

На правах рукописи

Анисимова Татьяна Александровна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ВОРСОВОГО
ПОКРОВА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ОРИЕНТАЦИИ ВОРСА В ТЕХНОЛОГИИ
ЭЛЕКТРОФЛОКИРОВАНИЯ**

Специальность 05.19.02 – «Технология и первичная обработка текстильных материалов и сырья»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт–Петербург
2022

Работа выполнена на кафедре «Технологии и проектирования текстильных изделий» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна».

Научный руководитель: **Иванов Олег Михайлович**
доктор технических наук, профессор, директор Института текстиля и моды, заведующий кафедрой технологии и проектирования текстильных изделий ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна»,

Официальные оппоненты: **Плеханов Алексей Фёдорович**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Российский государственный университет имени А. Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», заведующий кафедрой Текстильных технологий

Рымкевич Ольга Васильевна
кандидат технических наук, доцент, ФГБВОУ ВО «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» 153000, Ивановская область, город Иваново, Шереметевский проспект, дом 21

Защита диссертации состоится «30» июня 2022 г. в 12.00 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, 18, 437 аудитория.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна» по адресу: 190068, Санкт-Петербург, Вознесенский пр., д. 46, <http://sutd.ru/>.

Автореферат разослан: «__» мая 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.236.01
кандидат технических наук, доцент

Вагнер Виктория Игоревна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В различных отраслях хозяйства широко распространена технология электрофлокирования, позволяющая формировать на материалах и готовых изделиях ворсовое покрытие путем осаждения коротких заряженных ворсинок, ориентированных по силовым линиям электрического поля. Текущая ситуация в сфере производства показывает, что специалистами уже были получены некоторые экспериментальные и теоретические закономерности, описывающие кинетику волокна, механизм зарядки ворса, создано оборудование и разработан алгоритм получения ворсового покрытия на различных материалах и изделиях. Однако полученные результаты нельзя назвать окончательными и исчерпывающими.

Несмотря на то, что техника и технология производства к настоящему моменту уже сложились, следует обратить внимание на создание современных экономически выгодных способов получения флокированных материалов и изделий, используя методы электронно-ионной технологии.

Для решения возникающих задач необходимо сформировать более глубокое понимание процесса приобретения волокнами заряда, их ориентации на материале и через нее процесса формирования ворсового покрытия. Это позволит оптимизировать условия производства с целью достижения большей эффективности и продуктивности производства.

Цели и задачи исследования

Цели работы состояли в поиске способов оптимизации технологии электрофлокирования за счет создания новых более совершенных моделей процесса, применимых для различных направлений технологии, путем выявления закономерностей, учитывающих взаимосвязь свойств сырья и параметров электрического поля, с динамикой формирования ворсового покрытия путем углубленного изучения процесса зарядки ворсинок и их ориентации на поверхности с целью выбора наилучших режимов производства, прогнозирования производительности выпуска материала и его характеристик.

Задачами работы являлись:

- нахождение пути повышения стойкости к истиранию ворсового покрытия на основе разработки физической модели для оценки максимального заряда ворса с учетом его геометрических характеристик и напряженности электрического поля;
- анализ хода формирования ворсового покрытия на материале с учетом закономерностей ориентации ворса и изучения изменения параметра ориентации в процессе формирования ворсового покрытия;
- выбор межэлектродного расстояния для обеспечения максимальной плотности ворсового покрытия или стойкости к истиранию;
- анализ влияния свойств ворса на продолжительность формирования ворсового покрытия заданной плотности.

Методология исследования включает в себя как теоретические методы, использующие математический анализ, так и экспериментальные методы, применяемые в области электронно-ионной технологии. Также использованы специальные методы, присущие технологии электрофлокирования.

Обработка, обобщение и теоретизация полученных результатов проводились на основе методик статистической обработки, математического моделирования и системного подхода с применением современных способов, оборудования и программных продуктов.

Научная новизна работы. Проведен ряд теоретических и экспериментальных изысканий, развивающих и конкретизирующих представления об ориентации ворсинок в процессе формирования ворсового покрытия, динамике их зарядки и поведении в электрическом поле в процессе нанесения.

Предложена модель контактной зарядки ворса, дающая возможность достоверной оценки максимального заряда и коэффициента зарядки для ворса любой длины и диаметра и хорошо согласующаяся с результатами эксперимента. Получена взаимосвязь плотности тока и скорости поступления заряженного ворса к поверхности материала с долей максимального заряда ворса.

Предложена, теоретически обоснована и экспериментально подтверждена модель формирования ворсового покрытия при нанесении заряженного ворса в электрическом поле, основанная на новом понимании процесса его ориентации. Обнаружено существенное влияние ориентации ворса в начальный момент времени на процесс формирования ворсового покрытия.

Показана и обоснована связь относительной плотности ворсового покрытия на материале с относительной ориентацией ворса, которая не зависит от его параметров и условий его нанесения и носит общий характер.

Теоретическая значимость работы определяется разработанными математическими моделями, описывающими процесс формирования ворсового покрытия в технологии электрофлокирования.

В первую очередь сюда можно отнести методику расчета максимального заряда ворса в зависимости от длины и диаметра ворсинки, а также напряженности электрического поля.

Важной представляется полученная модель ориентации ворсинок на поверхности флокированного материала, полнее и глубже характеризующая динамику изменения плотности покрытия на материале.

На основе применения полученных моделей оказалось возможным осуществить поиск оптимальных характеристик ворса и условий его нанесения для различных критериев оптимизации.

Практическая значимость результатов заключается в возможности использования предложенных моделей приобретения волокном заряда и его распределения, а также ориентации ворсинок на поверхности флокированного материала для оптимизации технологии электрофлокирования по различным критериям.

Обосновано наличие оптимального значения заряда и коэффициента зарядки ворса, обеспечивающих наибольшую производительность.

Показана возможность подбора оптимального межэлектродного расстояния флокатора с учетом критерием производительности процесса и качества ворсового покрытия.

На основе анализа выявленных закономерностей предложены способы прогнозирования свойств выпускаемого материала. Предложена, теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность использования неоднородного электрического поля для улучшения ориентации ворса и увеличения производительности.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы представлялись на научно-технических конференциях: Всероссийская научная конференция молодых ученых «Инновации молодежной науки» (Санкт-Петербург, 2015, 2016, 2017); II Международная научно-практическая конференция «Современные тенденции легкой и текстильной промышленности: инновации, эффективность, экологичность» (Херсон, 2016); IV Международная конференция «Современные тенденции развития химии и технологии полимерных материалов» (Санкт-Петербург, 2018); Общероссийская научно-практическая конференция «55 лет кафедре конструирования и технологии изделий из кожи имени профессора А. С. Шварца» (Санкт-Петербург, 2019); Международная научная конференция, посвященная 110-летию со дня рождения профессора А. Г. Севостьянова (Москва, 2020); Инновационные материалы и технологии в дизайне: VI Всероссийская научно-практическая конференция с участием молодых ученых (Санкт-Петербург, 2020); Международная конференция «Инновационные направления развития науки о полимерных волокнистых и композиционных материалах» (Санкт-Петербург, 2020).

