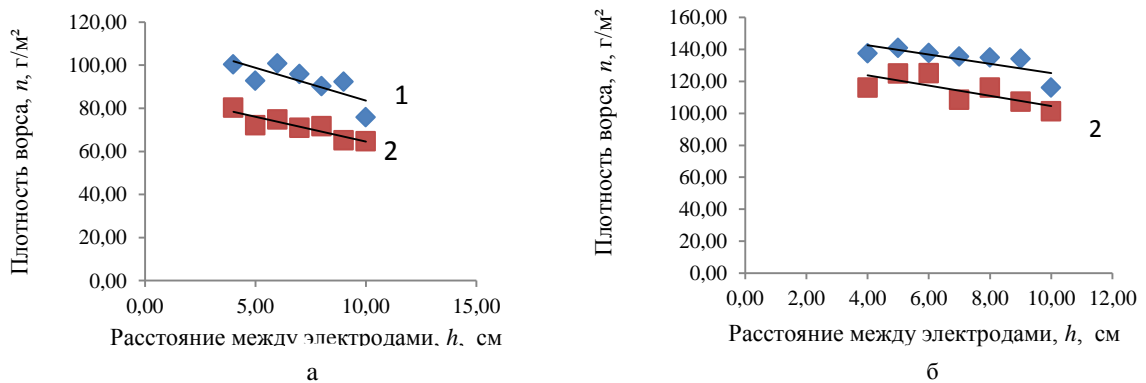


Рисунок 18 – Зависимость плотности ворса от расстояния между электродами: а -  $l = 0,5$  мм,  $E = 4$  кВ/см; 1-  $R = 38$  МОм; 2-  $R = 0,15$  МОм; б -  $l = 1,0$  мм; 1-  $R = 42$  МОм,  $E = 5$  кВ/см; 2-  $R = 56$  МОм,  $E = 4$  кВ/см;

Полученные линейные зависимости демонстрируют, что ориентация ворса при меньшем значении межэлектродного расстояния  $h$  лучше, т.е. значение плотности ворсового покрова выше. Но необходимо отметить, что глубина внедрения ворсинок в клеевой слой может быть в этом случае недостаточной для обеспечения требуемой прочности закрепления. Увеличивая расстояние  $h$  между электродами значение плотности ворсового покрова получается ниже. Это может привести к получению материала с низкой стойкостью к истиранию. Поэтому в технологическом процессе важен выбор межэлектродного расстояния, при котором значение плотности будет максимальным, а стойкость к истиранию не ниже требуемой. Для оценки стойкости ворсового покрова к истиранию при различных расстояниях между электродами и сохранении постоянной напряженности электрического поля использовали прибор APG 1000, внешний вид которого представлен на рисунке 19. Численной характеристикой стойкости флокированных материалов к истиранию является число циклов движения ножа при заданной нагрузке (0,5 или 1,0 кг) до появления участков с разрушенной структурой ворсового покрова. Количество циклов истирания измеряли для образцов, изготавливаемых



из полиамидного ворса длиной  $l = 0,5$  мм в одинаковых условиях (время нанесения  $t = 15$  с, время термофиксации клея  $t_{\text{суш}} = 5$  мин) при двух значениях напряженности электрического поля ( $E = 4$  и  $E = 5$  кВ/см) и четырех значений расстояния между электродами (4, 6, 10 и 12 см) с использованием одной и той же клеевой композиции. На рисунке 20 представлены флокированные образцы после истирания.

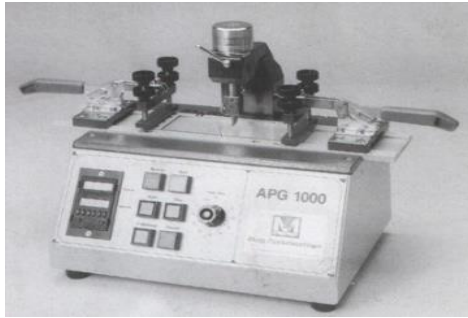


Рисунок 19 - Прибор для определения стойкости ворсового покрова

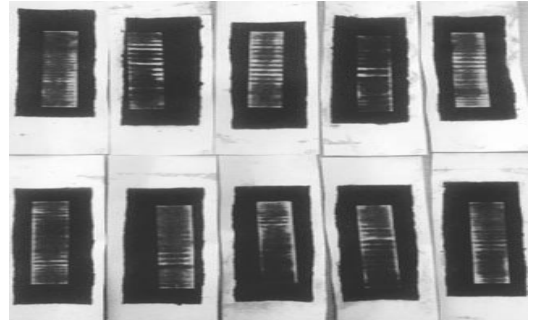


Рисунок 20 - Флокированные образцы после истирания

Соответствующие зависимости плотности ворсового покрова  $n$  и стойкости к истиранию  $N$  от межэлектродного расстояния при  $E = 4$  кВ/см изображены на рисунках 21, 22.

