

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна**

О. М. Иванов

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОФЛОКИРОВАНИЯ

Монография

Санкт-Петербург
2022

УДК 677.027.653

ББК 37.237.1

И20

Рецензенты:

кандидат технических наук, директор ООО «Зевс»

Е. В. Зырянов;

генеральный директор ООО «Синтез»

М. Н. Рыбальченко

Иванов, О. М.

И20 Теоретические основы и применение технологии электрофлорирования: монография / О. М. Иванов. – Санкт-Петербург: ФГБОУВО «СПбГУПТД», 2022. – 271 с.

ISBN 978-5-7937-2183-7

В монографии изложены теоретические разделы, касающиеся вопросов зарядки ворса в электрическом поле, его движения и ориентации, процесса формирования ворсового покрытия, взаимодействия заряженных волокон с электрическим полем, а также практические разделы, относящиеся к технологии формирования ворсового покрытия на различных материалах и изделиях и оборудованию, применяемому для реализации этих технологий.

Предназначена для научных и инженерно-технических сотрудников текстильной и легкой промышленности, а также аспирантов и обучающихся соответствующих направлений подготовки. Может быть полезна работающим в других областях электронно-ионной технологии.

УДК 677.027.653

ББК 37.237.1

ISBN 978-5-7937-2183-7

© ФГБОУВО «СПбГУПТД», 2022

© Иванов О. М., 2022

ВВЕДЕНИЕ

Развитие теории электричества позволяет использовать взаимодействие электрического поля и зарядов, связанных с различными частицами, для управления потоками таких заряженных частиц, создавая их целенаправленное и упорядоченное движение [1], [7].

Электрические силы, действующие на частицы вещества, в электрическом поле, вообще говоря, не велики и приложены к малым зарядам [1]–[6], располагающимся на поверхности частиц. Поэтому для их существенного проявления следует иметь дело с диспергированными материалами. Чем мельче частицы материала, тем легче может быть обеспечено существенное превышение сил электрического взаимодействия по сравнению с весом частиц. Это связано с тем, что заряд растет пропорционально площади поверхности частиц, т. е. квадрату размеров, а вес – пропорционально кубу размеров.

Большое разнообразие форм взаимодействий поля и зарядов позволяет реализовать широкую гамму технологических операций в разных отраслях промышленного производства [8]–[12]. Поэтому можно констатировать, что здесь заложен весьма перспективный и в значительной степени универсальный метод электротехнологии, позволяющий в принципе осуществлять в электрическом поле формирование материалов и изделий сложной и управляемой структуры [1], [7]–[12].

Все такого рода технологии принято называть электронно-ионными. Для этой технологии характерна еще и та особенность, что весь арсенал воздействия прилагается к каждой частице в потоке, сколь бы мала она ни была и независимо от количества частиц в потоке. Можно с определенностью сказать, что все потенциальные возможности этой технологии в настоящее время еще не выявлены и здесь огромные возможности для научных исследований, создания новых технологических процессов, оборудования и приборов.

Поведение удлинённых заряженных частиц типа волокон в электрическом поле имеет свою специфику в ряде отношений и заслуживает отдельного рассмотрения. Эту разновидность электронно-ионной технологии называют технологией электрофлокирования. Термин «флокирование» происходит от слова «флок» – ворс и означает, попросту говоря, «ворсование». В рамках этой технологии за последние десятилетия разработаны способы создания ворсового покрытия на самых различных материалах и изделиях [9], [10], [16], [19].

В основе данной монографии лежат монографии, изданные ранее по данной тематике, а также научные статьи и доклады на конференциях.

В предлагаемой монографии представлены как теоретические разделы, касающиеся вопросов зарядки ворса в электрическом поле, его движения и ориентации, процесса формирования ворсового покрытия, взаимодействия заряженных волокон с электрическим полем, так и практические разделы, относящиеся к технологии формирования ворсового покрытия на различных материалах и изделиях и оборудованию, применяемому для реализации этих технологий.

В монографии широко представлен иллюстративный материал, демонстрирующий как приборы и оборудование, так и возможности различных тех-

нологий и оборудования: материалы и изделия с ворсовым покрытием, получаемые с его использованием.

Значительное место уделено формированию многоцветных ворсовых рисунков как на плоских материалах и изделиях, так и на объемных изделиях. Отдельный раздел посвящен технологии получения флокированных нитей.

1. НАНЕСЕНИЕ ВОРСА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Процесс нанесения ворса в электрическом поле заключается в ориентированном осаждении коротких заряженных волокон на основу, предварительно покрытую клеевым составом [9]–[12], [19]. Технология получения ворсового покрытия включает следующие основные операции (рис. 1.1): нанесение клеевого состава (сплошное или в виде рисунка), флокирование, термофиксация связующего (сушка), очистка поверхности и при необходимости печать красителями по ворсовой поверхности.

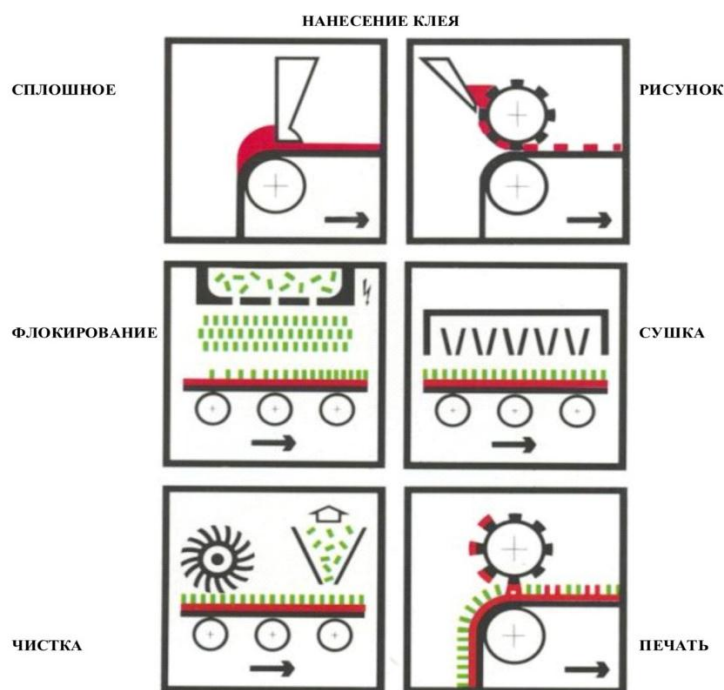


Рис. 1.1. Последовательность операций при формировании ворсового покрытия на рулонном материале

Флокирование применяют, как правило, при заключительной обработке поверхности для ее облагораживания. Перечислим хотя бы некоторые отрасли и ассортимент товаров, где в настоящее время используют технологию флокирования [9]–[11], [16], [19]:

- текстильная промышленность (искусственная замша, напольные покрытия, обивочные материалы, декоративные материалы с флокированными рисунками, покрывала, технические полотна, флокированные нити и т. д.);
- автомобильная промышленность (перчаточный ящик, уплотняющие профили, обшивка потолка салона, обивка сидений, обивка багажного отделения, обивка дверей и приборная панель, подголовники и т. д.);
- строительство (декоративные и звукоизолирующие панели для стен и потолка, двери и т. п.);

– упаковка (формованная ПВХ и полистирольная флокированная пленка, подарочные упаковки из пенополистирола, декоративные коробки, бутылки для алкогольных напитков и т. д.);

– мебельная и деревообрабатывающая промышленность (коробки для столовых приборов, внутренние стенки шкафов, обратные стороны зеркал, металлические части мебели, пластиковая мебель и элементы мебели, вешалки и т. д.).

Это далеко не полный список товаров, в отделке которых уже сейчас используют технологию нанесения ворса в электрическом поле. Все это разнообразие областей применения данной технологии основывается, естественно, на многочисленных исследованиях, проведенных как в нашей стране, так и за рубежом.

Непосредственное нанесение ворса осуществляют с использованием специальной установки, схема которой представлена на *рис. 1.2*. Здесь показан традиционный метод нанесения ворса «сверху-вниз» на плоские материалы. Ворс загружают в бункер 1 с сетчатым дном, являющийся одновременно верхним электродом. К нему подают потенциал высокого напряжения от специального источника 3. Бункер подвергают вибрации, и ворс сквозь сетчатое дно поступает в зону осаждения между электродами.

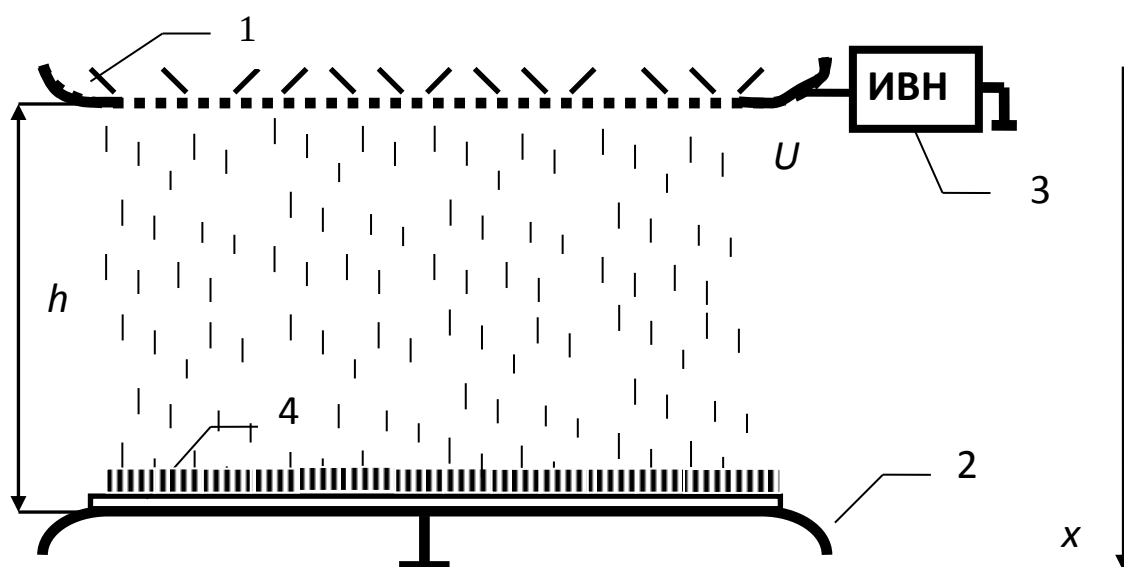


Рис. 1.2. Схема установки для электрофлокирования:
1 – верхний бункер – электрод с ворсом; 2 – нижний электрод;
3 – источник высокого напряжения; 4 – образец

В промышленных установках при производстве рулонных материалов вместо вибрации обычно используют протирание ворса через сетчатое дно щеточным валом. Далее ворс, прошедший через сетку, оказывается в электрическом поле высокого напряжения, где происходит его зарядка и он движется, ориентируясь по силовым линиям поля, к нижнему заземленному электроду 2. На нижнем электроде располагается материал с предварительно нанесенным клеевым составом, куда и внедряется поступающий ворс. По мере заполнения поверхности ворсом часть ворсинок может сталкиваться с ранее закрепившимся ворсом. В этом случае она перезарядается (приобретает заряд противо-

ложного знака), движется обратно к верхнему электроду, вновь перезаряжается и летит к материалу пока не «найдет» свободного места. Этот процесс может происходить многократно. Поэтому при достижении высокой плотности ворсового покрова ее увеличение будет происходить все медленнее. Таким образом происходит формирование ворсового покрова.

Потенциал высокого напряжения, используемый в технологии электрофлотирования, весьма значителен. Он может варьироваться от 30 до 80 кВ, в зависимости от конкретного варианта оборудования и технологии. Однако величина тока обычно не превышает 1 мА даже для крупных промышленных установок. Далее материал подвергается сушке для закрепления ворса в клеевом слое, после чего его очищают от не закрепившегося ворса.

1.1. Анализ движения заряженной ворсинки в электрическом поле

Математическое описание движения заряженных частиц цилиндрической формы в электрическом поле не представляет принципиальных трудностей. В целом ряде работ [9], [19] получено решение дифференциального уравнения, описывающего движение заряженной ворсинки в однородном электрическом поле:

$$m \frac{dv}{dt} = qE + mg + F_c(v), \quad (1.1)$$

где v – скорость ворсинки в момент времени t ; E – напряженность однородного электрического поля; $F_c(v)$ – сила аэродинамического сопротивления при движении ворсинки; g – ускорение свободного падения.

Решения могут отличаться вследствие различного представления силы аэродинамического сопротивления. Обычно используют либо линейную зависимость силы от скорости движения волокна, либо квадратичную. Достаточно точным и удобным для расчетов представляется эмпирическое выражение, использованное в работах [9], [11]:

$$F_c = Al(v + B \cdot v^2)(d - d_0), \quad (1.2)$$

где l – длина ворсинки, м; v – скорость движения ворсинки, м/с; d – диаметр ворсинки, м; $A = 1,11 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ – эмпирический коэффициент; $B = 0,1 \text{ с}/\text{м}$ – эмпирический коэффициент; $d_0 = 9,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ – эмпирическая константа.

Решение дифференциального уравнения (1.1) будет [10], [19] выглядеть следующим образом:

$$v = \left(\frac{\beta}{\alpha} - v_0 \right) - \frac{2\beta}{\alpha \left(1 + \frac{\beta + \alpha v_0}{\beta - \alpha v_0} e^{2\alpha\beta t} \right)}, \quad (1.3)$$

$$z = \frac{1}{\alpha^2} \ln \left(1 + \frac{\beta + \alpha v_0}{\beta - \alpha v_0} e^{2\alpha\beta t} \right) - \left(\frac{\beta}{\alpha} - v_0 \right) t - \frac{1}{\alpha^2} \ln \left(\frac{2\beta}{\beta - \alpha v_0} \right), \quad (1.4)$$

где $\alpha = \sqrt{\frac{0,1Al}{m}(d - d_0)}$, $\beta = \sqrt{(\alpha v_0)^2 + \left(\frac{qE}{mg} + 1 \right)g}$,

t – время движения ворсинки, с; m – масса ворсинки, кг; q – заряд ворсинки, Кл; $E = U/h$ – напряженность электрического поля, В/м; g – ускорение свободного падения, м/с²; z – координата ворсинки, м.

Полученные соотношения включают ряд эмпирических коэффициентов, имеющих следующие размерности: $v_0 = 5$ м/с; α , м^{-1/2}, β , м^{1/2}/с.

Рассмотрим на основе полученных соотношений изменение скорости движения заряженной ворсинки в процессе ее движения между электродами. Для расчетов выберем ворс из полиамидного волокна длиной 1 мм и диаметром 20 мкм, что соответствует линейной плотности 0,33 текс. Напряженность электрического поля примем равной 5 кВ/см, а заряд ворсинки 10^{-12} Кл. Массу ворсинки в килограммах можно вычислить, используя простое соотношение

$$m = l \cdot T \cdot 10^{-9}, \quad (1.5)$$

где l – длина ворса, мм; T – линейная плотность волокна, текс.

Для указанных параметров на *рис. 1.3* представлена зависимость скорости ворсинки от координаты.

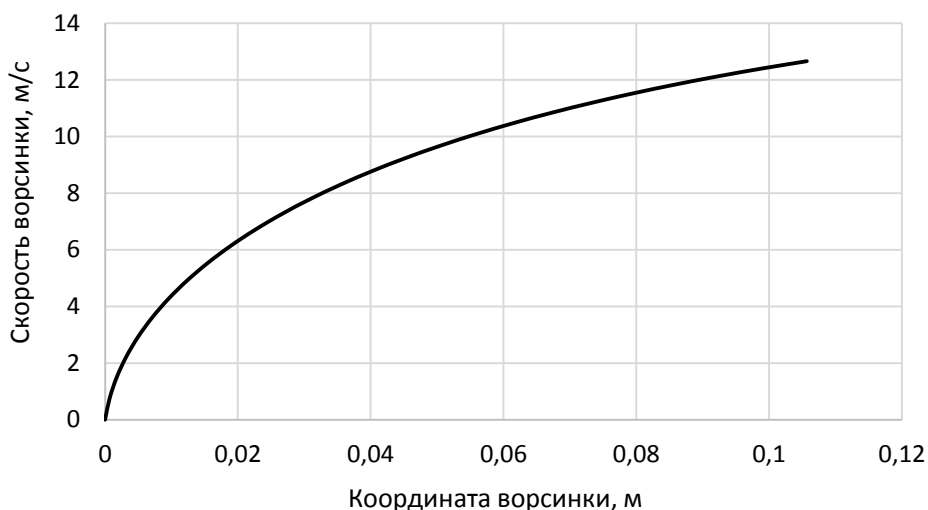


Рис. 1.3. Зависимость скорости ворсинки от координаты

Полученные выражения достаточно хорошо описывают движение ворса, но, к сожалению, к реальной ситуации процесса флокирования имеют слабое отношение. Во-первых, эти формулы не дают возможности каким-либо образом оценить важнейшие технологические параметры процесса: производительность, максимальную скорость поступления ворса к плоскости материала и плотность тока, создаваемого движущимися заряженными ворсинками. Во-вторых, в процессе флокирования всегда участвует огромное количество заряженных ворсинок, которые создают в пространстве между электродами достаточно значительный объемный заряд, существенно влияющий на весь процесс. Более того, можно сказать, что именно объемный заряд, по крайней мере на первом этапе, ограничивает скорость процесса флокирования.

2. СЫРЬЕВЫЕ КОМПОНЕНТЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ В ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОФЛОКИРОВАНИЯ

Технология электрофлокирования имеет очень широкий спектр применения, кратко уже изложенный выше. При этом количество основных сырьевых компонентов для изделий разного ассортимента включает ворс и адгезив. Конкретные характеристики этих компонентов могут очень сильно отличаться в зависимости от вида и назначения материала или изделия.

2.1. Ворс и требования, предъявляемые к нему

Ключевым компонентом технологии флокирования является ворс (флок). Он представляет собой короткие волокна одинаковой длины, окрашенные и обработанные специальными химическими препаратами (*рис. 2.1*). Химическая обработка ворса [9]–[11], [14] необходима, прежде всего, для придания изначально непроводящим волокнам достаточно высокой электропроводности.



Рис. 2.1. Внешний вид ворса

В качестве ворса используют различные волокна, имеющие разные свойства [9]–[11], [14], [19]:

- ворс из **вискозного волокна** хорошо окрашивается, химическая обработка его достаточно проста, но для получаемого ворсового покрова характерна сминаемость под действием нагрузки. В настоящее время производство такого ворса резко сократилось из-за значительного сокращения объемов выпуска вискозного волокна;

– ворс из **полиамидного волокна** хорошо окрашивается, обладает высокой упругостью, вследствие чего ворсовое покрытие легко восстанавливается после снятия нагрузки. Обладает высокой износостойкостью. Химическая обработка не представляет значительной сложности. В настоящее время это самый распространенный вид ворса;

– ворс из **полиэфирного волокна** обладает высокой стойкостью к истиранию и высокой стойкостью к воздействию УФ-излучения. Обработка таких волокон более сложная. Значительную трудность представляет окраска, следствием чего является сравнительно бедный выбор цветов;

– ворс из ацетатного волокна обладает меньшей износостойкостью. Под нагрузкой сминается. Использование его весьма ограничено.