Публикации. Опубликованы 15 печатных работ, 8 – в рецензируемых журналах Перечня ВАК, 3 – в изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus.

Структура работы включает введение, основную часть из 5 глав, заключение в форме выводов, библиографический список из 103 источников. Объем работы – 143 страницы машинописного текста, содержит 62 рисунка и 32 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение включает обоснование актуальности работы; постановку цели и задач; определение предмета, объекта, методологической, теоретической и эмпирической базы; обоснование научной новизны, теоретической и практической значимости полученных результатов.

Первая глава работы содержит описание сущности, особенностей и фактического состояния технологии: общие сведения о технологическом процессе, используемом сырье и оборудовании, основные теоретические представления о механизмах формирования ворсового покрытия, производительности процесса и ее взаимосвязи с зарядом ворса и ориентацией на поверхности материала.

Вторая глава посвящена рассмотрению, проработке и моделированию зарядки ворсинок в процессе флокирования. Проведены анализ и моделирование распределения заряда по длине волокна в электрическом поле, проведена оценка его величины. Дополнительно учтено ограничение величины заряда влиянием коронного разряда. Расчетная модель оценки максимального заряда учитывает влияние напряженности электрического поля, электропроводности ворса и его геометрических размеров. Отмечается взаимосвязь распределения заряда на волокне с ориентацией ворса на материале.

Поскольку важнейшим параметром, характеризующим ворс и существенно влияющим на производительность нанесения и ориентацию флота на поверхности материала, является величина среднего заряда волокон, целесообразным представляется определить и экспериментально обосновать характер взаимосвязи заряда ворса с параметрами электрического поля и характеристиками ворса.

Величина заряда ворса определяется коэффициентом зарядки, k , который связан с электрофизическими свойствами волокна, и напряженностью электрического поля, E . В свою очередь, заряд влияет на плотность тока, скорость поступления ворса и его ориентацию на поверхности материала. Оценка величины заряда основана на соотношении (1), полученном Л. Д. Ландау и описывающем распределение плотности заряда проводящего цилиндрического объекта в однородном электрическом поле параллельно силовым линиям при отсутствии избыточного заряда,

$$\gamma(x) = \frac{4\pi\epsilon_0 E x}{\ln\left(4\frac{l^2/4 - x^2}{a^2/4}\right) - 2}, \quad (1)$$

где x – координата по длине ворсинки, м.

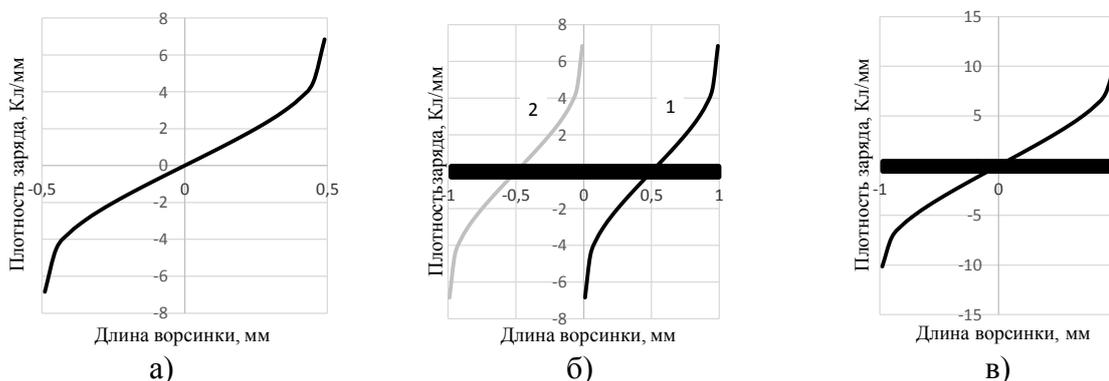


Рисунок 1 – Распределение плотности заряда на волокне

а) – для незаряженной, электропроводной частицы; б) – для ворсинки и «отражения» на электроде; в) – в момент отрыва от электрода

Процесс зарядки можно визуализировать следующим образом: распределение плотности заряда в соответствии с соотношением (1) при отсутствии избыточного заряда (рис.1а); ворсинка находится на поверхности электрода и на электроде за счет индукции формируется ее «зеркальное изображение» (рис.1б); заряд с ворсинки стекает на электрод, пока его плотность в точке касания электрода не станет равной нулю, что обеспечивает условие отрыва ворсинки от поверхности электрода (рис.1в).

Предложена аппроксимация (2), которая практически совпадает с соотношением (1), проста для интегрирования и дает возможность рассчитать максимально возможную величину заряда ворса:

$$\gamma(x) = a \frac{4\pi\varepsilon_0 E x}{\left[\left(\frac{l}{d}\right)^2 - \left(\frac{2x}{d}\right)^2\right]^n}, \quad (2)$$

где a и n – безразмерные коэффициенты, связанные с геометрическими характеристиками ворса: $a = \frac{17,96d+1,315}{l^{0,318}}$, $n = \frac{1,367d+0,113}{l^{0,29}}$.

После интегрирования соотношения (2) была получена формула для определения максимального заряда ворсинки с известными геометрическими размерами при заданной напряженности электрического поля (3)

$$q_{max} = a \frac{2\pi\varepsilon_0 E l^2}{(1-n)} \left(\frac{d}{2l}\right)^{2n}. \quad (3)$$

Результаты соответствующих расчетов для наиболее характерных соотношений длины и диаметра полиамидного ворса представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Расчет максимального заряда для ПА ворса с разными геометрическими характеристиками при напряженности 4 кВ/см

l, мм	T, текс	d, мм	a	n	q _{max} , Кл
0,5	0,17	0,014	0,509	0,166	8,23 · 10 ⁻¹³
0,5	0,33	0,020	0,592	0,189	9,25 · 10 ⁻¹³
1,0	0,33	0,020	0,495	0,161	2,98 · 10 ⁻¹²
1,5	0,67	0,027	0,506	0,163	6,51 · 10 ⁻¹²
2,0	0,67	0,027	0,472	0,153	1,07 · 10 ⁻¹¹
2,0	2,20	0,050	0,440	0,147	1,27 · 10 ⁻¹¹
3,0	2,20	0,050	0,490	0,158	2,57 · 10 ⁻¹¹

Для экспериментального подтверждения адекватности оценки максимального заряда ворса были измерены заряды для нескольких значений напряженности электрического поля. В таблице 2 представлены полученные результаты для ворса длиной 1 мм.