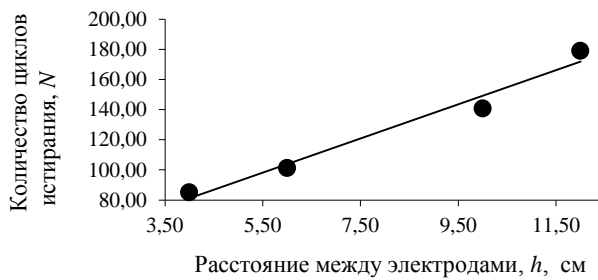


Рисунок 21 - Зависимость стойкости к истиранию от межэлектродного расстояния при  $E = 4$  кВ/см

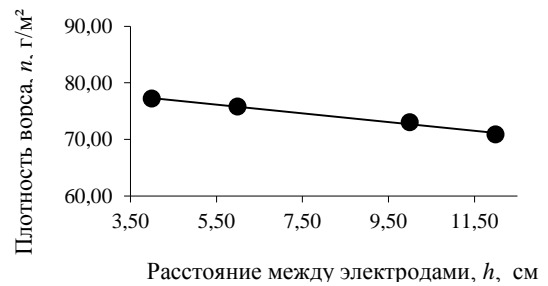


Рисунок 22 - Зависимость поверхностной плотности ворсового покрова от межэлектродного расстояния при  $E = 4$  кВ/см

Руководствуясь полученными результатами эксперимента и эмпирическими моделями:  $N = 35,67 + 11,36h$ ;  $n = 80,38 - 0,769h$ . (23) можно утверждать, что с ростом расстояния стойкость ворсового покрытия к истиранию возрастает (рис. 21). В тоже время, нам известно, что одновременно уменьшается максимальная плотность ворсового покрова (рис. 22). Это позволяет осуществлять оптимизацию, выбирая различные критерии.

Таблица 5 – Критерии оптимизации с учетом стойкости ворсового покрытия к истиранию по плотности ворсового покрова

Критерий оптимизации			Предельная плотность $n_{\text{max}}$ , г/м²	Оптимальное расстояние между электродами $h$ , см	Количество циклов истирания
Максимальная стойкость к истиранию	$E = 4$ кВ/см	$N = 35,67 + 11,36h$ $n = 80,38 - 0,769h$	<b>75</b>	6,9	115
	$E = 5$ кВ/см	$N = 39,29 + 11,42h$ $n = 80,38 - 0,769h$	<b>75</b>	9,7	150
Максимальная плотность ворсового покрова	$E = 4$ кВ/см	$N = 35,67 + 11,36h$ $n = 80,38 - 0,769h$	74,4	7,8	<b>125</b>
	$E = 5$ кВ/см	$N = 39,29 + 11,42h$ $n = 81,73 - 0,692h$	76,5	7,5	<b>125</b>

Согласно данным таблицы 5, критерием оптимизации может быть либо обеспечение максимальной стойкости к истиранию при плотности ворсового покрова не ниже заданного, либо максимальной плотности ворсового покрова при стойкости к истиранию не ниже необходимой.

**В шестой главе** произведена приближенная оценка технико-экономической эффективности технологического процесса при сравнении стандартного варианта процесса флокирования и оптимального для ворса длиной  $l = 0,5$  мм, диаметром  $d = 20$  мкм. При стандартном варианте требуемое значение поверхностной плотности  $n_0 = 70$  г/м<sup>2</sup> достигается за  $t = 6,67$  с ( $h = 10$  см, скорость движения флокируемого материала  $v = 9$  м/мин). При оптимальном варианте процесса флокирования меняется режим нанесения ( $h = 6$  см, скорость движения флокируемого материала  $v = 9,79$  м/мин) и требуемое значение поверхностной плотности  $n_0 = 70$  г/м<sup>2</sup> достигается за меньшее время  $t = 6,13$  с. Выбор оптимального расстояния между электродами позволяет увеличить годовой объем выпуска готового флокированного материала (для данного ворса приблизительно на 8,8 %) т.е. производительность. Это отражается на полученной годовой прибыли предприятия.

## ВЫВОДЫ

В процессе проведенного диссертационного исследования были решены поставленные задачи и достигнуты следующие основные результаты:

1. На основе экспериментальной методики исследования ориентации ворса на поверхности флокированного материала показана возможность определения параметра, определяющего ориентацию ворса.
2. Выявлена взаимосвязь параметра ориентации с величиной поверхностной плотности ворсового покрова и показано определяющее значение начальной ориентации ворса.
3. Предложена модель формирования ворсового покрова на основе введения новых технологических параметров: постоянной времени и параметра ориентации.
4. Выявлена взаимосвязь постоянной времени с электрофизическим свойством ворса – его электрическим сопротивлением.
5. Предложен новый способ прогнозирования предельной плотности ворсового покрова, необходимой для оценки производительности процесса.
6. Разработана математическая модель формирования ворсового покрова с учетом изменения ориентации ворса на поверхности в процессе нанесения.
7. Предложен новый подход для описания распределения плотности заряда по длине ворсинки и оценке максимального заряда ворса.
8. Разработана физическая модель описывающая процесс ориентации заряженного ворса при его движении в электрическом поле между электродами.
9. Предложена методика оценки оптимального расстояния между электродами, обеспечивающая наилучшую начальную ориентацию ворса, и обоснована экспериментально.
10. Показана возможность определения оптимального межэлектродного расстояния при использовании разных критериев оптимизации технологического процесса.
11. Произведена оценка технико-экономической эффективности технологического процесса электрофлокирования, при выборе оптимального режима флокирования для ворса с известными характеристиками.

### Список публикаций по теме диссертации

*Публикации в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ*

1. Безносова, В.В. Расчет заряда ворса в технологии электрофлокирования при нелинейном распределении плотности заряда / О.М. Иванов, Н.А. Бабина, В.В. Безносова // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – № 3. – 2013 г. – С. 8 – 13.

2. Безносова, В.В. Ориентация ворса при движении между электродами в процессе электрофлокирования / О.М. Иванов, В.В. Безносова // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – № 4. – 2013 г. – С. 19 – 22.
3. Безносова, В.В. Условия ориентации ворса в технологии электрофлокирования / В. Безносова // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. – № 3. – 2014 г. – С. 69 – 71.
4. Безносова, В.В. Повышение эффективности процесса электрофлокирования / О.М. Иванов, Н.А. Бабина, В.В. Безносова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – № 2. – 2015 г. – С. 54 – 57.
5. Безносова, В.В. Анализ процесса электрофлокирования с использованием новых технологических параметров / О.М. Иванов, В.В. Безносова // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – № 4. – 2015 г. – С. – 66 – 69.
6. Безносова, В.В. Оценка технологических параметров процесса электрофлокирования на основе измерения электропроводности ворса / О.М. Иванов, В.В. Безносова, Т.А. Анисимова // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – № 3. – 2016 г. – С. – 48 – 51.
7. Безносова, В.В. Выбор межэлектродного расстояния в технологии электрофлокирования / О.М. Иванов, С.Ю. Иванова, В.В. Безносова [и др.] // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна. – № 3. – 2017 г. – С. 133 – 137.

*Прочие публикации*

8. Безносова, В.В. Взаимосвязь избыточного заряда ворса с его ориентацией на материале в технологии электрофлокирования / В.В. Безносова // Вестник молодых ученых Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайн. Вып.1: Естественные и технические науки. – 2013 г. – С. 118 – 122.
9. Безносова, В.В. Оценка параметров процесса флокирования и свойств ворса на основе зависимости плотности ворсового покрова от времени / В.В. Безносова // Вестник молодых ученых Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайн. Вып.1: Естественные и технические науки. – 2015 г. – С. 19 – 22.
10. Безносова, В.В. Ориентация заряженного ворса в процессе его нанесения в электрическом поле при различном межэлектродном расстоянии / В.В. Безносова, Т.А. Анисимова // Вестник молодых ученых Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайн. Вып.1: Естественные и технические науки. – 2016 г. – С. 50 – 54.
11. Безносова, В.В. Ориентация ворса на поверхности флокированного материала при разной плотности ворсового покрова / В.В. Безносова, Т.А. Анисимова, Н.А. Бабина // Вестник молодых ученых Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайн. Вып.1: Естественные и технические науки. – 2016 г. – С. 32 – 38.
12. Безносова, В.В. Процесс ориентации ворса в технологии электрофлокирования и его влияние на выбор оптимального расстояния между электродами / О.М. Иванов, В.В. Безносова, Т.А. Анисимова // Тезисы докладов II Международной научно-практической конференции «Современное состояние легкой и текстильной промышленности: Инновации, эффективность, экологичность», Херсон: Издательство ХНТУ. – 2016 г. – С. 68 – 69.
13. Безносова, В.В. Ориентация ворса при движении между электродами в технологии электрофлокирования / В.В. Безносова // Всероссийская научная конференция молодых ученых «Инновации молодежной науки». Сборник тезисов. Санкт-Петербург. – 2016 г. – С. 293.
14. Безносова, В.В. Выбор расстояния между электродами в технологии электрофлокирования / В.В. Безносова, Т.А. Анисимова, С.Ю. Иванова // Международная научно-практическая конференция соискателей высшего образования и молодых ученых «Молодежь в науке и производстве – 2019: Инновационные технологии легкой промышленности», Херсон: Украина. – 2019 г. – С. 28 – 29.
15. Безносова, В.В. Анализ ориентации заряженного ворса в процессе движения при электрофлокировании / В.В. Безносова // Всероссийская научная конференция молодых ученых «Инновации молодежной науки». Сборник тезисов. Санкт-Петербург. – 2019 г. – С. 132 – 133.