Различный ассортимент требует ворса не только разной длины, но и разной линейной плотности. Соотношение длины и диаметра ворса влияет на его жесткость. Тонкий и длинный ворс образует комки волокон, короткий и толстый – формирует жесткое покрытие, не всегда желаемое для текстильных материалов. Поэтому ворс длиной до 1 мм должен иметь линейную плотность не более 0,33 текс, а ворс более 2 мм линейную плотность от 0,67 до 2,2 текс.

Для использования ворса в технологии флокирования он должен обладать рядом необходимых свойств [9], [10], [14]:

– равномерность резки по длине, которая необходима для получения качественного ворсового покрытия, определяется коэффициентом вариации;

– разделяемость или сыпучесть ворса, определяющая способность ворсинок отделяться друг от друга при его подаче в зону флокирования;

– электропроводность ворса, определяющая скорость приобретения им заряда в электрическом поле;

– влажность ворса связана с его электропроводностью и также важна для приобретения заряда.

Для измерения перечисленных и других свойств ворса существует специальный комплекс приборов [9], [14], [19], принятый европейской ассоциацией флокировщиков, работа с которыми будет рассмотрена ниже. Предварительный контроль за его параметрами, конечно, особенно важен в производстве рулонных флокированных материалов. Использование некачественного ворса ведет здесь к ухудшению качества флокированного покрытия и снижению производительности процесса, т. е. к значительным экономическим потерям.

2.2. Обработка ворса. Последовательность операций

Технология производства ворса [9], [10], [14], [19] включает операции, придающие диэлектрическому волокну необходимые свойства и, в первую очередь, электропроводность и разделяемость. Производство ворса начинается с формирования жгута необходимой линейной плотности из многих бобин. Созданный жгут для повышения эффективности резки пропитывают определенным составом и подают на ворсорезательную машину (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Ворсорезательная машина

Нарезанный ворс сначала отмывают от пропитывающих препаратов и за-масливателя. Затем следует крашение и его химическая обработка для повышения электропроводности и сыпучести. Обработанный мокрый ворс сначала отжимают в центрифуге, а затем высушивают в аэродинамической камере. После этого ворс просеивают на механическом сите и упаковывают во влагонепроницаемые мешки. Образцы выпускаемого ворса обычно представлены в виде специальных карт (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Карта видов ворса, представляемая фирмой-изготовителем

В настоящее время качественный ворс изготавливают фирмы во многих странах мира: Германии, Испании, Франции, Гонконга, Швеции, Китая. В России представлен как импортный ворс, так и отечественный, хотя пока в не очень значительных объемах.

2.3. Методы и приборы для измерения характеристик ворса

Свойства ворса весьма важны для технологии электрофлокирования и в значительной степени определяют качество получаемого ворсового покрова на материале [9]–[11], [14], [15], [19]. Поэтому были установлены требования к основным характеристикам ворса, примерно одинаковые в разных странах. Примером могут служить нормативные показатели на флок полиамидный согласно ТУ 2271-004-00300216-96 предприятия АООТ «Икофлок», представленные в табл. 2.1.

Т а б л и ц а 2.1. Нормативные показатели на полиамидный флок

Показатель	Норма
1. Влажность, %	3,2 – 5,8
2. Электрическое сопротивление, не более, Ом	$10^7 - 10^8$
3. Сыпучесть, не менее, %	95
4. Прыгучесть, не более, с	20
5. Однородность по длине, не менее, %	85

Измерение длины. Для технологии флокирования важна как длина флокка, так и равномерность его резки. Для измерения длины ворсинок используют диапроектор. Этот прибор позволяет оценить не отдельные волокна, а ворс в целом. Вариант такого прибора – *FLOCK-IN-SPEKT*, немецкой фирмы *MAAG FLOCKMASCHINEN GmbH* (рис. 2.4).

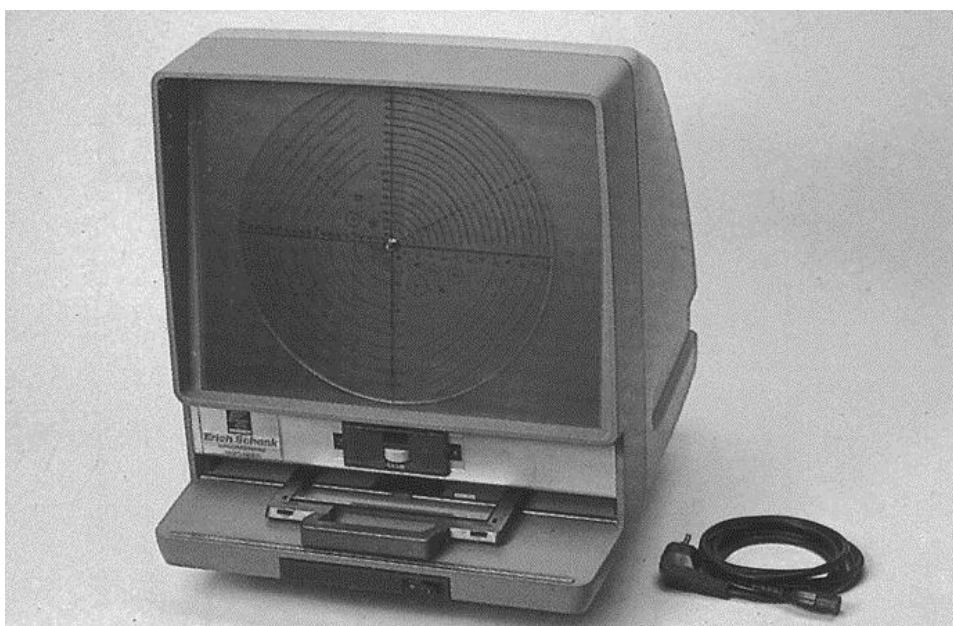


Рис. 2.4. Прибор *FLOCK-IN-SPEKT* фирмы *Erich Schenk*

Для оценки выбирают не менее 100 ворсинок. К основной фракции относят все волокна, для которых отклонение от заданной длины резки не превышает 15 %. Основная фракция должна составлять не менее 85 % от общего числа волокон, попавших в основную фракцию.

В настоящее время измерение длины ворса можно реализовать с помощью микроскопа, совмещенного с компьютером.

Оценка разделяемости (сыпучести) ворса. Одним из свойств волокон является их способность разделяться, т. е. сыпаться [9]–[11], [14], [15], [19]. Хорошая сыпучесть ворса проявляется в том, что в подающем бункере при взаимном перемешивании ворсинки не образуют комков и свободно проходят сквозь сетчатое дно. Важно влияние сыпучести на скорость подачи ворса и ее равномерность по всей площади, так как чем выше разделяемость волокон, тем легче они проникают через сетку.

В качестве характеристики сыпучести ворсинок применяют коэффициент, равный отношению массы ворса m , просеянного через сетку за определенный период времени, к массе навески m_0 : $\delta = m/m_0$. Для определения разделяемости используют прибор с вращающейся сеткой *RPG 150/100*, производства *Erich Schenk* (Германия) (рис. 2.5). Величину навески берут 20 г (10 г). После 60 (30) оборотов измеряют массу просеянного флока.



Рис. 2.5. Прибор *RPG 150/100* немецкой фирмы *Erich Schenk*

Определение электропроводности ворса. Одним из важнейших свойств ворса является его электропроводность или удельное сопротивление. Этот параметр непосредственно связан с зарядкой и активностью ворса в электрическом поле. Для измерения удельного сопротивления ворса были разработаны различные датчики, но поскольку стандарт на отечественные приборы отсутствует, то здесь также показан прибор, принятый европейским обществом флокировщиков (рис. 2.6).

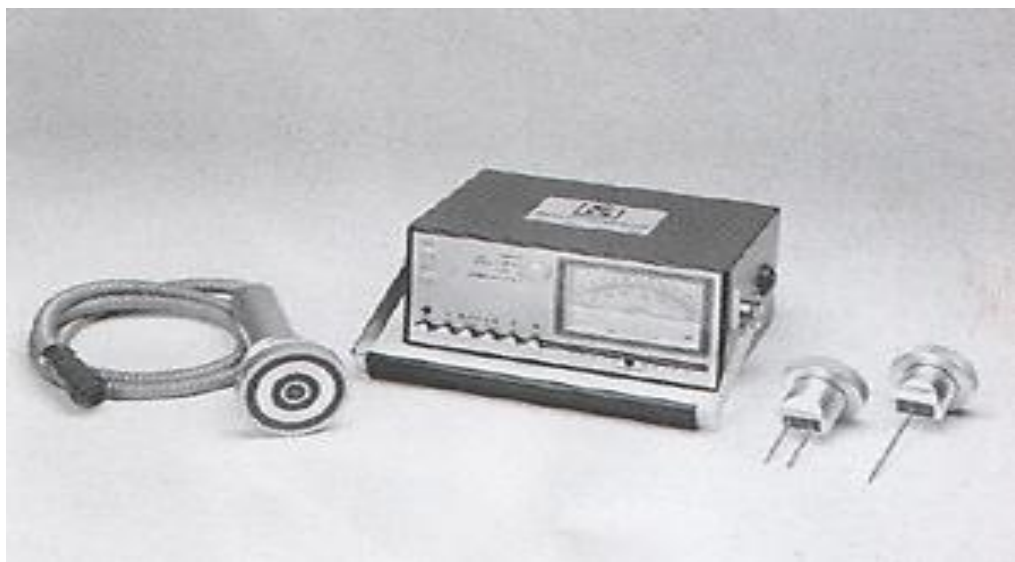


Рис. 2.6. Прибор для измерения электропроводности ворса *DMB-6*

Методика измерения заключается в том, что для каждого образца ворса берут не менее трех проб по 20 г. Пробы выдерживают 24 ч открытыми при 20 °С и 65 % влажности воздуха. После этого цилиндрическую емкость заполняют равномерно пробой ворса и устанавливают, слегка придавливая, верхний электрод. Измерительный прибор переключают в позицию «измерение», выбирают нужную шкалу и через 1 мин считывают величину сопротивления. Из трех результатов измерения определяют среднее значение.

Данный прибор в реальности позволяет измерять электрическое сопротивление навески ворса, а не удельное сопротивление ворса. Кроме того, сопротивление ворса измеряется весьма приближенно и для экспериментальных исследований не вполне пригоден.

Ранее в работах [9], [10], [19] был предложен способ определения удельного сопротивления ворса на основе измерения электрического сопротивления и толщины образца ворса при постоянном давлении. Недостатком этого способа следует считать значительную погрешность, вносимую при измерении толщины образца ворса.

Оценка «прыгучести» ворса. Для оценки «прыгучести» ворса применяют прибор, например, немецкой фирмы *MAAG FLOCKMASCHINEN GmbH Flock Motion Tester SPG 40* (рис. 2.7). Он предназначен для определения способности ворса к зарядке и движению под напряжением в условиях, близких к реальным. На нижний электрод насыпают пробу ворса и после подачи напряжения фиксируют время разлета всех ворсинок с нижнего электрода. Масса пробы ворса 2 г. Напряженность поля 4 кВ/см. Если за 20 с весь ворс не разлетается, тогда определяют долю улетевшего ворса.



Рис. 2.7. Прибор SPG 40 немецкой фирмы *Erich Schenk*

Данная характеристика носит, в значительной степени, качественный характер, поскольку не представляется возможным использовать ее в качестве фактора при построении физических моделей процесса флокирования.

Влажность ворса. Данная характеристика непосредственным образом связана с электропроводностью ворса. Химическая обработка создает поверхностную проводимость на основе применения электролитов и поэтому без достаточной влажности она резко снижается. Для измерения этой характеристики не требуется специальных приборов. Навеску ворса массой $m_0 = 1,0 \pm 0,1$ г помещают в термокамеру с температурой 110 ± 5 °C на время 5 мин, после чего вновь определяют ее массу m . Влажность вычисляют как $w = (m_0 - m)100/m$, %.

Измерение среднего заряда ворса. Эта характеристика не входит в число нормативных показателей и, строго говоря, связана не только со свойствами ворса, но и с условиями его зарядки, в первую очередь, напряженностью электрического поля. В то же время величина электрического заряда ворсинок является, по существу, определяющей для процесса электрофлокирования. Поэтому измерение среднего заряда – важная задача для технологии. Были предложены разные способы, но наиболее простым и удобным можно считать измерение с помощью емкостного датчика. Этот метод измерения в разных модификациях был описан, например, в работах [10], [14], [19], [32].

Средний заряд одной ворсинки крайне мал, однако благодаря малому значению емкости датчика оказывается возможным измерять заряд весьма незначительного количества ворсинок. Датчик создан в виде сосуда Фарадея [10], [19], [32], и его схема представлена на *рис. 2.8*.

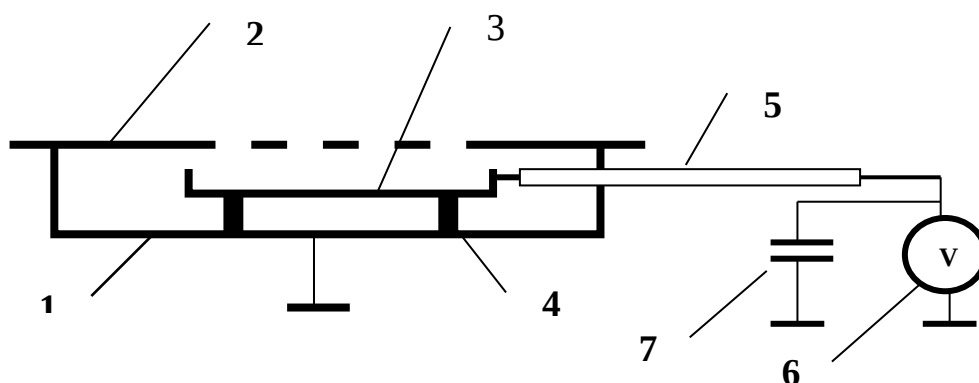


Рис. 2.8. Схема емкостного датчика для измерения заряда ворса

Датчик изготовлен в виде емкости, состоящей из нижней части в виде стакана 1 и верхней крышки 2 с отверстиями, расположенными напротив измерительного электрода 3. Измерительный электрод расположен на диэлектрических стойках 4, и к нему подключен кабель 5. Измерение проводят с помощью вольтметра 6, имеющего высокое входное сопротивление, например, электростатического типа ($R_{вх} = 10^{12} - 10^{14}$ Ом). Этим требованиям отвечают вольтметры электростатической системы. Для расширения диапазона измерений параллельно вольтметру предусмотрено подключение различных емкостей 7. Это необходимо для того, чтобы иметь возможность провести согласование времени измерения и величины суммарного заряда ворса.

Датчик помещают на нижний электрод флокатора так, что ворс, движущийся от верхнего электрода, сквозь отверстия крышки 2 попадает на поверхность измерительного электрода 3. Ворс, попавший на измерительный электрод и отдавший заряд, остаётся на нем и заряжает емкость системы электрод – кабель – конденсатор. Значения всех емкостей предварительно измеряют. Тогда, измеряя вольтметром 7 значение напряжения U , легко определить величину суммарного заряда, принесенного всеми ворсинками $Q_0 = C_0 \cdot U$ (C_0 – емкость системы). Измерительный электрод 3 взвешивают с ворсом (M) и без ворса (M_0). Зная массу одной ворсинки $m = l \cdot T \cdot 10^{-9}$ (l – длина ворса, мм; T – линейная плотность волокна ворса, текс; m – масса, кг), можно вычислить число ворсинок, находящихся на электроде: $N = (M - M_0)/m$. Следовательно, средний заряд одной ворсинки будет $q = Q_0/N$.

Описанный метод позволяет получать оценочные значения заряда, и был использован во многих исследованиях, связанных с изучением процесса зарядки ворса [9], [10], [19], [31], [32].

К сожалению, данный метод не лишен серьезных недостатков. Одним из них является то, что существенная часть заряженного ворса, поступающего из верхнего бункера, может касаться краев отверстий электрода 2, где будет перезаряжаться, т. е. приобретать заряд противоположного знака. После этого ворсинки легко могут попасть на измерительный электрод. Это приведет к росту массы ворсинок на этом электроде и одновременно к снижению измеряемого заряда, т. е. к существенному искажению результата измерения среднего заряда ворсинок.

Для решения этой проблемы было предложено [19] устройство (рис. 2.9), в котором подача ворса осуществляется из бункера 1 с сетчатым дном посредством вибрации от двигателя постоянного тока с эксцентриком. Двигатель постоянного тока 3 был выбран вследствие удобства регулирования частоты его вращения и, тем самым, скорости подачи ворса. Бункер 1 одновременно подключен к источнику высокого напряжения 2.

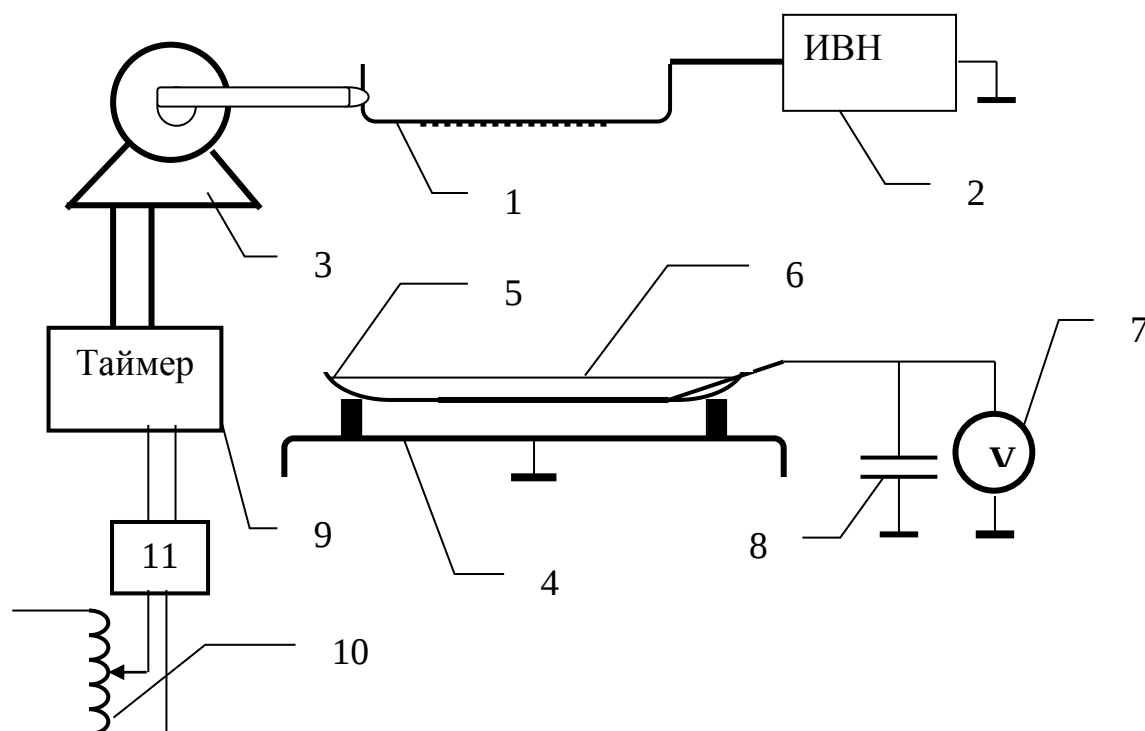


Рис. 2.9. Схема датчика для измерения параметров ворса и исследования режимов флокирования

Диапазон изменения напряжения – от 0 до 50 кВ. На нижнем заземленном электроде 4 на диэлектрическом кольце из фторопласта установлена емкость 5, которую заполняют электролитом 6 (обычно был использован 20%-й раствор NaCl в воде). На дне емкости располагался электрод, обеспечивающий контакт электролита с электростатическим вольтметром 7. Параллельно была подключена батарея конденсаторов 8 с возможностью изменения емкости путем переключения. Вольтметр электростатического типа имеет для данных измерений большое значение благодаря своему исключительно высокому входному сопротивлению, которое достигает $10^{13} - 10^{14}$ Ом.