Таблица 2 – Расчетные и экспериментальные значения заряда ворса при разных напряженностях электрического поля

U, кВ	5	10	15	20	25	30
E, кВ/см	0,7	1,39	2,08	2,78	3,47	4,17
q, Кл	4,00 · 10 ⁻¹³	7,51 · 10 ⁻¹³	1,12 · 10 ⁻¹²	1,50 · 10 ⁻¹²	2,19 · 10 ⁻¹²	2,41 · 10 ⁻¹²
k, Кл·м/В	5,71 · 10 ⁻¹³	5,40 · 10 ⁻¹³	5,38 · 10 ⁻¹³	5,40 · 10 ⁻¹³	6,31 · 10 ⁻¹³	5,78 · 10 ⁻¹³
q _{max} , Кл	5,215 · 10 ⁻¹³	1,04 · 10 ⁻¹²	1,55 · 10 ⁻¹²	2,07 · 10 ⁻¹²	2,59 · 10 ⁻¹²	3,11 · 10 ⁻¹²
q/q _{max}	0,77	0,72	0,72	0,72	0,84	0,77

Результаты показывают, что все полученные эмпирическим путем величины заряда не превышают расчетных максимальных значений, при этом коэффициент зарядки и доля от максимального значения заряда ворсинок остаются постоянными во всем диапазоне изменения напряженности, $E: k = (5,66 \pm 0,38) \cdot 10^{-18}$ Кл · м/В; $\Delta k/k = 6,7\%$. Средние значения относительного заряда: $\delta = q/q_{max} = 0,76 \pm 0,05$ при относительной погрешности $\Delta\delta/\delta = 6,6\%$. Т. е. доля от максимально возможного значения заряда и коэффициента зарядки ворса определяются электрофизическими характеристиками ворса, такими как электропроводность или сопротивление.

Помимо этого, были проведены измерения зависимости заряда ворса от напряженности электрического поля для нескольких величин межэлектродного расстояния ($h = 7$ см и $h = 10$ см). Расчет коэффициентов зарядки показал: $k (h = 7 \text{ см}) = (3,34 \pm 0,31) \cdot 10^{-18}$ Кл м/В; $k (h = 10 \text{ см}) = (2,96 \pm 0,11) \cdot 10^{-18}$ Кл · м/В, что подтверждает предположение о преимущественном влиянии напряженности электрического поля у поверхности заряжающего электрода.

Представленные значения зарядов являются максимально возможными в данной модели процесса зарядки, однако существует ряд явлений, которые могут ограничивать величину заряда. Одно из таких явлений – коронный разряд на конце ворсинки при высокой напряженности электрического поля около него. Тогда, при выполнении неравенства (4), заряд ворса ограничен.

$$q_{max} = a \frac{\pi\varepsilon_0 E l^2}{2(1-n)} \left(\frac{d}{2l}\right)^{2n} > q_{max} = \frac{\pi d \varepsilon_0}{4} l E_{к.р.}, \quad (4)$$

где $E_{к.р.}$ – напряженность начала коронного разряда, В/м ($E^- = 265$ кВ/см, $E^+ = 300$ кВ/см).

Возрастание электропроводности волокна не обязательно приводит к росту заряда, однако зачастую становится причиной снижения максимального значения заряда волокон в силу его быстрого стекания на электрод, поскольку плотность заряда не успеет достаточно вырасти к моменту отрыва ворсинки от электрода. Исходя из этого, должна существовать электропроводность ворса, λ , при которой достигается максимальное значение заряда (рис. 2). Соответствующее эмпирическое соотношение имеет вид (5)

$$q = 2,39 \cdot q_{max} (\lambda/\lambda_0) \cdot e^{-\lambda/\lambda_0}, \quad (5)$$

где $\lambda_0 = 5,55 \cdot 10^{-8}$ 1 / (Ом · м) – полученная эмпирическим путем постоянная.

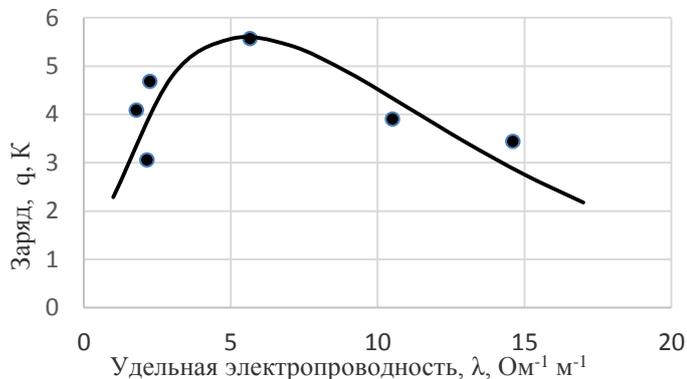


Рисунок 2 – Влияние удельной электропроводности на заряд ворса

Предлагаемый взгляд на процесс получения волокном заряда и его распределение по длине позволил получить методику и соотношения для оценки максимального заряда ворса различной природы и геометрических размеров при любой напряженности электрического поля. Определены условия расчета заряда с учетом возможности возникновения коронного разряда с конца ворсинки.

Использование в расчетах доли максимального заряда ворса открывает возможность унификации при различных расчетах для ворса разных длин, диаметров и при разной напряженности.

Поскольку коэффициент зарядки ворса, как было показано ранее, определяет максимальную скорость поступления флюка к поверхности ворсуемого материала $P_{max} = \epsilon_0 C/k$, значит полученная модель позволит также оценивать еще и эту важнейшую технологическую характеристику процесса флокирования.

Третья глава затрагивает основные вопросы, связанные с ориентацией ворса в процессе формирования ворсового покрытия: моделирование ориентации ворса при возрастании плотности ворсового покрытия, анализ динамики формирования покрытия на материале на основе модели ориентации ворса, исследование связей между относительной плотностью ворсового покрытия на материале и относительной ориентацией ворса, оценка влияния межэлектродного расстояния на ориентацию ворсинок в ходе нанесения.

Ориентацией ворсинок на материале принято называть их распределение по углам наклона к нормали относительно поверхности материала после их внедрения в клеевой слой, которое может быть описано нормальным законом (6) и определяется параметром распределения, σ (среднеквадратичным отклонением), численно характеризующим ориентацию ворса (меньшее значение соответствует лучшей ориентации ворсинок):

$$p(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\varphi-\varphi_0)^2}{2\sigma^2}}, \quad (6)$$

где φ_0 – величина угла наклона, соответствующая центру распределения.

Рассматривая ход формирования ворсового покрытия, можно предполагать, что в изначально свободную поверхность клея способны внедриться все прилетевшие ворсинки. По мере роста их количества на поверхности, сокращается размер промежутков между ними, а значит, достичь клеевого слоя и закрепиться могут только те ворсинки, которые лучше ориентированы. В итоге площадь поверхности материала, покрытая связующим, окажется полностью заполнена ворсом, и новые волокна достичь ее уже не смогут. Таким образом

обеспечивается предельная плотность ворсового покрытия – по мере роста увеличения плотности ворсового покрытия ориентация становится лучше, значение параметра σ снижается.



Рисунок 3 – Распределение ворсинок по углам наклона

1 – начальное, 2 – соответствующее значению предельной плотности

Описание распределения ворсинок по углам наклона законом Гаусса является приближенным, т. к. нормальное распределение предполагает варьирование по оси абсцисс от $-\infty$ до $+\infty$, в то время как угол наклона ворсинок может меняться от $-\pi/2$ до $+\pi/2$ или от -90° до $+90^\circ$, тем не менее, доля ворсинок с углом отклонения больше $\pi/4$ не превышает 3–5 %.

На основе описанной выше динамики были предложены модель ориентации ворса и модель формирования ворсового покрытия, сформулированная на ее основе.

Можно предположить, что рост плотности ворсового покрытия прямо пропорционален, во-первых, скорости поступления волокон к поверхности ворсуемого материала и, во-вторых, вероятности их закрепления в связующем. Вероятность при этом характеризуется интегралом (8), аргумент которого выражается соотношением (7)

$$\Phi(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^X e^{-X^2/2} dX, \quad (7)$$

$$X = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{ld}{\sqrt{2\pi}} \sigma n \right), \quad (8)$$

Поскольку часть площади поверхности материала, занимаемая ворсинками, определяется как $\frac{s}{s_0} = \frac{ld}{\sqrt{2\pi}} \sigma n$, аргумент функции, X , варьируется от $\pi/2$ при $n = 0$ (все ворсинки внедряются) до 0 при n , приближенной к предельной (ворсинки внедряться не могут), $\sigma(n_{\max}) = \frac{\sqrt{2\pi}}{ldn_{\max}}$.

Рост плотности ворсового слоя, с математической точки зрения, описывается соотношением (9)

$$\frac{dn}{dt} = 2P \cdot \Phi \left[\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{ld}{\sqrt{2\pi}} \sigma n \right) \right]. \quad (9)$$

Эмпирическая зависимость плотности покрытия от времени нанесения (10), производная которой имеет вид (11)

$$n(t) = n_{\max} (1 - e^{-t/\tau}), \quad (10)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n_{\max}}{\tau} e^{-t/\tau}, \quad (11)$$

где τ – постоянная времени, характеризующая динамику роста плотности ворсового покрытия, с; t – время нанесения ворса, с.

Объединив зависимости (9) и (11) с учетом связи $\tau = n_{\max} / P$, можно получить соотношение (12),

$$\Phi \left[\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{ld}{\sqrt{2\pi}} \sigma n \right) \right] = \frac{1}{2} e^{-t/\tau}. \quad (12)$$

Эксперимент показал, что ориентация ворса становится лучше по ходу заполнения поверхности материала ворсом, что выражается эмпирическим соотношением (13)

$$\sigma = \sigma_0 - Kn, \quad (13)$$

где σ – параметр ориентации ворса, σ_0 – параметр ориентации ворса в начальный момент времени флокирования; n – плотность покрытия ($1/\text{мм}^2$); K – эмпирический коэффициент скорости изменения ориентации.

Записав это соотношение для предельной плотности ворсового покрытия и воспользовавшись формулой $\sigma(n_{\max})$, получаем:

$$\frac{\sqrt{2\pi}}{\ln n_{\max}} = \sigma_0 - K n_{\max}. \quad (14)$$

Выразив из (14) K , получим зависимость параметра σ от плотности ворсового покрытия, n , (15)

$$\sigma = \sigma_0 - \frac{n}{n_{\max}} \cdot \left(\sigma_0 - \frac{\sqrt{2\pi}}{\ln n_{\max}} \right). \quad (15)$$

Далее на основе экспериментальных значений $n(t)$ можно определить X , а также вычислить величину начальной ориентации из выражения (16)

$$\sigma_0 = \frac{n_{\max}}{n_{\max} - n} \cdot \left[\sigma - \sigma_{\max} \frac{n}{n_{\max}} \right]. \quad (16)$$

Предложенная методика дает возможность численно оценивать параметр ориентации, не используя при этом значения n_{\max} и τ , получаемые на базе традиционной модели и экспериментальных данных, основываясь только на предлагаемой модели формирования ворсового покрытия, причем критерием выбора указанных параметров служит соотношение (17)

$$\Delta = \sum \left\{ \Phi \left[\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{ld}{\sqrt{2\pi}} \sigma n \right) \right] - \frac{1}{2} e^{-\frac{t}{\tau}} \right\}^2 = \min. \quad (17)$$

Результаты расчетов, полученные с использованием опции «Поиск решения» программы MS «Excel» (для полиамидного ворса, $l = 1$ мм, $T = 0,33$ текс, $d = 20$ мкм) и сравнение результатов измерений параметра ориентации с вычислениями для двух отличных по длине ворсов представлены в табл. 3 и 4.

Таблица 3 - Результаты расчета параметров процесса

σ_0 , рад	τ , с	K	n_{\max} , 1/мм ²	σ_{\max} , рад
0,81	6,98	0,0013	309,0	0,404

Таблица 4 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений ориентации ворса

ПА, $l = 1$ мм, $T = 0,33$ текс, $d = 20$ мкм				ПА, $l = 0,5$ мм, $T = 0,33$ текс, $d = 20$ мкм			
t , с	n , г/м ²	σ , град.	σ_p , град.	t , с	n , г/м ²	σ , град.	σ_p , град.
4	30,62	44,67	39,41	2	26,25	34,65	36,81
8	47,81	37,80	35,51	5	73,75	25,59	28,56
12	66,88	36,30	31,17	10	83,75	25,44	26,82
16	71,56	31,40	30,10	15	82,50	23,49	27,04

Результаты соответствующих вычислений с использованием традиционной модели (10) (сплошная линия), предлагаемой модели (12) (пунктирная линия), а также экспериментальные значения (массив точек) представлены на рис. 4.

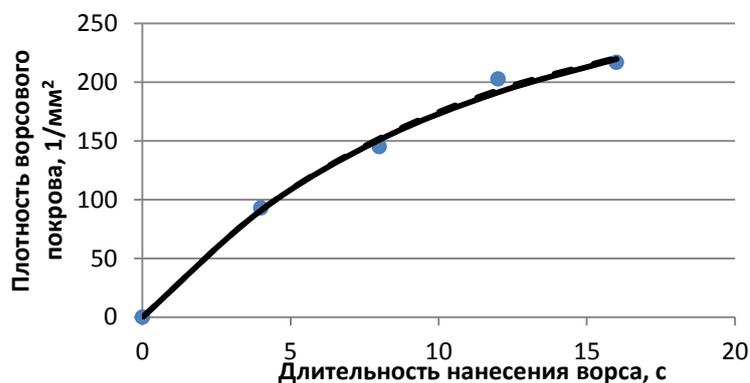


Рисунок 4 – Поверхностная плотность ворсового покрытия в зависимости от длительности нанесения

Расчеты показывают адекватность предложенной модели, но, помимо этого, данная модель позволяет оценивать характер изменения ориентации ворса в процессе формирования покрытия.