Двигатель постоянного тока 3 запускают таймером 9, что обеспечивает точное время подачи ворса. Напряжение подают от ЛАТРа 10, позволяющего регулировать его величину, через выпрямитель 11.

Эта установка была использована для исследования однонаправленного движения ворса. Метод, как и требовалось, обеспечивает измерение не только заряда ворса, но и целого ряда параметров процесса флокирования.

Процесс измерения среднего заряда заключается в следующем.

Ворс помещают в бункер 1 с сетчатым дном, которое одновременно является верхним заряжающим электродом. Нижний электрод представляет собой диэлектрическую ячейку 5 с электролитом 6, который фактически и является нижним электродом, причем диаметр ячейки существенно больше диаметра области подачи верхнего электрода. Это гарантирует, что весь ворс, вылетевший с верхнего электрода, попадет в ячейку с электролитом и не будет возвращаться обратно к верхнему электроду. Минимальная скорость подачи обеспечивается малой частотой вибрации бункера, которая регулируется, и сеткой с ячейками малых размеров (сетка на установке сменная).

Таким образом, ворс заряжается на поверхности верхнего электрода 1, движется к поверхности нижнего электрода 6 и остается в воде, отдав электроду свой заряд. Так как емкость системы C , включая емкость конденсатора 8, емкость измерительного электрода 5 и подводящих проводов, известна (предварительно измерена), то, измеряя напряжение U на емкости с помощью электростатического вольтметра 7, легко определить значение суммарного заряда ворса $Q_0 = C U$.

Электрод 5 с электролитом 6 предварительно взвешивали на аналитических весах, а затем его же – с ворсом, определяя массу попавших ворсинок M . Зная массу одной ворсинки $m = T \cdot l \cdot 10^{-3}$ (T – линейная плотность ворса, текс; l – длина ворса, мм; m – масса ворсинки, г) вычисляют средний заряд одной ворсинки q :

$$q = \frac{C U m}{M}. \quad (2.1)$$

Данный метод достаточно универсален и позволяет одновременно определить скорость подачи ворса:

$$P = \frac{M}{S \cdot t}, \quad (2.2)$$

где S – площадь сетки, подающего бункера, м^2 ; t – время подачи, с.

Кроме того, способ дает возможность определить плотность тока, созданного движущимся заряженным ворсом:

$$j = \frac{C \cdot U}{S \cdot t}. \quad (2.3)$$

Таким образом, разработанный метод позволил провести широкий спектр измерений основных технологических параметров процесса флокирования. На основе измерений, проведенных с помощью данного комплекса приборов, осуществлялось сравнение созданных моделей с данными эксперимента.

2.4. Методы измерения характеристик флокированного материала

Основная характеристика материалов с ворсовым покрытием, полученным по технологии электрофлокирования – это поверхностная плотность ворсового покрытия. Она измеряется либо количеством ворсинок на площади 1 мм^2 или массой ворса в граммах на площади 1 м^2 . Перевод одной единицы измерения

осуществляется следующим образом. Обозначим первый вариант плотности ворсового покрова N (1/мм²), а второй вариант n (г/м²). Тогда взаимосвязь этих характеристик выглядит следующим образом:

$$n = N \cdot m_0 \cdot 10^6,$$

где m_0 – масса одной ворсинки в граммах.

Коэффициент 10^6 соответствует количеству квадратных миллиметров в квадратном метре. Если учесть, что масса одной ворсинки определяется из ее длины l (мм) и линейной плотности волокна T (текс): $m_0 = l \cdot T \cdot 10^{-6}$, то взаимосвязь этих характеристик может быть записана в следующем виде:

$$n = N \cdot l \cdot T.$$

Таким образом, для ворса длиной 1 мм из волокна линейной плотностью 0,33 текс плотность ворсового покрова 200 шт. на 1 мм² соответствует плотности 66 г/м².

Измерение плотности ворсового покрытия

Поверхностную плотность ворсового покрытия [9], [10], [19], [25] можно измерять как непосредственно, определяя массу ворса на единице площади, так и косвенно, определяя физические характеристики материала, непосредственно связанные с плотностью ворсового покрова. В лабораторной практике при различных исследованиях технологического процесса электрофлокирования обычно применяют непосредственное измерение плотности ворсового покрова. Для этого на образец (основу) наносят клеевой слой с использованием ракли и сетчатого шаблона в виде квадрата заданного размера, например, 5 x 5 см. Взвешивают образец с клеем на аналитических весах, определяя массу m_1 . Затем наносят ворс и вновь взвешивают образец на аналитических весах, получают массу m_2 . Плотность ворсового покрова определяют, как разность масс, отнесенную к площади образца:

$$n = \frac{m_2 - m_1}{S}.$$

При вычислении массу, как правило, подставляют в г, а площадь в м². Основным недостатком этого способа является то, что он является разрушающим и не пригоден для измерения плотности ворсового покрытия в процессе производства.

Для контроля плотности ворсового покрытия на рулонных материалах в процессе их изготовления используют косвенные методы определения плотности ворсового покрова. К таким методам относится, например, оптический способ, основанный на измерении оптического пропускания материала с ворсом [19], [78]–[84]. Принцип действия состоит в том, что интенсивность светового потока снижается при увеличении плотности ворсового покрова, поэтому, проведя предварительную градуировку прибора на основе образцов с известной плотностью ворсового покрова, можно определять это значение в процессе выпуска рулонного материала. Недостатком метода является то, что при использовании другой основы или ворса градуировку надо проводить снова.

Другая важная характеристика флокированных материалов связана с их эксплуатационными характеристиками. Она характеризует прочность закрепления ворса в клеевом слое и определяется как стойкость ворсового покрытия к истиранию.

Измерение стойкости ворсового покрытия к истиранию

Для измерения устойчивости ворсового покрытия к истиранию используют прибор, показанный на *рис. 2.10*. Измерения по истиранию проводят для материала в сухом и мокром состоянии. Стойкость к истиранию в мокром состоянии, как правило, значительно ниже, чем в сухом, но она важна для оценки устойчивости таких материалов к стирке.

Количественной 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. Прибор для проведения испытаний представлен на *рис. 2.10*.

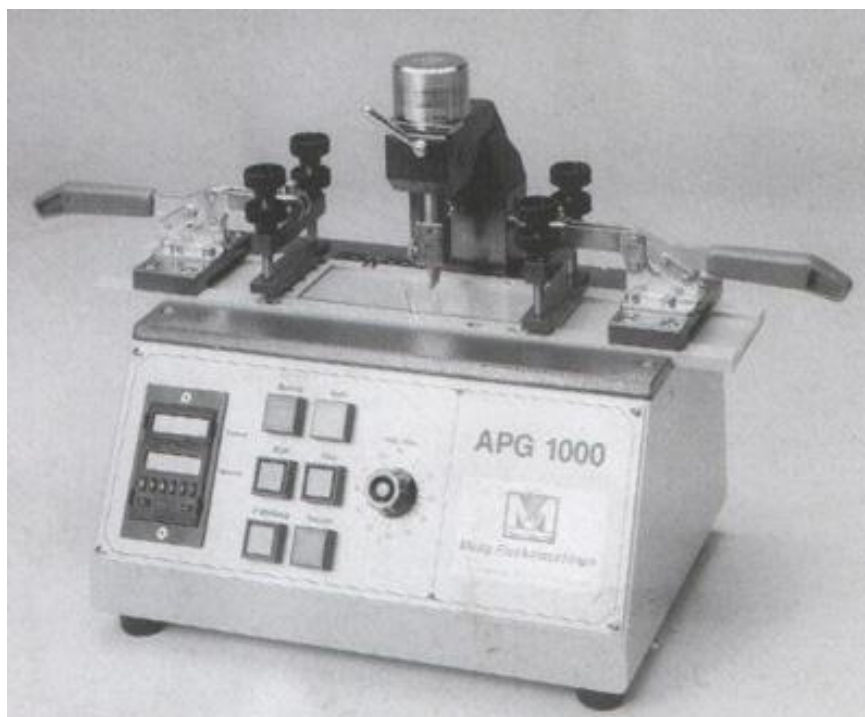


Рис. 2.10. Прибор для определения стойкости ворсового покрова к истиранию *APG 1000*

Описанный способ является в значительной степени субъективным, поскольку момент остановки и считывания числа циклов выбирается сотрудником по внешнему виду истираемого образца. При проведении таких испытаний важен опыт, чтобы остановка процесса происходила каждый раз на одинаковой стадии истирания образца.

2.5. Требования к адгезивам в технологии электрофлокирования

С самого начала необходимо сказать, что не существует универсального адгезива (клея) и связующее выбирают исходя из вида материала основы, требований к флокированной поверхности (прочность закрепления ворса, эластичность клеевой пленки и т. п.), допустимых режимов сушки материала основы и некоторых специальных требований.

Основные требования, предъявляемые к клею, используемому для закрепления ворса на поверхности основы, следующие [9], [10], [19]:

- высокая адгезия к волокнам и поверхности основы;
- достаточно длительная жизнеспособность (не менее 4–5 ч);
- открытое время должно составлять не менее 3–4 мин;
- вязкость должна соответствовать способу нанесения и быть постоянной до завершения использования клея;
- после термофиксации клеевая пленка должна обладать стойкостью к воде;
- растворитель должен быть не ядовит и трудно воспламеняем;
- достаточно высокая электропроводность клея;
- эластичность клеевой пленки.

Теперь необходимо подробнее рассмотреть и обосновать некоторые из требований.

Вязкость. Этот фактор в значительной мере определяет глубину проникновения ворса, а следовательно, и прочность его закрепления. К вязкости клея предъявляются противоречивые требования. Клей высокой вязкости не пропитывает ткань, создавая тонкую и эластичную пленку, а внедрившийся ворс сохраняет свое положение длительное время. Низкая вязкость способствует более глубокому проникновению ворса. Кроме этого вязкость клея должна соответствовать способу его нанесения. Например, для распыления нужно связующее меньшей вязкости, чем для нанесения через сетчатый шаблон или с помощью ракля. Поэтому важен тщательный контроль вязкости в процессе его использования.

Электропроводность. Данный фактор необходим для отвода зарядов, поступивших на клеевую поверхность с ворсом. Если заряд стекает медленнее, чем поступает, то он создает постепенно усиливающееся поле противоположной направленности, препятствующее внедрению нового ворса.

Стойкость к воде. Это важный фактор, который необходимо учитывать, в первую очередь, для текстильных изделий. Практически он означает устойчивость к стирке или эксплуатации во влажном состоянии. Количественно его можно характеризовать числом циклов истирания, предварительно смоченного образца.

Открытое время. Промежуток времени от завершения нанесения клея до начала нанесения ворса. Для различных видов клея он может отличаться в 10 и более раз. Малое открытое время для клеев на основе водных дисперсий связано с быстрым образованием пленки, которую не может пробить движущийся ворс.

В технологии электрофлокирования различают два принципиально отличных класса клеев: клеи на основе водных дисперсий (акриловые или полиуретановые) и клеи на основе органических растворителей (эпоксидные или полиуретановые смолы) [9], [10], [19]. Они отличаются как способом нанесе-

ния, так и видом материала основы, для которого они предназначены. Для нанесения ворса на текстильные материалы применяют, как правило, связующие на основе акриловых дисперсий. Такие клеи, выпускаемые специально для технологии электрофлокирования, отвечают всем требованиям, но следует иметь в виду, что хорошую стойкость к стирке приобретают только после качественной термофиксации, а открытое время обычно не превышает 5–6 мин.

При использовании данной технологии для отделки не текстильных материалов (металл, стекло, пластмасса и т. п.) адгезия акриловых дисперсий оказывается недостаточной, либо режим термофиксации не соответствует температурной стойкости основы. Последнее касается практически всех пластиков. В этих случаях используют, как правило, клеи на основе эпоксидных или полиуретановых смол. Между собой они значительно отличаются эластичностью. Оба клея обладают исключительно высокой адгезией к ворсу, большим открытым временем, вязкостью, регулируемой в широких пределах и отверждаются при комнатной температуре, но при этом их электропроводность значительно хуже водных дисперсий, а растворитель пожароопасен и вреден для обслуживающего персонала. Поэтому их применение всегда носит вынужденный характер, когда иного варианта нет.

Наносят акриловые водные дисперсии через сетчатый шаблон или путем распыления. Клеи на основе растворителей можно наносить кистью, окунанием или распылением.

3. ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ВОРСОВОГО ПОКРЫТИЯ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОФЛОКИРОВАНИЯ

Флокированные материалы характеризуются целым рядом важных параметров [9]–[11], [14], [19]: длина и линейная плотность использованного ворса; прочность закрепления ворса; стойкость к истиранию; поверхностная плотность ворсового покрытия. Все эти параметры связаны между собой. Например, чем выше плотность нанесения ворса, тем выше стойкость материала к истиранию.

С точки зрения процесса флокирования наиболее важное свойство – плотность ворсового покрытия, поскольку на геометрические характеристики ворса процесс его нанесения не влияет, а прочность его закрепления в значительной степени связана с качеством клеевой композиции и режимом термофиксации. При этом величина плотности ворсового покрытия зависит, в первую очередь, именно от условий процесса флокирования.

Важность этого понятия состоит также и в том, что плотность ворсового покрытия непосредственно зависит от продолжительности нанесения ворса. Это означает, что скорость роста плотности ворсового покрытия связана с такой важной характеристикой технологии, как производительность процесса [9], [10], [19]. Требуемую плотность ворсового покрытия на поверхности материала можно получить лишь при определенной продолжительности процесса, т. е. при известной длине зоны флокирования, скорость движения материала должна быть строго определенной.

Таким образом, чем точнее определена зависимость плотности ворсового покрытия от времени, тем точнее можно определить производительность, а значит, добиться максимальной экономической эффективности процесса. Поэтому в данном разделе сделана попытка уточнить взаимосвязь плотности ворсового покрытия с длительностью нанесения ворса в процессе флокирования. В первую очередь модель должна учитывать изменение скорости поступления ворса, связанное с изменением распределения объемного заряда в зоне флокирования по мере увеличения плотности ворсового покрытия на материале.

3.1. Модель формирования ворсового покрытия с учетом встречного потока заряженного ворса

Плотность ворсового покрытия n выражает количество ворсинок на площади 1 мм^2 или массу ворса на площади 1 м^2 , г/м^2 . Одно из наиболее важных соотношений, используемых в теории и технологии электрофлокирования, это зависимость плотности ворсового покрытия от длительности нанесения ворса [9], [10], [17], [19], [26]–[28], скорости поступления ворса к поверхности материала P , $\text{г/(м}^2\text{с)}$, и предельной плотности ворсового покрытия n_{max} , г/м^2 .

Обычно используемую математическую модель процесса нарастания плотности ворса можно представить в следующем виде:

$$\frac{dn}{dt} = P \left(1 - \frac{n}{n_{\text{max}}} \right). \quad (3.1)$$

Это выражение характеризует принятое положение, что скорость изменения плотности ворса пропорционально доле свободной площади или «числу вакантных мест» и скорости подачи ворса. При этом подразумевается, что скорость подачи ворса в зону флокирования P – постоянна. Также постоянными считаются условия нанесения, т. е. напряжение на электродах U , межэлектродное расстояние h и заряд ворсинок q . Тогда зависимость плотности ворса от времени выглядит следующим образом:

$$n(t) = n_{\max} \left(1 - e^{-\frac{P}{n_{\max}} t} \right). \quad (3.2)$$

Недостатком этой модели является как раз то, что по умолчанию принимается, что скорость подачи ворса постоянна во времени. Однако даже если чисто механически процесс подачи ворса постоянен и напряжение на электродах не меняется, скорость поступления ворса к материалу может изменяться с увеличением поверхностной плотности ворса на материале.

Это можно пояснить следующим образом. В первый момент времени весь ворс, вылетевший из бункера, внедряется в клеевой слой. Далее все больше ворса «натыкается» на ранее внедрившиеся ворсинки, перезаряжается и движется обратно к бункеру, а затем вновь к материалу. Таким образом, с ростом плотности ворса на материале может расти объемная плотность ворса в зоне флокирования, но при этом снижаться объемная плотность заряда и тем самым скорость поступления ворса к материалу наверняка будет изменяться. Согласно [19], [43]–[45], [54], [55], одним из важнейших факторов, ограничивающих скорость подачи ворса, является объемная плотность заряда между электродами флокатора. Следовательно, если из бункера поступает отрицательно заряженный ворс, то навстречу движется положительно заряженный ворс, который снижает суммарную объемную плотность заряда в зоне флокирования, а тем самым снимает ограничение, и тогда скорость подачи ворса в зону флокирования может возрасть. Однако, при нарастании плотности встречных потоков ворса возрастает вероятность взаиморазряда разноименно заряженных ворсинок в воздухе или во время зарядки, тем самым снижая скорость подачи.

Таким образом, на скорость подачи ворса к материалу влияют одновременно две встречные тенденции, и в каждом конкретном случае предсказать величину конечной скорости подачи весьма затруднительно. Учет возможность как возрастания, так и снижения скорости подачи ворса по мере нарастания плотности ворса на материале. В первом приближении скорость подачи ворса с учетом изложенного можно представить в виде

$$P = P_0 \left(1 + k_0 \frac{n}{n_{\max}} \right). \quad (3.3)$$

Здесь скорость подачи ворса к материалу изменяется от $P = P_0$ в начальный момент времени ($t = 0$; $n = 0$) до $P = P_0 (1 + k_0)$ при $n = n_{\max}$. Величина коэффициента k_0 определяется свойствами ворса (заряд, геометрические параметры) и условиями флокирования (напряжение, межэлектродное расстояние, напряженность). Теоретическое определение этого коэффициента в настоящий мо-

мент не представляется возможным, но можно с уверенностью утверждать, что $k_0 > -1$, так как результирующий поток ворса не может быть направлен от материала к подающему бункеру. Поэтому в дальнейшем определим его на основе экспериментальных данных.