Далее в работе высказано предположение, что зависимость относительной плотности ворсового покрытия, n/n_{\max} , от относительной длительности флокирования, t/τ , носит достаточно универсальный характер. Если это так, то любая зависимость плотности ворсового покрытия от продолжительности нанесения в таких координатах будет ложиться на одну кривую. На рис. 5 представлена кривая и экспериментальные значения

относительной плотности ворсового покрытия для 5 серий измерений при различных условиях флокирования и для различного ворса.

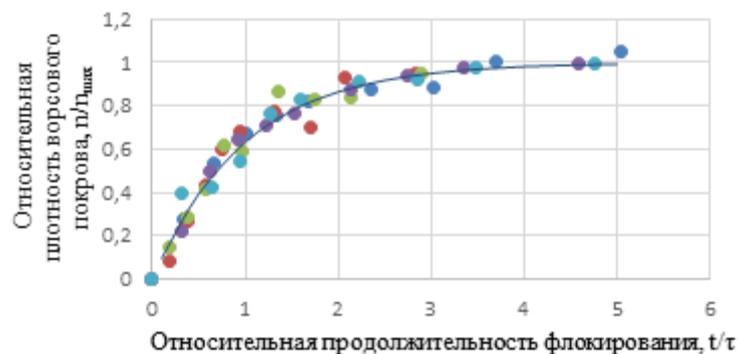


Рисунок 5 – Относительная плотность ворсового покрова (n/n_{\max}) от относительной длительности флокирования (t/τ)

Результаты расчетов относительной ориентации, σ/σ_{\max} , и относительной плотности ворсового покрова, n/n_{\max} , от относительной длительности флокирования, t/τ , на основе соотношения (12) представлены в табл. 5.

Таблица 5 – Взаимосвязь относительных параметров нанесения

t/τ	0,1	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
n/n_{\max}	0,095	0,393	0,632	0,777	0,864	0,918	0,95	0,97	0,982	0,989	0,993
σ/σ_{\max}	1,268	1,161	1,10	1,055	1,031	1,018	1,0105	1,0063	1,0038	1,0023	1,0014

Полученная зависимость $\sigma / \sigma_{\max} = f(n/n_{\max})$ является линейной (рис. 6) и применимой для ворса любой геометрии при разных условиях нанесения.

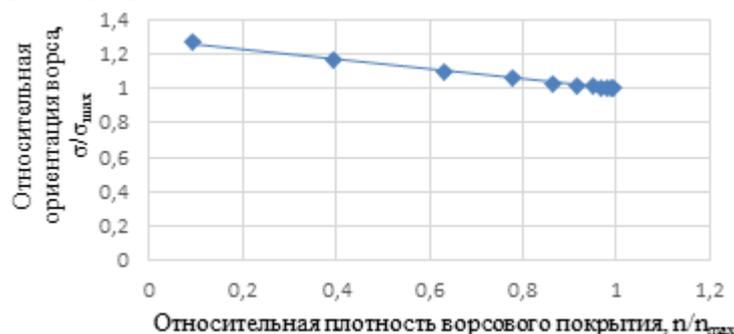


Рисунок 6 – Зависимость относительной ориентации от относительной плотности ворсового покрытия

Таким образом, значения коэффициентов зависимости относительной ориентации (σ/σ_{\max}) от относительной плотности ворсового покрытия (n/n_{\max}) сохраняются постоянными при различных значениях τ и n_{\max} , а соответствующее соотношение является справедливым для ворса различной геометрии (табл. 6, рис. 7):

$$\sigma / \sigma_{\max} = \sigma_0 / \sigma_{\max} - K \cdot n / n_{\max} = 1,286 - 0,286 \cdot n / n_{\max}. \quad (18)$$

Таблица 6 – Определение параметров ориентации для ворса разной геометрии

$n_{\max}, \Gamma/\text{M}^2$	$n_{\max}, 1/\text{MM}^2$	τ, c	l, MM	d, MM	$T, \text{текст}$	$\sigma(n_{\max}), \text{рад.}$	σ_0 / σ_{\max}	K
120	363,6	3	1	0,02	0,33	0,345	1,272	0,278
120	363,6	6	1	0,02	0,33	0,345	1,279	0,284
160	484,8	6	1	0,02	0,33	0,258	1,279	0,284
400	60,6	5	3	0,05	2,2	0,276	1,276	0,279
400	60,6	10	3	0,05	2,2	0,276	1,285	0,292
500	75,7	10	3	0,05	2,2	0,221	1,285	0,292

Исходя из этого, предложены соотношения для параметров ориентации (19), где a_0 и a_1 - эмпирические коэффициенты, равные $a_0 = 1,286$; $a_1 = 0,286$:

$$\sigma_0 = \frac{a_0 \sqrt{2\pi}}{\text{ld}n_{\max}} ; \sigma_{\max} = \frac{(a_0 - a_1) \sqrt{2\pi}}{\text{ld}n_{\max}} ; K = \frac{a_1 \sqrt{2\pi}}{\text{ld}n_{\max}^2}. \quad (19)$$

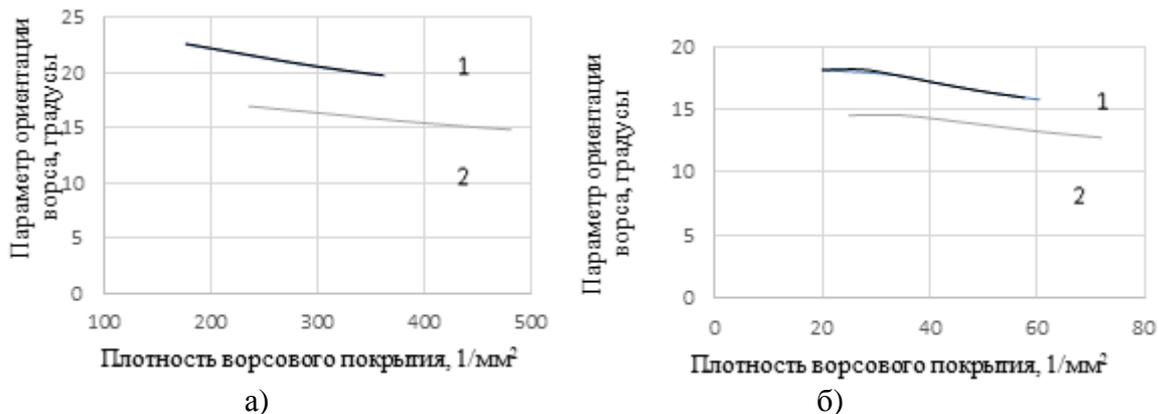


Рисунок 7 – Изменение ориентации с ростом плотности ворсового слоя

а) 1 – $n_{\max} = 364 \text{ 1/мм}^2$, $\tau = 6 \text{ с}$; 2 – $n_{\max} = 485 \text{ 1/мм}^2$, $\tau = 6 \text{ с}$;

б) 1 – $n_{\max} = 60,6 \text{ 1/мм}^2$, $\tau = 10 \text{ с}$; 2 – $n_{\max} = 75,8 \text{ 1/мм}^2$, $\tau = 6 \text{ с}$

Таким образом, изменение ориентации ворса в процессе формирования ворсового покрытия для относительных показателей будет постоянным для любого ворса и условий флокирования.

Предлагаемые представления об ориентации ворса в процессе формирования ворсового покрытия на флокированном материале позволили получить математическую модель, дающую возможность расчета поверхностной плотности ворсового покрытия при различной длительности нанесения и оценки ориентации ворса от начального момента до момента достижения предельного значения плотности ворсового покрытия.

Полученная модель, основанная на представлении об ориентации, позволила связать начальную ориентацию ворса с его геометрическими характеристиками и предельной плотностью.

Четвертая глава описывает пути оптимизации, основывающиеся на выявленных взаимосвязях и предлагаемых моделях технологического процесса. Задача оптимизации при этом сводится к выбору режима нанесения и свойств ворса, которые обеспечивали бы минимально возможное время формирования ворсового покрытия заданной плотности для заданных значений напряжения и напряженности поля (100 кВ и 6 кВ/см).

Время формирования покрытия заданной плотности можно вычислить с использованием модели роста плотности ворсового покрытия (20):

$$t_1 = -\frac{n_{\max}}{p} \ln(1 - n_0/n_{\max}), \quad (20)$$

где n_0 – плотность ворсового покрытия при отсутствии электрического поля, г/м^2 ; а – коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств ворса, $\text{г/(В}\cdot\text{м)}$.

Известно, что максимально возможное значение скорости подачи волокон в зону нанесения от напряжения и напряженности электрического поля не зависит, а значит интенсифицировать нанесение за счет стимуляции поступления потока ворса можно лишь в определенных пределах, задаваемых свойствами ворса. Другим способом ускорения процесса является улучшение ориентации ворса с целью достижения максимальной плотности ворсового слоя путем увеличения напряженности электрического поля.

В результате эксперимента было обнаружено, что предельная плотность ворсового покрытия связана с напряженностью поля линейно как $n_{\max} = n_{m0} + \beta E$, где постоянная n_{m0} и коэффициент β зависят от геометрии и электрофизических свойств волокна. С другой стороны, $q = k \cdot E$, при этом величина «дипольного момента» ворсинки, влияющего на ее ориентацию, связана с величиной заряда, а значит, с учетом коэффициента зарядки ворса при заданном значении напряженности, $n_{\max} = n_0 + b \cdot k \cdot E$, где b – коэффициент пропорциональности, $\text{г / (м}^2 \cdot \text{Кл)}$.

Подставив значение максимальной скорости подачи ворса и приведенное выше эмпирическое выражение, получим соотношение (21), из которого можно вычислить коэффициент зарядки ворса для минимальной длительности нанесения, обеспечивающий формирование необходимой плотности ворсового покрытия при заданной напряженности электрического поля

$$t_0 = -\frac{(n_0 + a \cdot k \cdot E)k}{\varepsilon_0 C} \ln \left(1 - \frac{n_T}{n_0 + a \cdot k \cdot E} \right). \quad (21)$$

где n_T – требуемая плотность ворсового покрытия.

Пример зависимости длительности нанесения от доли максимального заряда ворса ($l = 1$ мм, $T = 0,33$ текс) при получении покрытия плотностью 80 г/м² для разных значений напряженности показан на рис. 8, который доказывает наличие минимальной продолжительности флокирования при определенном значении заряда или коэффициента зарядки ворса.

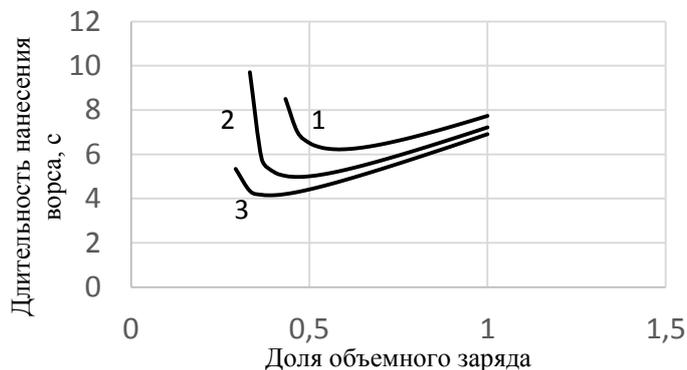


Рисунок 8 – Зависимость длительности флокирования от доли максимального заряда ($1 - E = 4$ кВ/см; $2 - E = 5$ кВ/см; $3 - E = 6$ кВ/см)

Помимо условий нанесения ворса, связанных с режимом работы оборудования, большое влияние на скорость нанесения ворса, производительность процесса и время получения заданной плотности ворсового покрытия на материале оказывают параметры ворса. Наибольший интерес представляют при этом электрофизические параметры, а именно, коэффициент зарядки.

При этом ясно, что лучшими условиями нанесения и лучшим ворсом будут те из них, комбинация которых одновременно дала бы максимальную предельную плотность ворсового покрытия и скорость подачи. Максимум предельной плотности, при прочих равных условиях, достигается путем поддержания наибольшей для данного флокирующего устройства напряженности электрического поля в зоне нанесения, поэтому оптимизацию можно осуществлять, основываясь на влиянии коэффициента зарядки ворса на скорость подачи ворса (рис. 9).

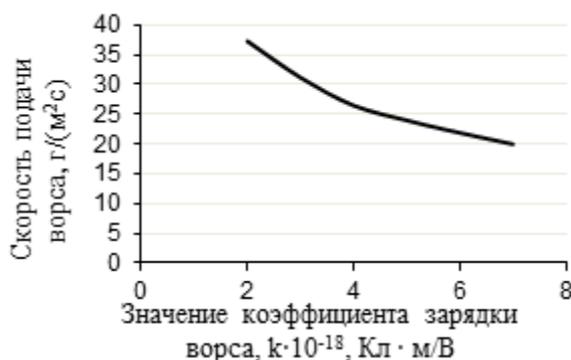


Рисунок 9 – Влияние на скорость поступления ворса коэффициента зарядки и межэлектродного расстояния

Выбор более эффективного режима нанесения может осуществляться путем подбора оптимальных показателей коэффициента зарядки ворса и минимально допустимого межэлектродного расстояния, которые, кроме того, сообщали бы ворсинкам нужную энергию при наименьшей из возможных величин напряженности электрического поля, что является актуальным для промышленного производства.