Тогда математическая модель процесса изменения плотности ворса от времени будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{dn}{dt} = P_0 \left(1 + k_0 \frac{n}{n_{\max}}\right) \left(1 - \frac{n}{n_{\max}}\right). \quad (3.4)$$

Для удобства дальнейших вычислений введем безразмерную переменную $x = n/n_{\max}$ и одновременно осуществим разделение переменных.

$$\frac{dx}{(1 + k_0 x)(1 - x)} = \frac{P_0}{n_{\max}} dt. \quad (3.5)$$

Область изменения x при изменении t от 0 до ∞ будет от 0 до 1. Проинтегрируем обе части:

$$\int_0^x \frac{dx}{(1 + k_0 x)(1 - x)} = \frac{P_0}{n_{\max}} t.$$

Результат интегрирования можно записать в виде

$$\frac{-1}{k_0 + 1} \ln \left| \frac{1 - x}{x + \frac{1}{k_0}} \right| + C = \frac{P_0}{n_{\max}} t. \quad (3.6)$$

Используя начальное условие $x(t = 0) = 0$, определим постоянную интегрирования C :

$$C = \frac{1}{k_0 + 1} \ln |k_0|.$$

Теперь, возвратившись к исходной переменной n , можно записать новый вид зависимости

$$n(t) = n_{\max} \frac{1 - e^{-\frac{(k_0 + 1)P_0 t}{n_{\max}}}}{1 + k_0 e^{-\frac{(k_0 + 1)P_0 t}{n_{\max}}}}. \quad (3.7)$$

В полученном выражении, как и в предыдущем варианте, плотность ворса n при возрастании времени t стремится к значению предельной плотности $n_{\max}$. Общий вид зависимости сохраняется, причем выражение (3.7) переходит в общепринятый вариант (3.2) при постоянной величине скорости подачи, т. е. в случае $k_0 = 0$. Однако характер зависимости иной.

Для построения подобной модели можно использовать и иную комбинацию технологических параметров. На технологические параметры, входящие в соотношения (3.2) и (3.7), влияют как условия процесса нанесения, так и свойства ворса. Под технологическими параметрами мы здесь понимаем параметры, от которых непосредственно зависит получаемая плотность ворсового покрытия. В нашем случае это были скорость поступления ворса P и максимально до-

стижимая плотность ворсового покрытия $n_{\max}$. При этом взаимосвязь свойств ворса с этими параметрами до сих пор четко не определена. Возможно, эти сложности связаны с тем, что в показатель экспоненты входят оба параметра. Для более четкого выявления характера влияния свойств ворса на технологические параметры, возможно, их следует изменить. Это можно сделать, если вместо скорости поступления ворса ввести иной технологический параметр – постоянную времени τ . Она будет определять скорость роста плотности ворсового покрова [28]. При этом постоянная времени простым образом связана с прежними параметрами: $\tau = n_{\max} / P$.

Теперь зависимость плотности ворсового покрова от времени будет выглядеть так:

$$n(t) = n_{\max}(1 - e^{-t/\tau}). \quad (3.8)$$

Это незначительное изменение имеет достаточно существенное значение. Теперь за ориентацию ворса на поверхности материала отвечает параметр $n_{\max}$, а за скорость изменения плотности ворсового покрытия параметр τ . Благодаря этому оценку влияния на них свойств ворса и режимов флокирования можно исследовать независимо.

В дальнейшем выбор модели мы будем осуществлять в зависимости от поставленной задачи.

3.2. Сравнение моделей формирования ворсового покрытия на основе экспериментальных результатов

В предыдущем разделе предложено три модели, описывающих процесс формирования ворсового покрытия. Сравнивать между собой имеет смысл только две из них, поскольку расчетные значения $n(t)$ для моделей (2.2) и (2.8) будут идентичны при одинаковых исходных экспериментальных данных.

Таким образом, необходимо решить принципиальный вопрос: меняется ли скорость подачи ворса с ростом плотности ворсового покрытия на материале. Для этого необходимо выбрать критерий и методику сравнения. В качестве критерия выбора зависимости, более точно отражающей результаты эксперимента, была использована сумма квадратов отклонений расчетных и экспериментальных данных. Методика сравнения заключалась в следующем [19]:

1. Экспериментально измеряли поверхностную плотность ворса на образцах при постоянной скорости подачи и напряжении и различном времени нанесения. Измерение поверхностной плотности ворса осуществляли по привесу [10], [19], [25], время нанесения устанавливали таймером.

2. Для каждой экспериментальной серии вычисляли с заданной точностью параметры зависимостей (3.2) и (3.7), обеспечивающие $\min$ суммы квадратов отклонений расчетных и экспериментальных значений.

Было проведено четыре серии измерений плотности ворсового покрытия от времени нанесения для двух видов ворса, определены оптимальные значения параметров и величина суммы квадратов отклонения для каждого варианта. Результаты всех экспериментов и расчетов сведены в *табл. 3.1–3.4*, где n – экс-

периментальные результаты; n_0 – расчет по формуле (3.2); n_1 – по формуле (3.7) и для наглядности приведены в виде графиков (рис. 3.1–3.4). Приведенные значения скорости подачи ворса P_0 , измерены без напряжения.

1. Ворс ПА, $U = 25$ кВ, $h = 70$ мм, $T = 3,3$ дтекс, $l = 1$ мм, $P_0 = 23$ г/м²с.

Т а б л и ц а 3.1. Результаты расчетных и экспериментальных значений плотности ворсового покрытия ($U = 25$ кВ)

t , с	2	4	6	8	10	14	18	22	30	38	46
n_3 , г/м ²	11,2	35,4	57,5	80,4	91,3	103,3	117	123,3	137	143	144
n_0 , г/м ²	23,8	43,8	60,5	74,5	86,3	104,4	117,1	126	136,6	141,9	144,5
n_1 , г/м ²	21,1	40,3	57,4	72,3	85,1	105	118,8	128,1	138,1	142,2	144,5

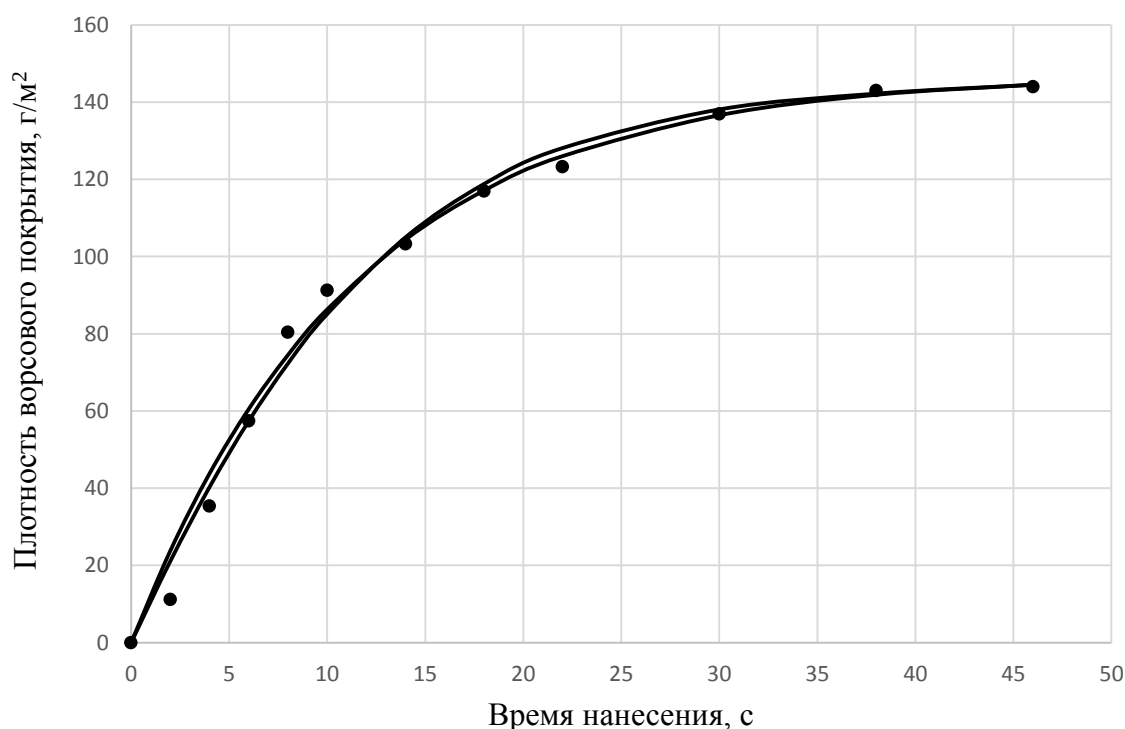


Рис. 3.1. Зависимость поверхностной плотности ворса от времени нанесения (вариант 1)

2. Ворс ПА, $U = 30$ кВ, $h = 70$ мм, $T = 3,3$ дтекс, $l = 1$ мм, $P_0 = 23$ г/м²с.

Т а б л и ц а 3.2. Результаты расчетных и экспериментальных значений плотности ворсового покрытия ($U = 30$ кВ)

t , с	2	4	6	8	10	14	18	22	30	38	46
n_3 , г/м ²	22,5	43,5	64,2	94,6	112,5	132,9	137,5	141,7	146,3	160,8	160,4
n_0 , г/м ²	29,0	52,9	72,6	88,7	101,9	121,8	135,1	144,2	154,4	159,1	161,2
n_1 , г/м ²	23,0	46,9	69,8	90,1	107,1	130,4	142,8	148,8	152,9	153,8	154

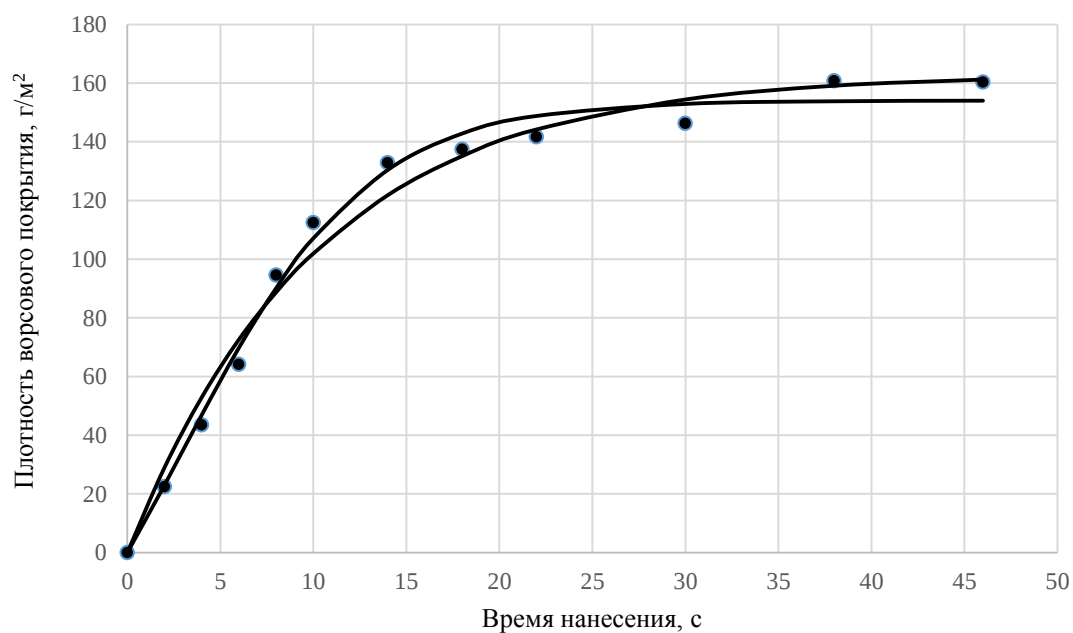


Рис. 3.2. Зависимость плотности ворса от времени нанесения (вариант 2)

3. Ворс РА, $U = 30$ кВ, $h = 70$ мм, $T = 3,3$ дтекс, $l = 1$ мм, $P_0 = 42$ г/м²с.

Т а б л и ц а 3.3. Результаты расчетных и экспериментальных значений плотности ворсового покрытия ($U = 30$ кВ)

t, c	2	4	6	8	10	14	18	22	30	38	46
$n_3, \text{г/м}^2$	34,0	75,8	99,2	109	117,7	133,8	143,8	150	152,5	160	166,7
$n_0, \text{г/м}^2$	40,0	69,8	92,2	109	121,6	138	147,2	152,4	156,9	158,3	158,8
$n_1, \text{г/м}^2$	43,4	72,2	92,6	108	118,8	134,2	144	150,3	157,4	160,8	162,4

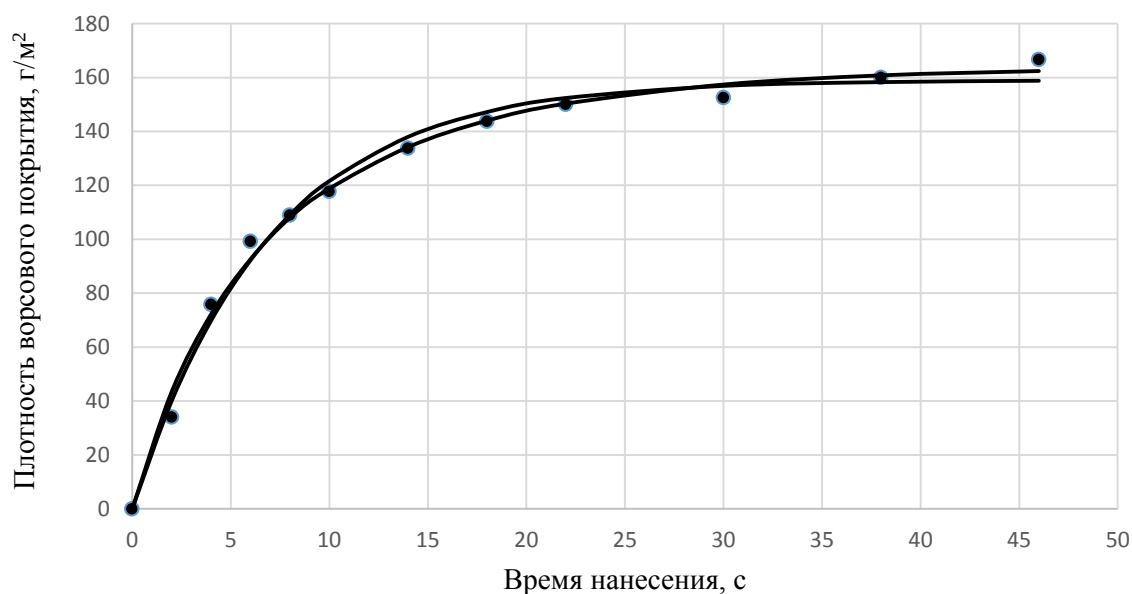


Рис. 3.3. Зависимость плотности ворса от времени нанесения (вариант 3)

4. Ворс РА, $U = 30$ кВ, $h = 70$ мм, $T = 3,3$ дтекс, $l = 1,5$ мм, $P_0 = 48$ г/м²с.

Т а б л и ц а 3.4. Результаты расчетных и экспериментальных значений плотности ворсового покрытия ($U = 30$ кВ)

t, c	2	4	6	8	10	14	18	22	30	38	46
$n_3, \text{г/м}^2$	56,8	61,3	79,2	110	119,6	131,7	132,9	142,1	144,2	145,4	150
$n_0, \text{г/м}^2$	39,5	68,4	89,5	105	116,3	130,6	138,2	142,3	145,6	146,6	146,9
$n_1, \text{г/м}^2$	43,0	71,0	90,4	104	114,4	127,9	135,9	140,7	145,6	147,6	148,4

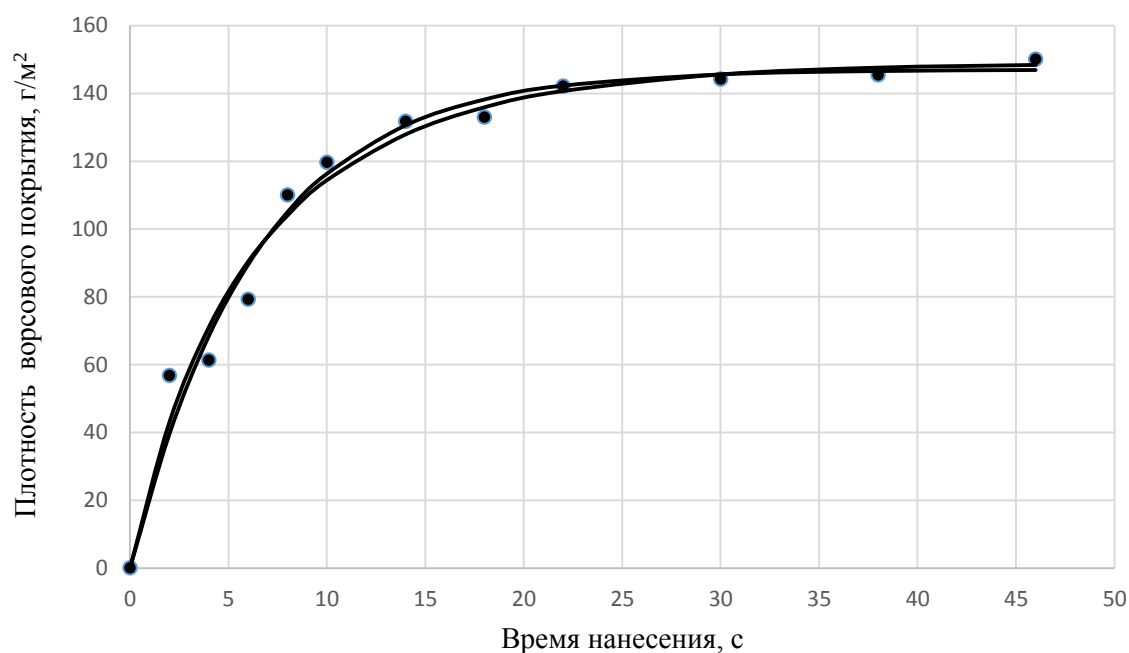


Рис. 3.4. Зависимость плотности ворса от времени нанесения (вариант 4)

Как хорошо видно из всех приведенных графических зависимостей (рис. 3.1–3.4), оба варианта достаточно хорошо описывают получаемые экспериментальные данные. По «внешнему виду» выбрать лучший вариант зависимости представляется затруднительным. Это, однако, не значит, что малые отличия не имеют значения. Изменение скорости выпуска рулонных флокированных материалов даже на несколько процентов может либо достаточно существенно увеличить объем производства и прибыль, либо плотность ворса на материале будет недостаточной, т. е. более точная модель позволит более точно прогнозировать производительность линии для данного ворса и задавать оптимальные условия нанесения.