Предложенный подход позволяет рассчитать конкретные значения оптимальных коэффициентов зарядки, обеспечивающих минимальную продолжительность флокирования для получения заданной плотности ворсового покрытия. Кроме этого, продолжительность нанесения ворса и производительность можно рассчитать для любого значения коэффициента зарядки, хотя это и не будет оптимальным значением.

Пятая глава содержит предложение и экспериментальное обоснование возможности применения неоднородного электрического поля для создания условий нанесения, обеспечивающих ворсу лучшую ориентацию на начальном этапе нанесения, что может сделать дальнейшее нанесение более продуктивным.

Одним из способов улучшения начальной ориентации может быть применение неоднородного электрического поля путем использования дополнительного цилиндрического электрода.

Для оценки возможности реализации и потенциальной эффективности описанного выше способа использовалась лабораторная установка (рис. 10), дающая возможность изготавливать образцы при одинаковом времени нанесения с использованием дополнительного электрода (нанесение из положения «а») и без него (нанесение из положения «б»).

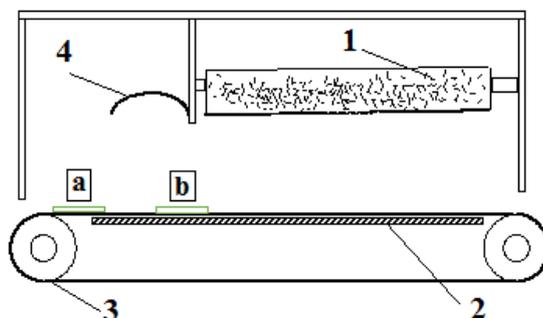


Рисунок 10 – Схема оснащенного дополнительным цилиндрическим электродом лабораторного стенда

1 – верхний электрод (бункер с сетчатым дном), 2 – нижний электрод, 3 – транспортер, 4 – дополнительный электрод

Для каждого из полученных образцов из 5 видов полиамидного ворса ($T = 0,33$ текс, $l = 0,5$ мм) с разными электрофизическими параметрами наблюдалось существенное повышение поверхностной плотности формируемого ворсового покрытия при одинаковом времени нанесения, Δn (табл. 7).

Таблица 7 – Сводная таблица технологических параметров исследуемых образцов материалов

№ п/п	$\lambda, \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{ м}^{-1}$	$\Delta n, \text{ г/м}^2$	$n_{\text{max}}, \text{ г/м}^2$	$P, \text{ г/м}^2 \cdot \text{ с}$
1	$2,17 \cdot 10^{-8}$	13,52	123,9	18,06
2	$1,94 \cdot 10^{-7}$	10,4	86,5	26,2
3	$1,61 \cdot 10^{-8}$	6,48	92,7	24,86
4	$3,56 \cdot 10^{-8}$	7,36	83,3	43,2
5	$1,89 \cdot 10^{-8}$	4,38	44,2	14,04

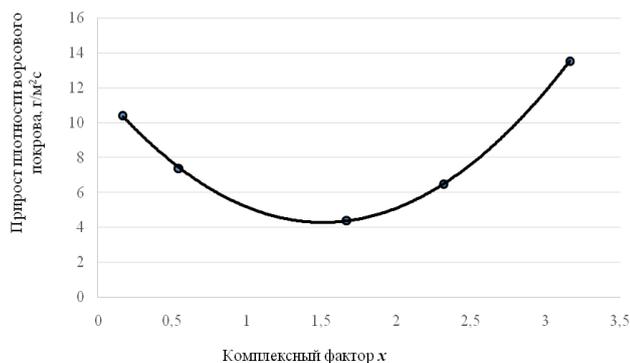


Рисунок 11 – Увеличение плотности ворсового покрытия в зависимости от комплексного критерия x

На базе полученных результатов с использованием комплексного критерия построено регрессионное уравнение $x = n_{\text{max}} / P \cdot \lambda \cdot 10^9$, связывающее технологические параметры процесса со значением превышения значения плотности по сравнению с нанесением в стандартном режиме.

Его адекватность видна из рисунка 11, на котором приведены значения привеса плотности ворсового покрытия в зависимости от комплексного критерия x , полученные экспериментально и расчетным путем. Большая величина плотности ворсового покрытия, соответствующая большим значениям критерия x , наблюдается при меньших скоростях подачи ворса и большей предельной плотности ворсового покрытия, что соответствует ворсу с большим коэффициентом зарядки, который подвержен более сильному влиянию электрического поля, а значит и его ориентация может быть значительно улучшена путем использования неоднородного электрического поля.

Оценить эффективность применения неоднородного электрического поля можно путем сравнения годового объема выпуска рулонного флокированного материала производимого традиционным способом и с применением неоднородного электрического поля на основе проведенных исследований.

Так для производства флокированного материала с применением полиамидного ворса $T = 0,33$ текс, $l = 0,5$ мм, $R = 4,2 \cdot 10^7$ Ом при скорости подачи $P = 43$ г/м²с и заданной поверхностной плотности ворсового покрытия $p_0 = 75$ г/м² для достижения требуемой поверхностной плотности ворсового покрытия, p_0 , необходимы время нанесения без использования неоднородного поля $t_1 = 4,5$ с и с его использованием $t_2 = 3,4$ с.

Скорость выпуска материала V , м/мин, без использования неоднородного поля (V_1) и с его использованием (V_2), которая определяется как $V = L / t$, при длине флокатора $L = 1$ м: $V_1 = 13,33$ м/мин, $V_2 = 17,65$ м/мин.

Исходя из полученных значений скорости выпуска материала, объем выпуска продукции, $B = \Pi \cdot V \cdot T_{см}$, м²/год, без использования неоднородного поля (B_1) и с его использованием (B_2) при ширине материала 1,5 м и двухсменном рабочем графике, при этом Π – ширина выпускаемого материала, м; $T_{см}$ – время рабочей смены в году, ч: $B_1 = 4\,788\,000$ м²/год; $B_2 = 6\,354\,000$ м²/год.

Конечные результаты оценки эффективности использования неоднородного электрического поля приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Результаты оценки эффективности использования неоднородного электрического поля

Показатели	С использованием однородного эл. поля	С использованием однородного и неоднородного эл/ полей
Требуемая плотность ворсового покрова, г/м ²	75	75
Скорость выпуска рулонного материала, м/мин	13,3	17,6
Объем выпуска рулонного материала, млн м ² /год	4,8	6,4
Дополнительный объем выпуска рулонного материала, млн м ² /год	-	1,57

Видно, что использование неоднородного электрического поля дает значительный прирост объема выпуска материала.