Для выбора наилучшей модели необходимо воспользоваться критерием, о котором говорилось ранее, т. е. величиной суммы квадратов отклонений расчетных и экспериментальных значений S ($m = 11$).

$$S = \sum_{i=1}^m (n(t_i) - n_3(t_i))^2. \quad (3.8)$$

Кроме этого для всех вариантов было вычислено значение среднего отклонения δ , полученное следующим образом:

$$j = \rho(x) \cdot v(x) = \text{const}, \quad \delta = \sqrt{\frac{S}{m}}. \quad (3.9)$$

Этот параметр выбран дополнительно лишь для того, чтобы можно было более наглядно сравнить две модели. Для этого, если обозначить параметр соответствующий вычислению по модели (2.2) через δ_0 , а параметр, использующий выражение (3.7), – δ_1 , вычисляли их относительное отклонение

$$\Delta = \left| \frac{\delta_0 - \delta_1}{\delta_1} \right|. \quad (3.10)$$

Для сравнения моделей все результаты сведены в *табл. 3.5*.

Т а б л и ц а 3.5

Номер варианта	Модель	P_0 , г/м ² с	$n_{\max}$, г/м ²	k_0	S , г ² /м ⁴	δ	Δ , %
1	1	13	147	-	307	5,28	9,3
	2	11	145	0,51	257	4,83	
2	1	16	163	-	557	7,12	33,2
	2	11	154	1,8	314	5,34	
3	1	23	159	-	255	4,81	15,5
	2	27	164	-0,47	191	4,17	
4	1	23	147	-	538	7,0	3
	2	27	149	-0,39	508	6,8	

Важнейшим выводом из представленной таблицы является то, что для всех экспериментальных серий адекватность новой модели выше, причем для некоторых вариантов – существенно выше. Это позволяет сделать вывод о том, что исходное положение об изменении скорости подачи ворса по мере изменения плотности ворса на материале соответствует действительности.

По-видимому, верно и то, что изменение скорости подачи – результат взаимодействия двух тенденций: с одной стороны, происходит снижение объемного заряда в межэлектродном пространстве, из-за чего скорость подачи должна возрастать, с другой стороны, встречный поток ворса с зарядом противоположного знака замедляет процесс зарядки основного потока ворса и снижает скорость подачи. Колебания коэффициента k_0 находятся в широком диапазоне: от – 0,47 до +1,8.

Таким образом, важным следствием представленных результатов исследования можно считать хотя и косвенное, но достаточно убедительное подтверждение влияния объемной плотности заряда в зоне флокирования на скорость подачи ворса. Несмотря на то, что количественные отличия двух представленных выражений, казалось бы, не велики, при объемах производства, достигающих десятков миллионов метров в год речь идет о сотнях тысяч метров: либо скорость флокирования для ворса с известными свойствами можно увеличить и выпустить дополнительное количество материала, либо требуемая плот-

ность ворса при данных условиях флокирования не достигается и эти условия необходимо скорректировать.

Важнейшими параметрами для обеих моделей являются начальная скорость подачи ворса P_0 и предельная или максимальная плотность ворса $n_{\max}$. Оба параметра отвечают за скорость процесса нанесения ворса, т. е. за производительность, причем второй связан с ориентацией ворса на материале. Поэтому основными направлениями дальнейших исследований должно стать изучение факторов, определяющих скорость подачи ворса и ориентацию ворса на флокированном материале, связанную с предельной плотностью ворса. Однако первым этапом должен стать анализ процесса зарядки ворса, поскольку объемный заряд в зоне флокирования складывается из зарядов отдельных ворсинок, а заряд ворсинки связан с напряженностью электрического поля около заряжающего электрода. Таким образом, в первую очередь, необходимо обосновать характер взаимосвязи заряда с напряженностью.

3.3. Процесс формирования ворсового покрытия при использовании относительных параметров

На технологические параметры, входящие в соотношения (3.2) и (3.7), влияют как условия процесса нанесения, так и свойства ворса. Под технологическими параметрами мы здесь понимаем параметры, от которых непосредственно зависит получаемая плотность ворсового покрытия. Прежде всего, это скорость поступления ворса P и максимально достижимая плотность ворсового покрытия $n_{\max}$ (формула (3.2)). При этом взаимосвязь свойств ворса с этими параметрами до сих пор четко не определена. Возможно, эти сложности связаны с тем, что в показатель экспоненты входят оба параметра. Для более четкого выявления характера влияния свойств ворса на технологические параметры, возможно, их следует изменить [28]. Это можно сделать, если вместо скорости поступления ворса ввести иной технологический параметр – постоянную времени τ . Она будет определять скорость роста плотности ворсового покрова. Тогда соотношение (3.2) будет выглядеть следующим образом:

$$n(t) = n_{\max}(1 - e^{-t/\tau}). \quad (3.11)$$

Предложенный вариант зависимости не очень сильно отличается от (3.2), но важно то, что параметры здесь четко разделены. Постоянная времени τ отвечает за скорость роста плотности ворсового покрытия, а предельная плотность $n_{\max}$ определяет максимально возможную поверхностную плотность ворса на поверхности материала и связана с ориентацией ворса. Эту зависимость можно обобщить, записав ее в относительных переменных: $t_0 = t/\tau$ и $n_0 = n(t)/n_{\max}$.

$$n_0 = 1 - e^{-t_0}. \quad (3.12)$$

Такая запись годится для любого ворса и любых условий флокирования. Она демонстрирует в общем виде характер изменения поверхностной плотности ворса на поверхности материала от длительности нанесения ворса в относительных единицах. Вид данной зависимости представлен на *рис. 3.5*.

Реальная динамика связана с абсолютными значениями параметров: чем лучше ориентация ворса на поверхности, т. е. чем ближе к вертикали располагаются ворсинки, тем больше будет предельно возможная поверхностная плотность, и чем меньше значение постоянной времени τ , тем быстрее растет плотность ворсового покрытия.

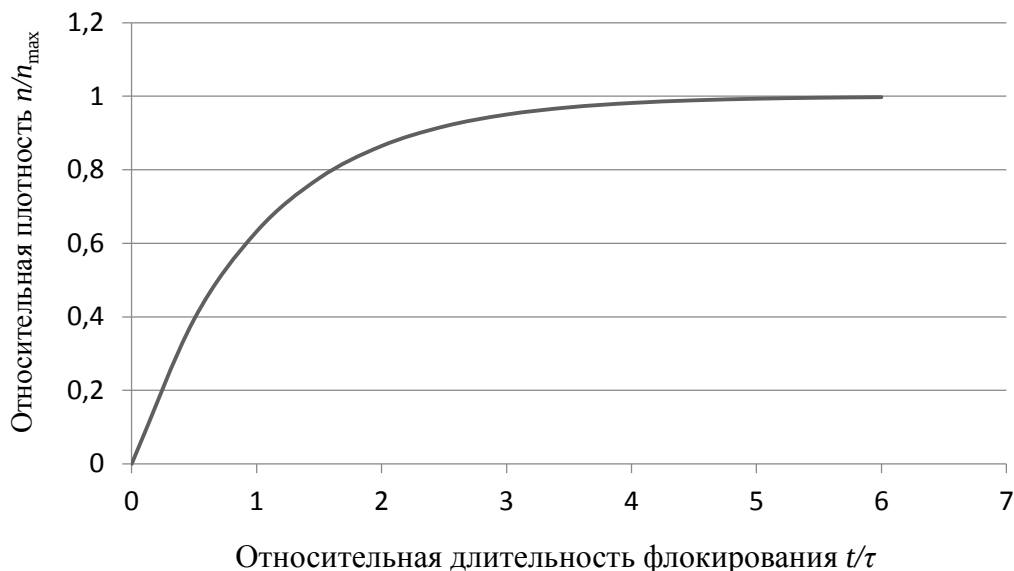


Рис. 3.5. Изменение поверхностной плотности ворса в относительных единицах

3.4. Оценка влияния режима нанесения и свойств ворса на технологические параметры процесса флокирования

В предыдущем разделе показано, что процесс формирования ворсового покрытия можно с достаточной точностью описать с использованием всего двух технологических параметров. Это предельная плотность ворсового покрытия $n_{\max}$ и скорость поступления ворса (скорость подачи) P или постоянная времени процесса τ . Все эти параметры зависят как от условий процесса нанесения (напряжение, расстояние между электродами, напряженность электрического поля), так и от электрофизических свойств ворса (коэффициент зарядки, электропроводность или электрическое сопротивление ворса).

Изучение влияния этих факторов является сложной теоретической и экспериментальной задачей. Ряд задач, связанных с этими вопросами, будет проанализирован в следующих разделах. Здесь мы рассмотрим некоторые из полученных закономерностей.

Влияние напряженности электрического поля на предельную плотность ворсового покрытия

Важной зависимостью является взаимосвязь максимальной плотности ворсового покрытия $n_{\max}$ с напряжением или напряженностью флокирования (рис. 3.6). В данном случае нам важен характер их взаимосвязи [9], [10], [19]. Исследования были проведены для двух видов ворса ($l = 0,7$ мм, $T = 0,33$ текс и

$l = 3,0$ мм, $T = 2,2$ текс). Эти графики (рис. 3.6) были получены в работе [19] и демонстрируют влияние напряженности поля на ориентацию ворса. Речь идет именно о напряженности поля, поскольку расстояние между электродами было постоянным (12 см) и при изменении напряжения на электродах изменяется напряженность электрического поля.

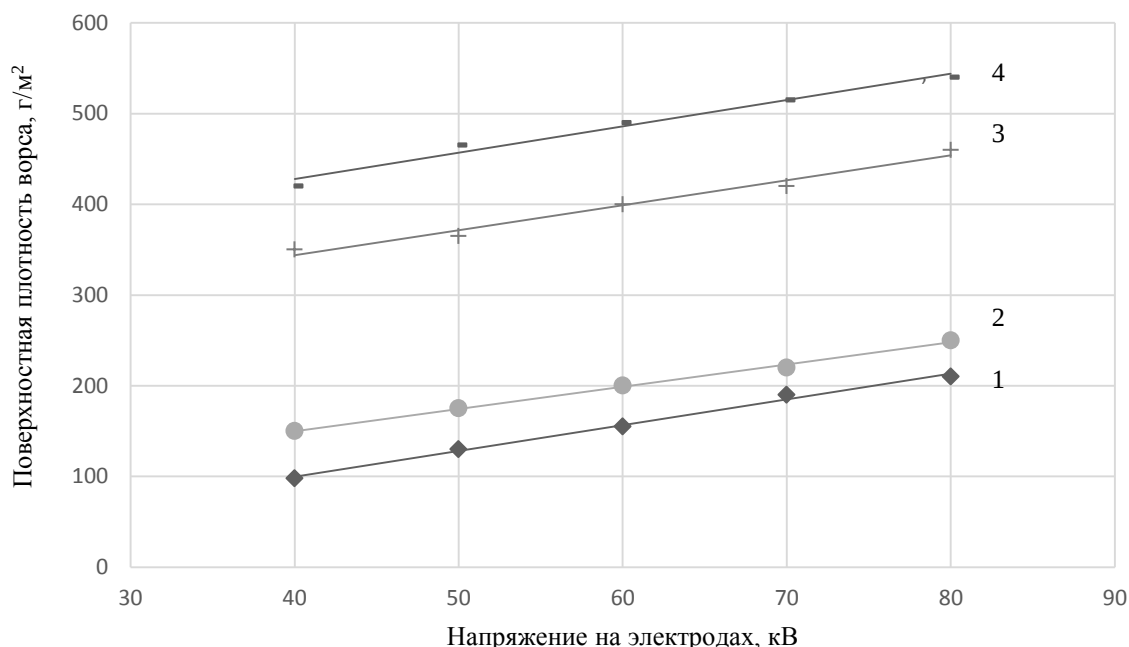


Рис. 3.6. Зависимость максимальной плотности ворсового покрытия от напряжения на электродах флокатора:
 1, 3 – флокирование «сверху-вниз»; 2, 4 – флокирование «снизу-вверх»;
 1, 2 – ворс: $l = 0,7$ мм, $T = 0,33$ текс; 3, 4 – ворс: $l = 3,0$ мм, $T = 2,2$ текс

Полученную закономерность можно объяснить тем, что при росте напряженности электрического поля увеличивается его влияние на заряд, распределенный по длине ворсинки, и благодаря этому ворсинка лучше ориентируется вдоль силовых линий электрического поля. Это ведет к улучшению ориентации ворса на поверхности материала и, тем самым, к увеличению предельной плотности ворсового покрытия.

Оценка влияния электрического сопротивления ворса

Введение такой технологической характеристики, как «постоянная времени» в модели (3.8) позволило четко разделить технологические параметры: величина предельной плотности ворсового покрытия связана с ориентацией ворса на поверхности материала, а «постоянная времени» определяет скорость роста плотности ворсового покрытия.

В работе [29] была сделана попытка исследовать возможную взаимосвязь «постоянной времени» со свойствами ворса и, прежде всего, с электропроводностью ворса. Для этого было использовано 8 видов ворса, имеющих одинаковую природу и геометрические размеры (ПА, $l = 0,5$ мм, $T = 0,33$ текс), но разное электрическое сопротивление и, соответственно, разную электропроводность.

Эксперимент строился следующим образом. Для каждого ворса измеряли электрическое сопротивление R и вычисляли его удельную электропроводность λ по методике, описанной в работах [9], [10], [19]. После этого для каждого ворса получали серию образцов при одинаковых условиях нанесения, но разной длительности флокирования. При каждом интервале времени изготавливали несколько образцов (от 3 до 5) и измеряли плотность ворсового покрытия как отношение привеса ворса на образце к его площади. На основе экспериментально полученных значений плотности ворсового покрова от продолжительности нанесения ворса с использованием метода наименьших квадратов [25] были найдены технологические параметры процесса (τ и $n_{\max}$).

Результаты измерений и расчетов приведены в *табл. 3.6*.

Т а б л и ц а 3.6. Результаты эксперимента для разного ворса

Номер измерения	R , МОм	$\lambda \cdot 10^8$, Ом ⁻¹ м ⁻¹	τ , с	$n_{\max}$, г/м ²
1	150	3,74	3,19	71,3
2	240	0,93	2,19	40,0
3	125	1,78	3,2	80,0
4	115	1,93	2,75	77,4
5	70	3,18	3,32	45,9
6	5,8	38,4	4,92	78,2
7	460	0,48	2,03	45,3

Анализ результатов эксперимента позволил выявить крайне интересную взаимосвязь нового технологического параметра – постоянной времени τ – и электропроводности ворса λ .

$$\tau = \tau_0 \ln \left(\lambda / \lambda_0 \right). \quad (3.13)$$

Значения констант равны $\tau_0 = 0,673$ с, $\lambda_0 = 2,6 \cdot 10^{-10}$ Ом⁻¹м⁻¹.

На *рис. 3.7* представлены результаты эксперимента и полученная расчетная зависимость постоянной времени от величины электропроводности.

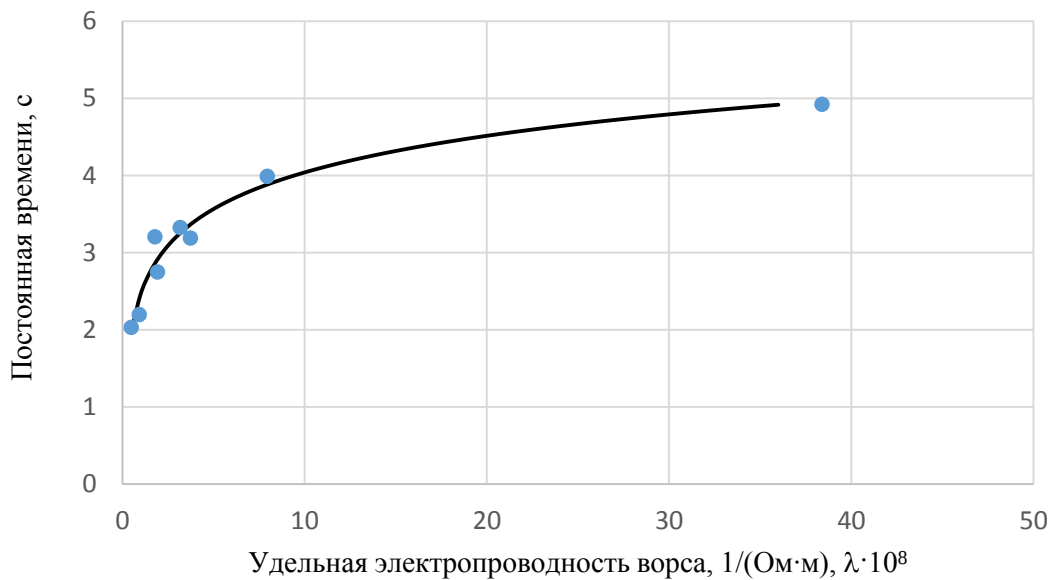


Рис. 3.7. Влияние удельной электропроводности ворса на постоянную времени роста плотности ворсового покрова

Использование такой характеристики ворса, как электропроводность, имеет свои преимущества и недостатки. Эта величина, безусловно, характеризует ворс в целом, но ее измерение [9], [10], [14], [19] связано с измерением толщины уплотненного образца ворса в измерительном датчике (см. разд. 2) при постоянном давлении. Эта толщина составляет обычно от 2 до 3 мм, и ее оценка вносит существенную погрешность при вычислении электропроводности. Поэтому в ряде случаев использовали непосредственно значение электрического сопротивления R , полученное для ворса. Полученная эмпирическая модель в этом случае выглядит следующим образом:

$$\tau = \tau_0 \ln R_0 / R, \quad (3.14)$$

где $R_0 = 10,4$ ГОм; $\tau_0 = 0,664$ с.

На *рис 3.8* представлены экспериментальные результаты для двух разных серий измерений и расчетная кривая для модели (3.14).

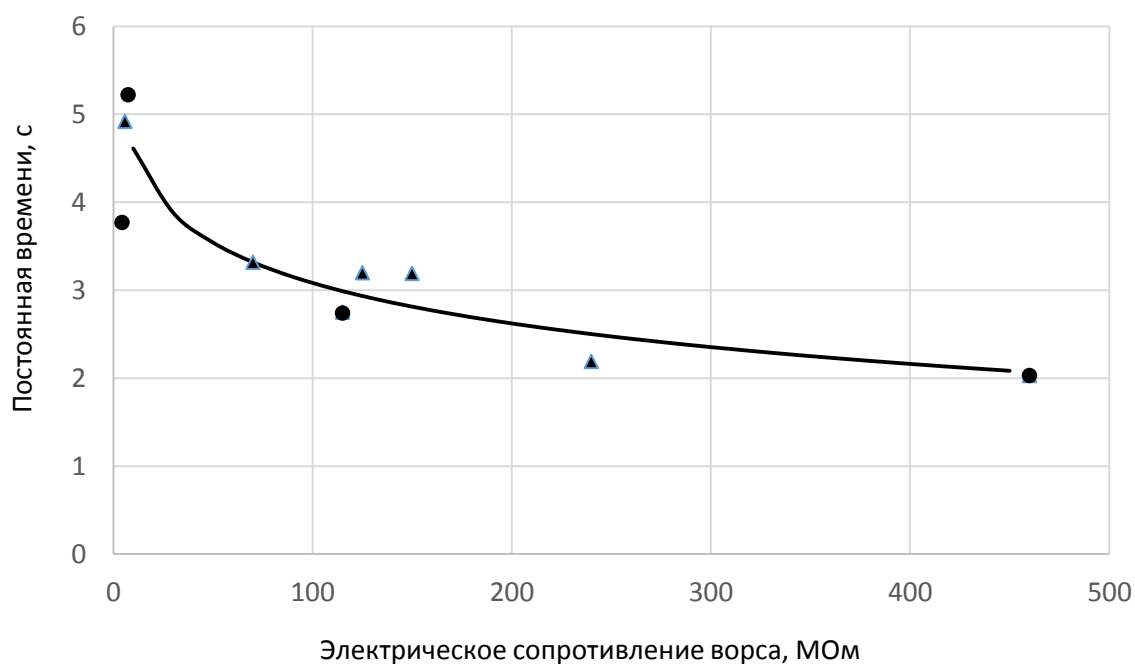


Рис. 3.8. Влияние электрического сопротивления ворса на постоянную времени процесса

Следует отметить, что приведенные результаты носят ограниченный характер, поскольку относятся к ворсу одной длины и одинаковой природы. В дальнейшем требуется обобщение моделей на основе дополнительных исследований.

4. ПРОЦЕСС ЗАРЯДКИ ВОРСА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Как было показано в предыдущих разделах, величина заряда ворса является, в значительной мере, определяющей для всего процесса флокирования.

В технологии электрофлокирования используют три вида зарядки волокон: трибозарядка или зарядка трением, контактная зарядка и зарядка посредством ионизации [1]–[7], [9], [10], [19]. Однако в настоящее время зарядку волокон посредством трения уже не применяют. Это связано с целым рядом причин и, в частности, из-за сравнительно малых, по сравнению с другими способами, значений получаемых зарядов. Последний вариант применяют сравнительно редко, преимущественно в электропневмофлокаторах, т. е. когда ворс в зону нанесения подают вместе с потоком воздуха. Такой способ зарядки требует более мощных источников высокого напряжения, сильно ионизирует воздух в помещении и создаёт значительную неравномерность между волокнами по величине заряда.

Механизм зарядки ворса в технологии электрофлокирования – это один из самых сложных вопросов. Трудно переоценить важность изучения процесса зарядки волокон, поскольку только на нем основано их взаимодействие с электрическим полем, ускорение и ориентация. Преимущественно в технологических процессах используют электродную (контактную) зарядку.

Процесс приобретения ворсом заряда был рассмотрен в целом ряде работ разных авторов. Сначала следует упомянуть работы Е. Н. Бершева [9], [10], где приобретение заряда ворсом исследовано преимущественно на основе экспериментов и получен ряд закономерностей, которые хотя и носят фактически качественный характер, но важны для построения модели процесса.

В работах лаборатории высоких напряжений Московского энергетического института [1]–[7] механизм зарядки волокон в электрическом поле высокого напряжения был рассмотрен достаточно подробно. Правда, исследования были проведены для волокон хлопка, длина которых существенно превышает длину волокон, используемых в технологии флокирования. Фактически было исследовано 3 механизма зарядки:

- зарядка волокон в электростатическом поле при контакте с электродом;
- зарядка потока волокон в электрическом поле коронного разряда;
- зарядка потока волокон в электростатическом поле при электрическом разряде с самих волокон.

Для технологии электрофлокирования могут представлять интерес все три упомянутых механизма зарядки ворса, но наиболее распространенным является контактная зарядка. Зарядка в поле коронного разряда применяется, как правило, только в таких специальных устройствах, как электропневмофлокаторы. Процесс приобретения волокном заряда на электроде в этих работах разделяется на несколько этапов: разделение зарядов по длине волокна, находящегося в электрическом поле, вследствие электростатической индукции; стекание заряда с ближнего к электроду конца волокна; отрыв волокна при выполнении условия равновесия сил.

Как было сказано выше, изучение процесса зарядки в перечисленных работах проводилось для хлопковых волокон длиной от 15 до 25 мм. Такая длина, конечно, значительно отличается от длины ворса, предназначенного для флокирования, и поэтому процесс зарядки может иметь свои особенности. Однако важно обратить внимание на те моменты, которые могут быть использованы при построении теории осаждения заряженного ворса в технологии электрофлокирования. В данной модели [1], [2], [4], [5], [7] волокно аппроксимируется вытянутым полуэллипсоидом вращения, находящимся на поверхности плоского электрода. Кинетика зарядки волокна описывается следующим выражением:

$$q = q_m(1 - e^{-t/\tau}), \quad (4.1)$$

где q – избыточный заряд волокна, Кл; q_m – предельный избыточный заряд, Кл; τ – постоянная времени зарядки, с; t – время зарядки, с.

Значение предельного заряда определяется следующим соотношением.

$$q_m = \frac{\pi \varepsilon_0 l^2}{\ln(2\sqrt{\frac{2l}{d}} - 1)} E_0, \quad (4.2)$$

где l – длина волокна, м; d – диаметр волокна, м; ε_0 – диэлектрическая постоянная, Ф/м; E_0 – напряженность внешнего электрического поля, В/м.

Рассчитаем значения максимального заряда для волокон, имеющих геометрические размеры, соответствующие технологии электрофлокирования. Для ворса характерных длин и диаметра результаты представлены в табл. 4.1.

Т а б л и ц а 4.1. Расчет максимального заряда ворса

E_0 , кВ/см	4					5				
d , мкм	20		30	50		20		30	50	
l , мм	0,5	1	1,5	2	3	0,5	1	1,5	2	3
$q_m \cdot 10^{13}$, Кл	10,79	37,75	79,23	134,48	284,55	13,49	47,19	99,03	168,10	355,69

Оценка предельных значений заряда по предложенной модели даёт приемлемые, хотя и несколько завышенные, по сравнению с экспериментальными, значения. Вероятно, это связано с тем, что вычисленное максимальное значение заряда ограничено порогом возникновения коронного разряда с конца волокна и в реальности практически не достигается. Это, конечно, можно объяснить и тем, что экспериментальные значения зарядов были получены для ворса со свойствами, не соответствующими оптимальным значениям.

Неопределенность остается в определении длительности процесса зарядки или условий отрыва волокна от электрода. Тем не менее, эта модель представляется достаточно интересной для количественной оценки зарядов ворса в процессе флокирования.

Однако для построения модели процесса важно, что предлагаемая методика расчета избыточного заряда дает результаты, сопоставимые с величинами заря-

дов, которые получают в эксперименте, а характер влияния напряженности полностью соответствует результатам измерений.

4.1. Процесс контактной зарядки ворса в технологии электрофлокирования

Как было показано выше [9], [10], [19], важным параметром процесса флокирования, в значительной степени определяющим его производительность и ориентацию ворса на поверхности материала, является величина среднего заряда ворса. Поэтому при разработке теории флокирования необходимо определить и экспериментально обосновать характер взаимосвязи заряда ворса с параметрами электрического поля и характеристиками ворса.

Наиболее убедительным механизмом зарядки волокна представляется следующий: на поверхности волокна, находящегося на электроде и частично ориентированного по направлению силовых линий, происходит разделение свободных зарядов, заряд с одного конца волокна стекает на электрод, пока не будут обеспечены условия отрыва ворсинки от электрода.

Исходя из этого можно будет оценить величину заряда ворсинок и, самое главное, влияние на него основных технологических параметров и, в первую очередь, напряженности электрического поля.

4.1.1. Линейное распределение заряда по длине биполярно-заряженного волокна в электрическом поле

Для решения поставленных выше вопросов сначала необходимо определиться с функцией распределения плотности заряда вдоль волокна, возникающей в результате разделения и частичного стекания зарядов.

Ранее в работах [1], [7], [9], [10] предполагалось, что волокно, участвующее в процессе электрофлокирования, заряжается биполярно. Однако в отличие от диполя его разноименные заряды не равны между собой, а их разность определяет величину избыточного заряда волокна. Это предположение [19], [31], [33]–[36] обосновывалось тем, что при электрофлокировании ворс, нанесенный на клеевую основу, имеет весьма хорошую ориентацию вдоль силовых линий электрического поля. Кратко изложим описание этой модели.

При рассмотрении распределения заряда вдоль волокна в ранних работах были рассмотрены три варианта [1]–[7]:

- 1) разнополярные заряды сконцентрированы на концах волокна;
- 2) разнополярные заряды имеют постоянную плотность вдоль волокна, но существует точка разрыва непрерывности, где заряд меняет знак;
- 3) плотность заряда линейно изменяется вдоль волокна.

По всей вероятности, рассмотрение первых двух вариантов лишено реального смысла, так как они физически невозможны. Реально рассматривать можно только третий вариант, хотя действительное распределение плотности заряда должно быть нелинейным. Линейное распределение плотности заряда не согласуется с уравнениями Максвелла.

Поскольку здесь решается задача лишь о механизме приобретения заряда и влиянии на его величину, в первую очередь напряженности электрического поля, то анализ будет проведен для упрощенной модели. Важно то, чтобы это распределение имело монотонный характер и не имело точек разрыва.

Кратко рассмотрим линейную модель распределения плотности заряда $\gamma(x)$ по длине волокна (рис. 4.1).

Зависимость плотности заряда на волокне в этом случае можно записать в следующем виде: $\gamma(x) = A(x - x_0)$, где x_0 – точка изменения знака заряда, м; $A = \text{const}$ – постоянный множитель, Кл/м².

В данном случае мы рассмотрим общую схему контактной зарядки волокна, находящегося на поверхности электрода (касаясь его) перпендикулярно его плоскости, в электрическом поле высокого напряжения, описанную, например, в работах [1], [8], [9], [19].

Сначала происходит разделение зарядов на волокне под действием внешнего электрического поля, а затем стекание заряда с ближнего к электроду конца. Оно сопровождается возрастанием плотности заряда на другом конце, чтобы скомпенсировать напряженность внешнего поля. При этом возрастает избыточный заряд волокна. Это происходит, пока не будет выполнено условие отрыва волокна от электрода: сила, действующая на заряженное волокно, превышает силу взаимодействия волокна с электродом. Предполагается, что для выполнения этого условия должно существовать некоторое расстояние между электродом и концом ворсинки Δ . Этот параметр может соответствовать, например, толщине окисной пленки на поверхности электрода [19]. В этом случае возможен отрыв волокна, заряженного биполярно.

На рис. 4.1 представлена линейная функция распределения плотности заряда вдоль волокна в координатах: ось абсцисс – местоположение точки на волокне, ось ординат – величина линейной плотности заряда γ .

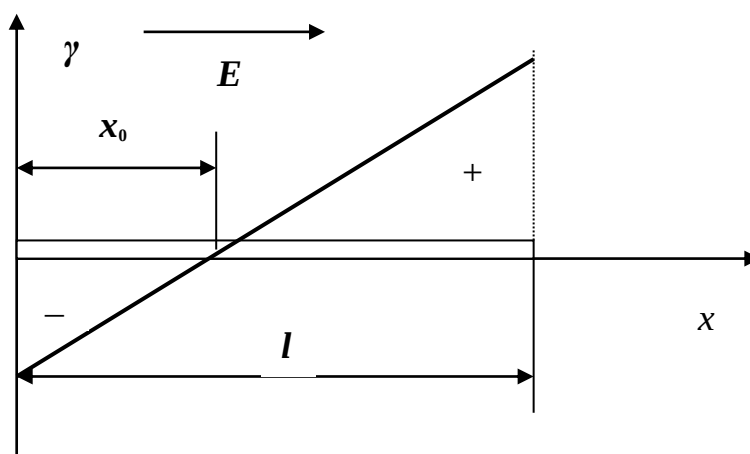


Рис. 4.1. Распределение плотности заряда вдоль волокна

Заряд q_1 , соответствующий полярности электрода, сосредотачивается на удаленном конце волокна, а заряд q_2 (противоположной полярности) – на конце волокна, прилегающем к электроду. Наличие между волокном и электродом

контакта, электрическая проводимость которого может быть существенно ниже проводимости самого волокна (например, из-за влияния окисной плёнки или загрязнений на поверхности электрода и т. п.), приводит к частичной нейтрализации (стеканию) заряда q_2 . В это же время заряд q_1 должен возрастать, чтобы скомпенсировать напряженность внешнего электрического поля E . Таким образом, распределение плотности заряда является переменным и изменяется до тех пор, пока не возникнут условия отрыва волокна от электрода. Именно условия отрыва ворсинки определяют величину избыточного заряда, которую мы и попытаемся оценить.

На образующийся избыточный заряд волокна $q = |q_1| - |q_2|$ действует сила электростатического взаимодействия $F = qE$. Эти же заряды (q_1 и q_2) вызывают силу F взаимодействия с индуцированным на поверхности зарядом, которая направлена в сторону электрода и вместе с силой тяжести G , если речь идет о нижнем электроде, удерживает волокно на электроде.

Моментом отрыва волокна от электрода можно считать условие равновесия, возникающее в процессе изменения зарядов, которое можно записать в следующем виде:

$$q \vec{E} + \vec{F} + m\vec{g} = 0, \quad (4.3)$$

где qE – действие внешнего поля на избыточный заряд ворсинки; F – взаимодействие заряда ворсинки с его «изображением» на электроде; m – масса ворсинки.

В уравнении (4.3), в первую очередь, необходимо учитывать силу взаимодействия F волокна с его «изображением». Если расстояние между волокном и его «изображением» принять равным 0, то сила взаимодействия волокна с электродом бесконечно велика и, следовательно, отрыв может произойти только после полного стекания ближнего к электроду заряда. Однако при полном стекании упомянутого заряда расчетное значение избыточного заряда существенно превышает наблюдаемое в эксперименте. Следовательно, линейное распределение плотности заряда не отвечает физическим требованиям.

После отрыва волокна сила взаимодействия с индуцированным зарядом резко уменьшается (практически до нуля), и оно начинает двигаться к противоположному электроду с ускорением.

Эту модель, конечно, нельзя использовать для сколь ни будь серьезных расчетов заряда. Во-первых, линейное распределение плотности заряда не согласуется с уравнениями Максвелла, а, во-вторых, для выполнения условия о биполярном характере распределения заряда приходится вводить в модель значительное влияние окисной пленки. При этом возникает противоречие: если окисную пленку снять, то заряд должен существенно измениться, а этого в реальности не наблюдается.

4.2. Нелинейное распределение плотности заряда вдоль ворсинки

Заряд, приобретаемый ворсом, – это та характеристика, которая позволяет управлять поведением всего массива волокон, находящегося в межэлектродном пространстве. Сила электростатического взаимодействия заряда с электрическим полем обеспечивает ускоренное движение ворсинок между электродами и их внедрение в клеевой слой на поверхности основы. Неравномерное распределение плотности заряда по длине ворсинки является причиной ее ориентации по силовым линиям во время движения в электрическом поле и определяет величину заряда ворсинки как интеграл этого распределения [19], [38]–[40].

Распределение плотности заряда вдоль волокна должно удовлетворять следующему закону:

$$\rho = \operatorname{div} D, \quad (4.4)$$

где ρ – объемная плотность заряда, Кл/м³; D – электрическая индукция, В/м.

Решение этого уравнения должно удовлетворять следующим условиям:

1) $D = 0$ внутри и на поверхности волокна;

2) $q = \int \rho dV$, где q – избыточный заряд волокна.

Задача о распределении плотности заряда для незаряженного проводника в электрическом поле с напряженностью E была решена в работе Л. Д. Ландау и Е. М. Лившица [37]. Волокно в этом случае расположено параллельно силовым линиям вдали от электрода. Функциональная зависимость, описывающая данное распределение, имеет следующий вид:

$$\gamma(x) = \frac{4\pi\epsilon_0 E x}{\ln\left(4 \frac{l^2/4 - x^2}{d^2/4}\right) - 2}, \quad (4.5)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная, Ф/м; E – напряженность электрического поля, В/м; x – координата по длине ворсинки, м; l – диаметр ворсинки, м; d – длина ворсинки, м.

Процесс формирования заряда ворсинки можно представить следующим образом (рис. 4.2). На рис. 4.2, а показано распределение плотности заряда по длине ворсинки в соответствии с соотношением (4.5). Если ворсинка находится на поверхности электрода, то на электроде формируется ее «зеркальное изображение» (рис. 4.2, б). Это такое же распределение заряда, как на ворсинке, но с противоположным знаком. Далее с ворсинки заряд стекает на электрод, постепенно формируя распределение, соответствующее соотношению (4.5), но для ворсинки вместе с ее «изображением» (рис. 4.2, в).

В работах [38], [39] было высказано предположение, что в момент отрыва заряженной ворсинки от электрода величина плотности заряда ворсинки у поверхности электрода равна нулю. Т. е. распределение заряда на рис. 4.2, в соответствует условию отрыва ворсинки от поверхности электрода. Расчет величин

ны заряда мы будем проводить путем интегрирования только по половине длины (в данном случае от 0 до 1: *рис. 4.2, в*).

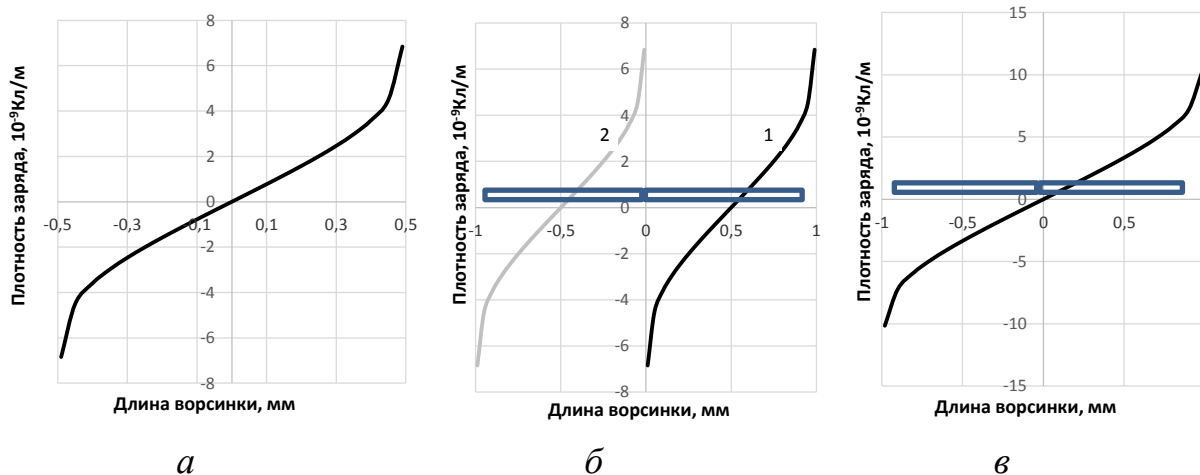


Рис. 4.2. Распределение плотности заряда по длине ворсинки в электрическом поле:

- а* – распределение для незаряженной, электропроводной частицы;
б – распределение для ворсинки (1) и «отражения» (2) на электроде;
в – распределение на ворсинке в момент отрыва

Выражение (4.5) дает нам характер необходимой зависимости распределения плотности заряда вдоль волокна. Согласно высказанному предположению, ближний к электроду заряд должен полностью стечь на электрод. Новое распределение плотности заряда должно соответствовать распределению (4.5), но при длине в два раза большей реальной длины ворсинки. Т. е. указанное распределение сохраняется, но для ворсинки вместе с ее изображением.