ВЫВОДЫ

В ходе научно-исследовательской работы был проведен ряд теоретических и экспериментальных изысканий, уточняющих и конкретизирующих существующие взгляды на динамику формирования ворсового покрытия на поверхности материала в электрическом поле по технологии электрофлокирования.

1. Предложена новая модель оценки заряда ворса в технологии электрофлокирования, позволяющая рассчитать максимальный заряд для ворса любых геометрических размеров и напряженности электрического поля с учетом ограничения при возникновении коронного разряда. Экспериментальные результаты показали ее адекватность.

2. Получено распределение для заряда ворса по длине ворсинки, который существенно влияет на ориентацию волокон при движении в межэлектродном пространстве и фактически определяет ее в начальный момент времени.

3. Для оценки максимального значения скорости притока ворса к поверхности ворсуемого материала, определяемого коэффициентом зарядки ворса, проведены экспериментальные исследования и получено эмпирическое соотношение, связывающее электропроводность ворса с величиной его заряда и коэффициентом зарядки.

4. На основе существующих представлений об ориентации флюка на материале разработана теоретическая модель формирования ворсового покрытия, использующая в качестве параметра ориентации среднеквадратичное отклонения угла наклона ворсинок от вертикали. Обнаружены и обоснованы закономерности изменения параметра ориентации с ростом плотности ворсового покрытия.

5. Представлены результаты исследований, подтверждающие сформулированную модель ориентации и характер изменения плотности распределения ворсинок по углам наклона при возрастании поверхностной плотности ворсового покрытия.

6. Предложена модель, описывающая характер изменения ориентации ворса на материале в ходе флокирования и количественно определяющая взаимосвязь начальной и конечной ориентации ворса.

7. Обоснована связь относительной плотности ворсового покрытия с относительной ориентацией ворса и для любых условий процесса и любого ворса, который может быть использован в технологии электрофлокирования.

8. Анализ влияния межэлектродного расстояния на ориентацию ворса с разными геометрическими и электрофизическими характеристиками при его нанесении в электрическом поле позволил выявить тенденцию к увеличению плотности ворсового покрытия при уменьшении межэлектродного расстояния. Это позволило предложить методику определения оптимального значения межэлектродного расстояния.

9. Предложена методика определения оптимального значения коэффициента зарядки, обеспечивающего минимальную продолжительность времени для создания ворсового покрытия требуемой плотности.

10. Предложена и экспериментально подтверждена возможность улучшения ориентации ворса на начальном этапе нанесения путем использования неоднородного электрического поля. Получено экспериментальное соотношение для оценки величины прироста плотности ворсового покрытия достигаемой за счет применения неоднородного поля в сравнении со стандартными условиями нанесения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

Публикации в изданиях из перечня ВАК РФ

1. Иванов, О. М. Повышение эффективности процесса электрофлокирования / О. М. Иванов, Н. А. Бабина, В. В. Безносова, Т. А. Анисимова // «Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности». – 2015. – №2. – С. 54 – 57.
2. Иванов, О. М. Оценка технологических параметров процесса электрофлокирования на основе измерения электропроводности ворса / О. М. Иванов, В. В. Безносова, Т. А. Анисимова // «Известия вузов. Технология легкой промышленности». – 2016. – №3. – С. 48 – 51.
3. Иванов, О. М. Выбор межэлектродного расстояния в технологии электрофлокирования / О. М. Иванов, Т. А. Анисимова, В. В. Безносова [и др.] // «Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна». – 2017. – №3. – С. 133 – 138.
4. Иванов, О. М. Ориентация ворса в процессе формирования ворсового покрова на флокированном материале / О. М. Иванов, Т. А. Анисимова, С. Ю. Иванова // «Химические волокна». – 2018. – №4. – С. 8 – 11.
5. Иванов, О. М. Влияние ориентации ворса на формирование ворсового покрова флокированного материала / О. М. Иванов, Т. А. Анисимова, С. Ю. Иванова // «Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности». – 2020. – №1. – С. 68 – 73.
6. Иванов, О. М. Ограничения заряда ворса в технологии электрофлокирования / О. М. Иванов, Т. А. Анисимова, С. Ю. Иванова // «Химические волокна». – 2020. – №5. – С. 29 – 32.
7. Иванов, О. М. Теоретический анализ влияния заряда ворса в технологии электрофлокирования / О. М. Иванов, Т. А. Анисимова, В. В. Безносова [и др.] // Химические волокна. – 2020. – № 2. – С. 16 – 20.

8. Иванов, О. М. Теоретический анализ формирования ворсового покрова в технологии электрофлокирования на основе модели ориентации ворса / О. М. Иванов, Т. А. Анисимова // «Технология текстильной промышленности». – 2021. – №2. – С. 46 – 50.

Прочие публикации

9. Анисимова, Т.А. Использование неоднородного электрического поля для повышения эффективности процесса электрофлокирования / Т.А. Анисимова, Н.А. Бабина // Вестник молодых ученых Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. – 2015. – №1. – С. 9 – 13.

10. Анисимова, Т.А. Ориентация ворса на поверхности флокированного материала при разной плотности ворсового покрова / Т.А. Анисимова, В.В. Безносова, Н.А. Бабина // Вестник молодых ученых Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. – 2016. – №1. – С. 32 – 38.

11. 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 дизайна. – 2016. – №1. – С. 50–55.

12. Иванов, О. М. 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». – 2016. – С. 68 – 71.

13. Иванов, О. М. Отделка галантерейных изделий с использованием технологии электрофлокирования / О. М. Иванов, Т. А. Анисимова, Н. А. Бабина // «55 лет кафедре конструирования и технологии изделий из кожи имени профессора А.С. Шварца: мат-любщерос. науч.-практ. конф., 6-7 декабря 2018». – 2019. – С. 99 – 107.

14. Иванов, О. М. Влияние заряда ворса на длительность процесса флокирования / О. М. Иванов, Т. А. Анисимова // Инновационные материалы и технологии в дизайне: VI Всероссийская научно-практическая конференция с участием молодых ученых (Санкт-Петербург, 26, 27 марта 2020 г.): тезисы докладов / редкол.: О. Э. Бабкин (отв. ред.) [и др.]. – Санкт-Петербург: СПбГИКиТ, 2020. – С. 83 – 84.

15. Кассир, И. А. Скорость формирования ворсового покрытия при флокировании для разных вариантов поступления ворса / И. А. Кассир, О. М. Иванов, Т. А. Анисимова // СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ Международной научной конференции, посвященной 110-летию со дня рождения профессора А. Г. Севостьянова (10 марта 2020 г.). Часть 2. – М.: РГУ им. А. Н. Косыгина, 2020. – С. 239 – 242.