Второе положение для расчета связано с тем, что, несмотря на простой вид функции (4.5), она имеет два разрыва около точки $x \approx l/2$. Это создает проблемы при попытке вычисления избыточного заряда волокна.

Полиномиальная модель распределения заряда

В работах [38], [39] при аппроксимации зависимости (4.5) был использован полином третьей степени, который гораздо лучше линейной зависимости пригоден для этой цели. Такой полином имеет только два значимых коэффициента вместо четырех. Распределение плотности заряда в виде такого полинома, имеющего наилучшее приближение к зависимости (4.5), для ворсинки длиной 0,5 мм выглядит следующим образом:

$$\gamma(x) = E(2,87 \cdot 10^{-4}x^3 + 1,43 \cdot 10^{-11}x). \quad (4.6)$$

Графическое сопоставление этой зависимости и исходной (4.5) для напряженности 4 кВ/см представлено на *рис. 4.3*.

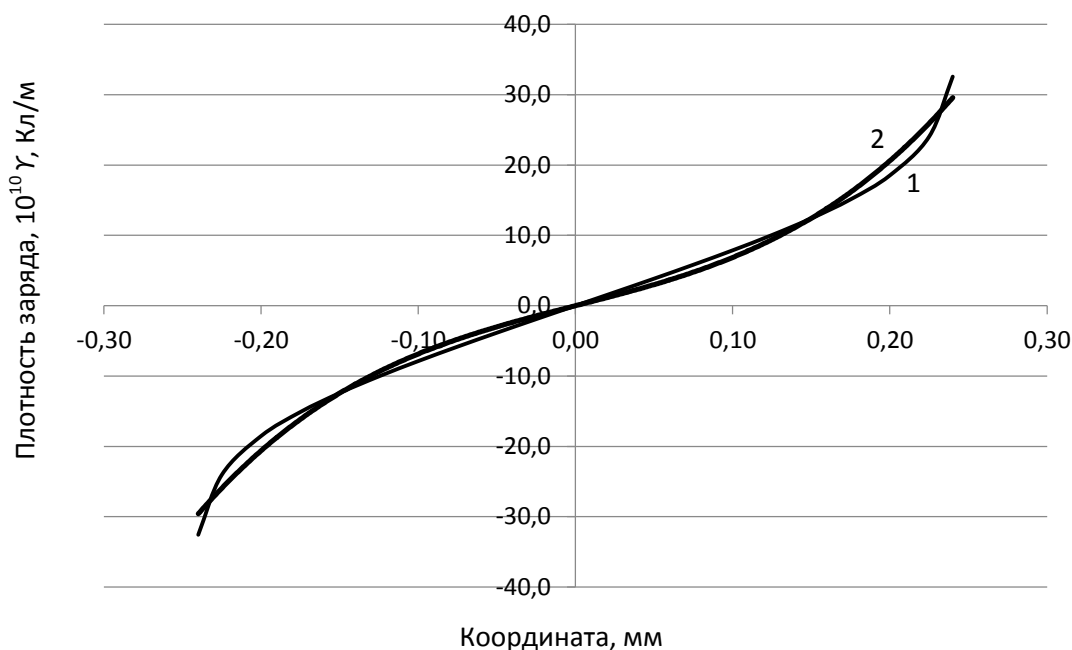


Рис. 4.3. Аппроксимация распределение плотности заряда:
 1 – распределение плотности заряда вдоль волокна согласно (4.5);
 2 – полиномиальная аппроксимация распределения плотности заряда

Распределение плотности заряда после *полного* стекания заряда одного знака для такого же ворса 0,5 мм выглядит следующим образом:

$$\gamma(x) = E(5,79 \cdot 10^{-5}x^3 + 1,1 \cdot 10^{-11}x). \quad (4.7)$$

В полученных эмпирических соотношениях напряженность электрического поля E в В/м, а координата x в м. Поэтому численные коэффициенты являются размерными.

Эта зависимость для напряженности $E = 4$ кВ/см и длины ворса 0,5 мм представлена на *рис. 4.4*. Следует, конечно, иметь в виду, что предложенный вариант зависимости (4.6) не единственно возможный и даже не самый точный для аппроксимации функции (4.5). Однако он значительно точнее линейной функции и в то же время может быть использован для технологических расчетов.

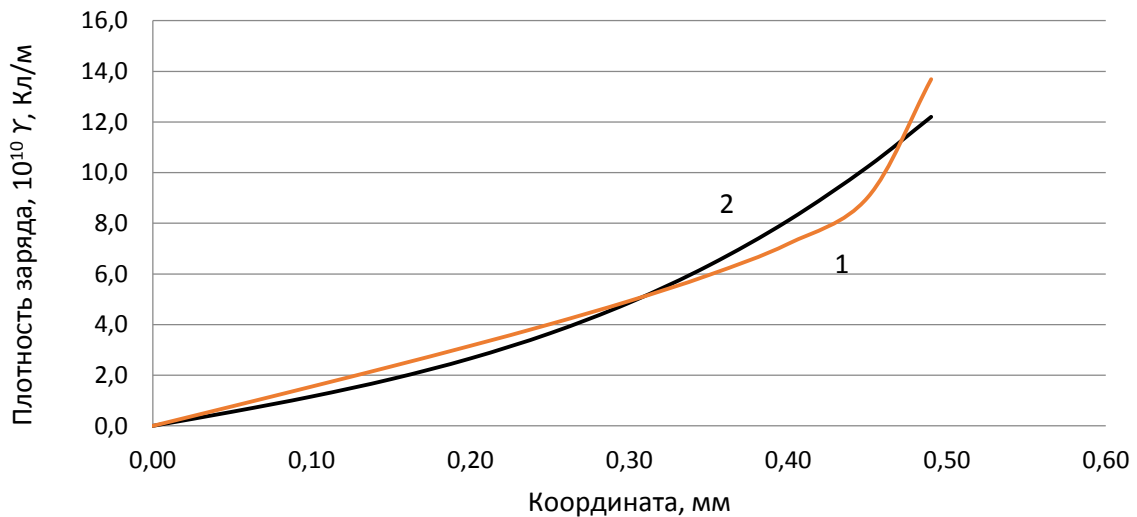


Рис. 4.4. Распределение плотности заряда для напряженности $E = 4 \text{ кВ/см}$ и длины ворса $0,5 \text{ мм}$:

- 1 – распределение плотности заряда вдоль волокна согласно (4.5);
2 – распределения плотности заряда согласно (4.7)

Гиперболическая модель распределения плотности заряда вдоль волокна

Выше была проведена аппроксимация функции (4.5) полиномом третьей степени. Недостатками такого подхода является то, что аппроксимация в виде полинома не вполне соответствует исходному соотношению, поскольку в отличие от него имеет конечное значение на конце волокна, а также модель не учитывает влияния величины диаметра ворсинки.

В работе [40] предложено аппроксимировать первоначальное соотношение (4.5) гиперболической функцией вида (4.8), которая позволяет рассчитать величину максимально возможного заряда, избегая указанных недостатков.

Заменим описание Ландау на вариант, удобный для интегрирования и максимально соответствующий соотношению (4.5), сохраняя числитель неизменным, а знаменатель записав в более простом виде. Для ворсинки удвоенной длины $2l$ функция будет выглядеть следующим образом:

$$\gamma(x) = a \frac{4\pi\epsilon_0 E x}{\left[\left(\frac{l}{d}\right)^2 - \left(\frac{2x}{d}\right)^2\right]^n}, \quad (4.8)$$

где a и n – безразмерные коэффициенты, обеспечивающие наилучшее совпадение (4.8) и (4.5).

Здесь имеются только две константы, численное значение которых требуется определить. Это можно сделать на основе метода наименьших квадратов посредством подбора значений a и n , обеспечивающих минимальную разницу между функциями (4.8) и (4.5) на нужном нам интервале (от 0 до l) по способу, описанному в работах [38]–[40]. Так, для ворса длиной 1 мм и диаметром $0,02 \text{ мм}$ $a = 0,495$; $n = 0,161$.

На рис. 4.5 приведены вид исходной зависимости (обозначен черной штриховой линией) и предлагаемый вариант (обозначен серой сплошной линией), из

которых видно, что новая зависимость (4.8) практически идеально совпадает с исходной зависимостью (4.5).

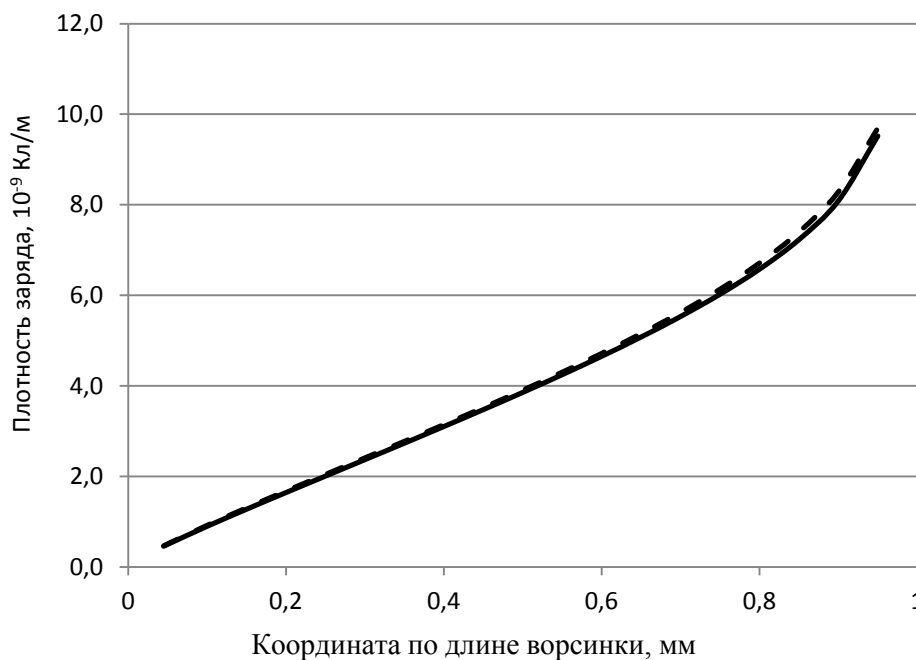


Рис. 4.5. Распределение плотности заряда вдоль ворсинки

4.3. Модели расчета максимального заряда ворса

Максимальный заряд ворсинки можно вычислить, проинтегрировав функцию плотности заряда по длине ворсинки от 0 до l .

Полиномиальная модель

Для определения избыточного заряда волокна на основе модели распределения плотности заряда по длине ворсинки, описанной в разд. 4.2 полиномом третьей степени, необходимо проинтегрировать это выражение по длине ворсинки. Это и будет максимально возможное значение заряда. Это значение определяется напряженностью электрического поля и длиной волокна.

$$q_{\max} = E \int_0^l (ax^3 + bx) dx = \frac{aEl^2}{4} \left(l^2 + \frac{2b}{a} \right), \quad (4.9)$$

где l – длина ворсинки, м; E – напряженность электрического поля, В/м; a, b – эмпирические коэффициенты, имеющие следующие размерности: $[a] = \text{с}/(\text{Ом} \cdot \text{м}^3)$, $[b] = \text{с}/(\text{Ом} \cdot \text{м})$.

Модель расчета включает численное определение коэффициентов полинома, описывающего распределение плотности заряда по длине, для ворса заданной длины (разд. 4.2). Коэффициенты выбраны такими, чтобы отличие полинома от зависимости (4.5) было минимальным. После этого можно, интегрируя соответствующее выражение, получить значение максимального заряда.

Полученные зависимости для распределения плотности заряда при разной длине ворса и результаты расчета максимального избыточного заряда ворсинки для напряженности $E = 4$ кВ/см представлены в *табл. 4.2*. Рассчитанная величина заряда представляется близкой к реальным значениям заряда.

Т а б л и ц а 4.2. Результаты расчета максимального заряда ворсинки

Длина l , мм	Функция распределения плотности заряда	Максимальный заряд $q_{\max}$, Кл
0,5	$\gamma(x) = E(5,79 \cdot 10^{-5}x^3 + 1,1 \cdot 10^{-11}x)$	$9,12 \cdot 10^{-13}$
1,0	$\gamma(x) = E(9,02 \cdot 10^{-6}x^3 + 1,03 \cdot 10^{-11}x)$	$2,96 \cdot 10^{-12}$
1,5	$\gamma(x) = E(3,18 \cdot 10^{-6}x^3 + 0,97 \cdot 10^{-11}x)$	$5,97 \cdot 10^{-12}$
2,0	$\gamma(x) = E(1,54 \cdot 10^{-6}x^3 + 0,94 \cdot 10^{-11}x)$	$9,98 \cdot 10^{-12}$
2,5	$\gamma(x) = E(0,89 \cdot 10^{-6}x^3 + 0,91 \cdot 10^{-11}x)$	$14,9 \cdot 10^{-12}$
3,0	$\gamma(x) = E(0,57 \cdot 10^{-6}x^3 + 0,88 \cdot 10^{-11}x)$	$20,5 \cdot 10^{-12}$

На основе представленных данных можно получить приближенную зависимость для расчета коэффициентов a и b в зависимости от длины ворса, а также максимального заряда ворса (Кл) от длины ворса (мм) и напряженности (кВ/см).

Гиперболическая модель

Для расчета величины максимального заряда необходимо проинтегрировать соотношение (4.8) для плотности заряда по длине волокна следующим образом:

$$q_{\max} = 4a\pi\varepsilon_0 E \int_0^{l/2} \frac{xdx}{\left[\left(\frac{l}{d}\right)^2 - \left(\frac{2x}{d}\right)^2\right]^n}. \quad (4.10)$$

После замены переменных и интегрирования получим соотношение для определения максимального заряда ворсинки с известными геометрическими размерами при заданной напряженности электрического поля:

$$q_{\max} = a \frac{2\pi\varepsilon_0 E l^2}{(1-n)} \left(\frac{d}{2l}\right)^{2n}. \quad (4.11)$$

Не сложно рассчитать параметры a и n по методике, описанной выше, для наиболее характерных соотношений длины и диаметра волокна, а затем вычислить значение максимального заряда (4.11) и коэффициента зарядки $k_{\max}$. Результаты соответствующих расчетов для полиамидного ворса ($E = 4$ кВ/см) представлены в *табл. 4.3*.

Т а б л и ц а 4.3. Расчет максимального заряда и коэффициента зарядки

l , мм	T , текс	d , мм	a	n	$q_{\max}$, Кл	$k_{\max}$, Кл·м/В
0,5	0,17	0,014	0,509	0,166	$8,23 \cdot 10^{-13}$	$2,06 \cdot 10^{-18}$
0,5	0,33	0,020	0,592	0,189	$9,25 \cdot 10^{-13}$	$2,31 \cdot 10^{-18}$
1,0	0,33	0,020	0,495	0,161	$2,98 \cdot 10^{-12}$	$7,45 \cdot 10^{-18}$
1,5	0,67	0,027	0,506	0,163	$6,51 \cdot 10^{-12}$	$16,3 \cdot 10^{-18}$
2,0	0,67	0,027	0,472	0,153	$1,07 \cdot 10^{-11}$	$26,7 \cdot 10^{-18}$
2,0	2,20	0,050	0,440	0,147	$1,27 \cdot 10^{-11}$	$31,7 \cdot 10^{-18}$
3,0	2,20	0,050	0,490	0,158	$2,57 \cdot 10^{-11}$	$64,2 \cdot 10^{-18}$

Данные, представленные в таблице, показывают, что параметры a и n связаны с геометрическими характеристиками ворса. Предложенная методика позволяет достаточно точно оценить максимально возможную величину заряда для ворса любой природы и геометрических размеров при любой напряженности электрического поля.

Представленные значения зарядов являются максимально возможными в данной модели процесса зарядки ворса, однако существуют и другие явления, которые могут ограничивать величину заряда.

Влияние коронного разряда

Величина заряда ворсинки ограничена порогом возникновения на конце ворсинки коронного разряда при высокой напряженности электрического поля около него.

В работе академика В. И. Попкова [7] предложено соотношение для расчета максимального заряда волокна. При большей величине заряда на конце ворсинки возникает коронный разряд. Можно сопоставить оценку этого заряда для ворса указанных выше геометрических размеров с измеренными зарядами в области снижения максимальной плотности ворсового покрова. Для расчета максимального заряда предложено следующее соотношение (4.12):

$$q_{\max} = \frac{\pi d \varepsilon_0}{4} l E_{\text{к.р}}, \quad (4.12)$$

где $E_{\text{к.р}}$ – напряженность начала коронного разряда, В/м.

Пороговая напряженность для отрицательного и положительного коронного разрядов составляет соответственно $E^- = 265$ кВ/см, $E^+ = 300$ кВ/см. Мы используем значение напряженности для отрицательного коронного разряда, поскольку источники высокого напряжения, используемые в технологии флокирования, как правило, имеют отрицательную полярность. Предельное значение заряда для отрицательного коронного разряда, способного возникнуть на конце ворсинки длиной 0,5 мм и диаметром 20 мкм согласно (4.12) равно $18,4 \cdot 10^{-13}$ Кл.

Исходя из этого получим условие перехода к ограничению заряда границей коронного разряда (4.13):

$$q_{\max} = a \frac{2\pi \varepsilon_0 E l^2}{(1-n)} \left(\frac{d}{2l}\right)^{2n} > q_{\max}^{\text{к.р}} = \frac{\pi d \varepsilon_0}{4} l E_{\text{к.р}}. \quad (4.13)$$

Как мы видим, выполнение этого неравенства определяется напряженностью и соотношением длины и диаметра ворсинок. Рассчитаем для характерных значений диаметра d такую длину l , при которой начинается коронный разряд. Пример расчета таких значений для напряженности $E = 4$ кВ/см представлен в табл. 4.4. Расчет осуществлялся с использованием метода наименьших квадратов путем подбора длины ворсинки, при которой правая и левая части неравенства (4.11) равны.

Т а б л и ц а 4.4. Расчет длины ворса, соответствующей порогу возникновения коронного разряда при напряженности 4 кВ/см

Т, текс	d , мм	l , мм	a	n	$q_{\max}$	$q_{\text{к.р}}$
0,17	0,014	0,98	0,509	0,166	$2,53 \cdot 10^{-12}$	$2,53 \cdot 10^{-12}$
0,33	0,020	1,366	0,495	0,161	$5,09 \cdot 10^{-12}$	$5,09 \cdot 10^{-12}$
0,67	0,027	1,834	0,506	0,163	$9,12 \cdot 10^{-12}$	$9,12 \cdot 10^{-12}$
2,2	0,050	3,342	0,49	0,158	$3,08 \cdot 10^{-11}$	$3,08 \cdot 10^{-11}$

Соответствующие зависимости для напряженностей 4 и 5 кВ/см и диаметра ворса от 0,014 до 0,05 мм представлены на рис. 4.6.

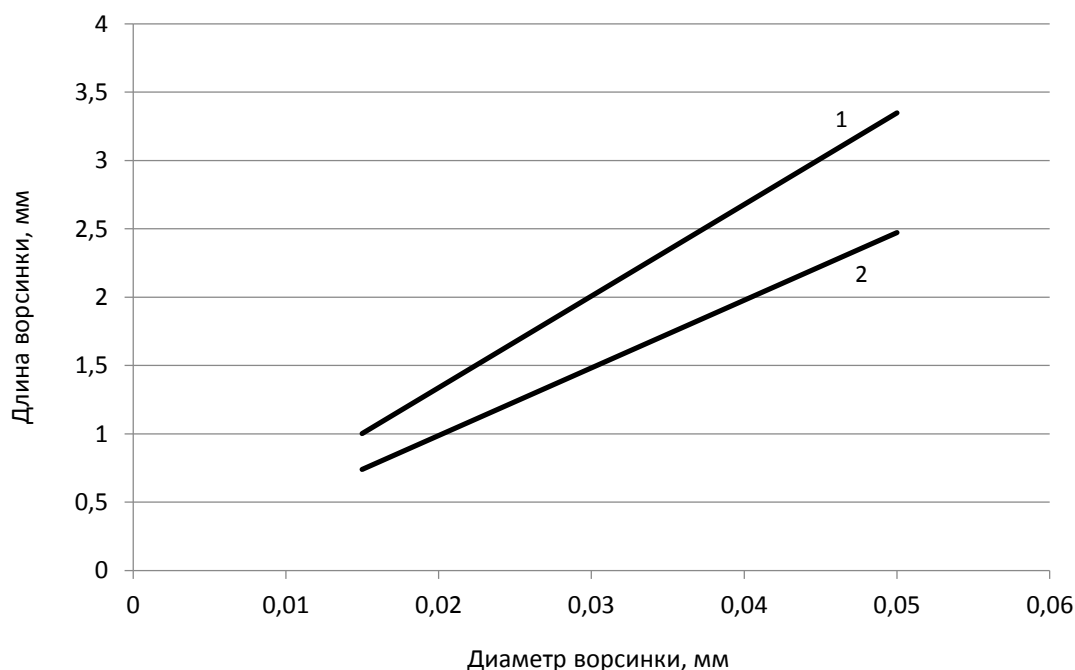


Рис. 4.6. Зависимости величины заряда ворса от диаметра ворсинок:
1 – $E = 4$ кВ/см; 2 – $E = 5$ кВ/см

Четко прослеживаемая разность углов наклона прямых, по всей вероятности, может быть связана с величиной напряженности электрического поля. Для проверки данного предположения был проведен расчет значений отношения длины ворсинки к ее диаметру, при котором возникает коронный разряд при разных величинах напряженности (табл. 4.5).

Т а б л и ц а 4.5. Расчет значений отношения длины ворсинки к ее диаметру, при которой возникает коронный разряд для различных напряженностей

E , кВ/см	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
l/d	164,71	123,70	97,72	79,82	67,03	57,03	49,51

Вид этой зависимости приведен на *рис. 4.7*.

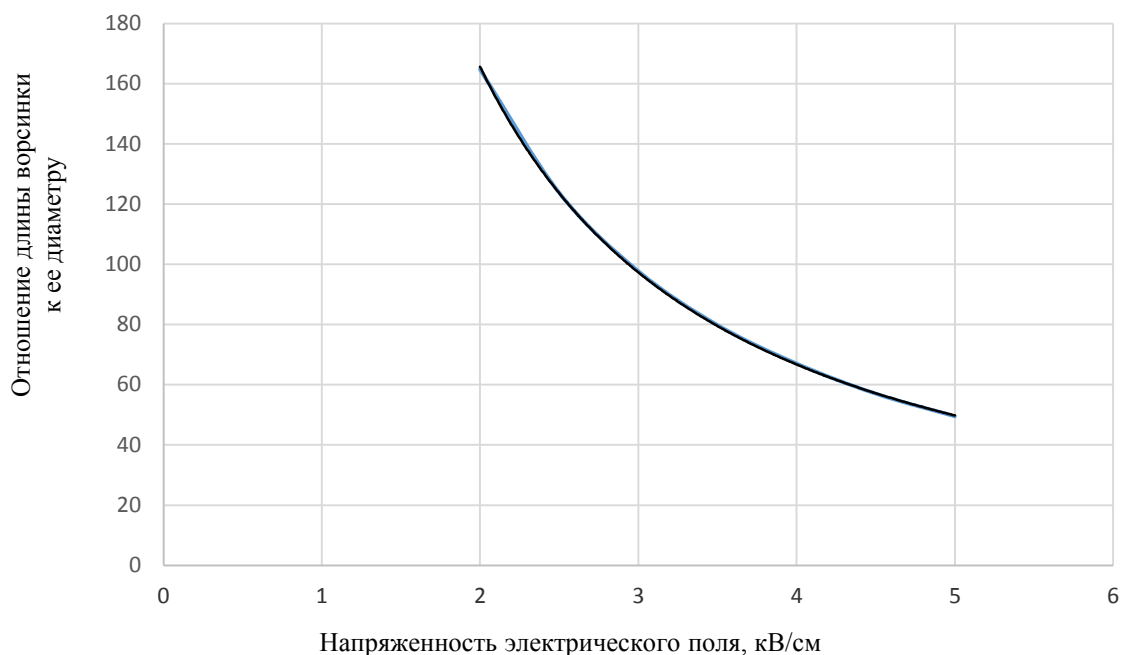


Рис. 4.7. Зависимость отношения длины ворсинки к ее диаметру, при котором возникает коронный разряд, от величины напряженности

Характер этой зависимости достаточно удачно описывается простыми соотношениями (4.14):

$$l/d = \left(\frac{E_0}{E}\right)^{1,312} \quad \text{или} \quad E = E_0 \left(\frac{d}{l}\right)^{0,762}, \quad (4.14)$$

где E — напряженность возникновения коронного разряда с ворсинки, кВ/см; $E_0 = 98,2$ кВ/см — расчетная постоянная.

Данные выражения позволяют рассчитывать величину напряженности электрического поля для произвольного соотношения длины и диаметра ворсинки, при котором на ее конце возникнет коронный разряд.

В *табл. 4.6* представлены расчеты напряженности коронного разряда (4.14) для ранее рассчитанных соотношений l и d .

**Т а б л и ц а 4.6. Расчет величины напряженности коронного разряда
для различных соотношений l и d**

E , кВ/см	d , мм	l , мм	E_p , кВ/см
4	0,02	1,34	3,99
	0,03	2,00	3,99
	0,04	2,67	3,99
	0,05	3,35	3,98
5	0,02	1,00	4,98
	0,03	1,48	5,03
	0,04	1,98	5,03
	0,05	2,48	5,02

Как мы видим, значения E и E_p практически совпадают, что позволяет сделать вывод о верности полученных выражений (4.14).

Реальные значения зарядов в большинстве случаев меньше максимальных значений, и возникновение коронного разряда, вероятно, будет происходить при большей величине напряженности.

4.4. Анализ процесса зарядки ворса на основе результатов экспериментальных исследований

Влияние электропроводности ворса на его заряд

Реальные значения заряда должны быть меньше максимальных и связаны с электропроводностью ворса. Из практики флокирования известно, что электропроводность волокна, равная нулю, ведет к нулевому заряду – диэлектрическое волокно не приобретает заряд в электрическом поле. Однако при такой модели зарядки высокая электропроводность волокна также может вести к снижению избыточного заряда. Быстрое стекание заряда с конца волокна на электрод ведет к тому, что на другом конце волокна заряд не успевает приобрести сколь-нибудь большое значение до момента отрыва от электрода. Из этого можно заключить, что должна существовать такая электропроводность ворса, при которой достигается максимальное значение заряда. Вполне вероятно, что это значение будет меньше теоретически максимального заряда.

Для получения эмпирического соотношения, связывающего заряд ворса с его электропроводностью, были проведены необходимые измерения при одинаковой напряженности (2,75 кВ/см) для ворса с разной электропроводностью и одинаковой длиной (0,5 мм). Измерение заряда проведено по методике, описанной в работе [19], с дополнительным электродом, снижающим влияние ионизации на результаты.

Т а б л и ц а 4.7

Ворс	Удельная электропроводность λ , Ом ⁻¹ м ⁻¹	Заряд $q_{\text{экс}}$, 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	$(2,25 \pm 0,56) \cdot 10^{-8}$	$(4,68 \pm 0,25) \cdot 10^{-13}$

Максимальный заряд для ворса с такими геометрическими размерами и указанной напряженностью электрического поля равен $6,36 \cdot 10^{-13}$ Кл. Результаты экспериментов показали, что все измеренные значения не превышают этой величины. Эмпирическое соотношение для расчета заряда может выглядеть следующим образом:

$$q = 2,35 \cdot q_{\text{max}} \frac{\ln(\lambda/\lambda_0)}{\lambda/\lambda_0}, \quad (4.15)$$

где $\lambda_0 = 1,35 \cdot 10^{-8}$ 1/(Ом·м) – эмпирическая постоянная.

Можно получить и несколько более точное эмпирическое выражение

$$q = 2,39 \cdot q_{\text{max}} (\lambda/\lambda_0) e^{-\lambda/\lambda_0}, \quad (4.16)$$

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

Для наглядности на *рис. 4.8* представлены обе расчетные зависимости и экспериментальные результаты измерения заряда.

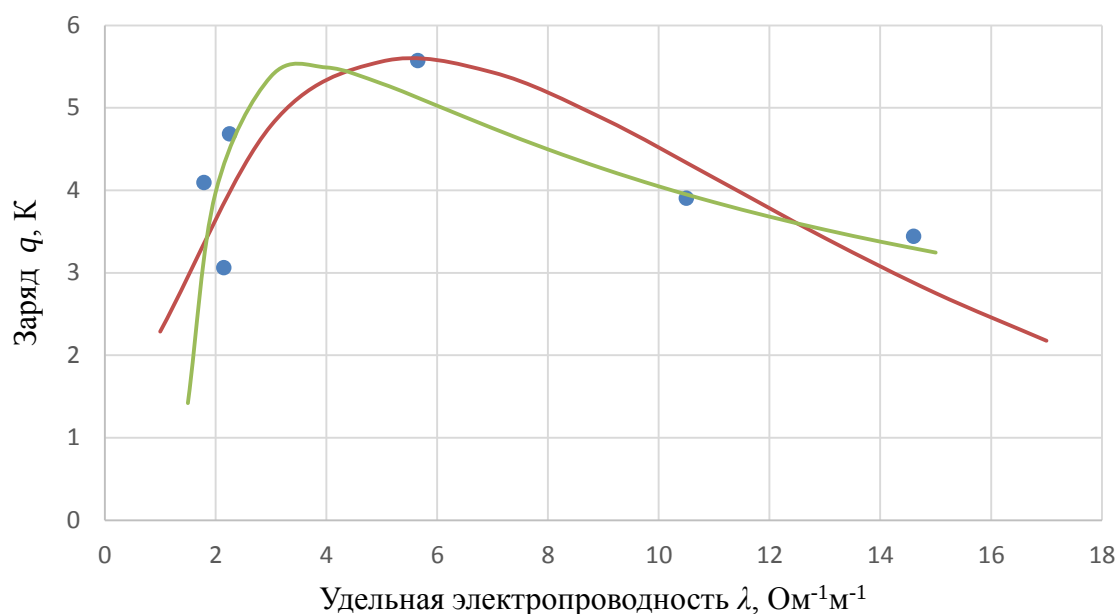


Рис. 4.8. Расчетная и экспериментальная зависимости заряда ворса от его удельной электропроводности

Полученная зависимость подтверждает сделанные предположения, хотя и носит частный характер.

Измерение заряда ворса и сравнение с моделью для ворса разных геометрических размеров

Модель зарядки ворса, рассмотренная выше, и предложенный вариант определения величины заряда ворса (4.9) позволяют оценить его максимальную величину и динамику изменения заряда при изменении напряженности электрического поля (4.9). Эти выводы необходимо проверить на основе экспериментальных данных о величине среднего заряда ворса в зависимости от напряженности электрического поля.

Результаты экспериментального измерения зарядов для ПА ворса длиной 1 мм и линейной плотностью 0,33 текс в зависимости от напряженности электрического поля представлены в *табл. 4.8*.

Т а б л и ц а 4.8. Сравнение с экспериментом

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	$4,0 \cdot 10^{-13}$	$7,51 \cdot 10^{-13}$	$1,12 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{-12}$	$2,19 \cdot 10^{-12}$	$2,41 \cdot 10^{-12}$
k , Кл·м/В	$5,71 \cdot 10^{-18}$	$5,40 \cdot 10^{-18}$	$5,38 \cdot 10^{-18}$	$5,40 \cdot 10^{-18}$	$6,31 \cdot 10^{-18}$	$5,78 \cdot 10^{-18}$
$q_{\max}$, Кл	$5,21 \cdot 10^{-13}$	$1,04 \cdot 10^{-12}$	$1,55 \cdot 10^{-12}$	$2,07 \cdot 10^{-12}$	$2,59 \cdot 10^{-12}$	$3,11 \cdot 10^{-12}$
$q/q_{\max}$	0,77	0,72	0,72	0,72	0,84	0,77

Данные *табл. 4.8* демонстрируют нам, что все измеренные значения заряда не превышают расчетных максимальных значений. При этом коэффициент зарядки и доля от максимальной величины заряда сохраняются постоянными во всем диапазоне изменения напряженности E :

$k = (5,66 \pm 0,38)10^{-18}$ Кл·м/В; $\Delta k/k = 6,7$ %; $\delta = q/q_{\max} = 0,76 \pm 0,05$; $\Delta\delta/\delta = 6,6$ %.

Это может свидетельствовать о том, что доля от максимального заряда ворса, так же как и коэффициент зарядки ворса k , определяется электрофизическими характеристиками ворса и, в первую очередь, его электропроводностью или сопротивлением.

Для дополнительной проверки высказанных предположений были использованы еще два вида ворса с другими геометрическими размерами: $l = 0,5$ мм, $d = 20$ мкм и $l = 3$ мм, $d = 50$ мкм. Измерение среднего заряда ворса было проведено также с помощью емкостного датчика по методике, описанной выше. Полученные экспериментальные данные представлены в *табл. 4.9*, и здесь же показаны расчетные значения максимальных зарядов для указанных значений длины ворса и напряженности электрического поля. Результаты свидетельствуют, что все измеренные значения заряда вновь имеют значения меньше теоретически максимальных величин.

Т а б л и ц а 4.9. Экспериментальные и максимальные расчетные значения заряда

Параметры ворса	E , кВ/см	2,80	3,35	3,89	4,19	4,25	4,67	5,10	5,83
$l = 0,5$ мм $d = 20$ мкм	$q_э$, Кл	$3,6 \cdot 10^{-13}$	$4,4 \cdot 10^{-13}$	$5,6 \cdot 10^{-13}$	$6,0 \cdot 10^{-13}$	$6,1 \cdot 10^{-13}$	$7,0 \cdot 10^{-13}$	$7,3 \cdot 10^{-13}$	$7,8 \cdot 10^{-13}$
	$q_{\max}$, Кл	$6,47 \cdot 10^{-13}$	$7,74 \cdot 10^{-13}$	$8,99 \cdot 10^{-13}$	$9,69 \cdot 10^{-13}$	$9,82 \cdot 10^{-13}$	$1,08 \cdot 10^{-12}$	$1,18 \cdot 10^{-12}$	$1,35 \cdot 10^{-12}$
	k , Кл·м/В	$1,30 \cdot 10^{-18}$	$1,31 \cdot 10^{-18}$	$1,44 \cdot 10^{-18}$	$1,43 \cdot 10^{-18}$	$1,44 \cdot 10^{-18}$	$1,50 \cdot 10^{-18}$	$1,43 \cdot 10^{-18}$	$1,34 \cdot 10^{-18}$
	$q_э/q_{\max}$	0,564	0,568	0,623	0,619	0,621	0,648	0,619	0,579
$l = 3,0$ мм $d = 50$ мкм	$q_э$, Кл	$4,6 \cdot 10^{-12}$	$5,3 \cdot 10^{-12}$	$5,7 \cdot 10^{-12}$	$5,8 \cdot 10^{-12}$	$5,9 \cdot 10^{-12}$	$6,4 \cdot 10^{-12}$	$7,0 \cdot 10^{-12}$	$7,7 \cdot 10^{-12}$
	$q_{\max}$, Кл	$1,79 \cdot 10^{-11}$	$2,15 \cdot 10^{-11}$	$2,49 \cdot 10^{-11}$	$2,69 \cdot 10^{-11}$	$2,72 \cdot 10^{-11}$	$2,99 \cdot 10^{-11}$	$3,27 \cdot 10^{-11}$	$3,74 \cdot 10^{-11}$
	k , Кл·м/В	$1,64 \cdot 10^{-17}$	$1,58 \cdot 10^{-17}$	$1,46 \cdot 10^{-17}$	$1,38 \cdot 10^{-17}$	$1,39 \cdot 10^{-17}$	$1,37 \cdot 10^{-17}$	$1,37 \cdot 10^{-17}$	$1,32 \cdot 10^{-17}$
	$q_э/q_{\max}$	0,256	0,247	0,229	0,216	0,216	0,214	0,214	0,206

$$k_{\max}(0,5 \text{ мм}) = 2,31 \cdot 10^{-18} \text{ Кл·м/В}; k_{\max}(3,0 \text{ мм}) = 6,41 \cdot 10^{-17} \text{ Кл·м/В}.$$

Средние значения измеренных коэффициентов зарядки при разной напряженности: $k(0,5 \text{ мм}) = 1,4 \cdot 10^{-18} \text{ Кл·м/В}$; $k(3,0 \text{ мм}) = 1,44 \cdot 10^{-18} \text{ Кл·м/В}$.

Средние значения относительного заряда для разной напряженности:

$$q/q_{\max}(0,5 \text{ мм}) = 0,605 \pm 0,051; \text{ относительная погрешность } \delta = 8,43 \text{ \%}.$$

$$q/q_{\max}(3,0 \text{ мм}) = 0,225 \pm 0,08; \text{ относительная погрешность } \delta = 35 \text{ \%}.$$

Как мы видим, закономерности, выявленные на основе данных *табл. 4.8*, в целом подтверждаются и для других видов ворса (*табл. 4.9*). Здесь также доля максимального заряда сохраняется постоянной при изменении напряженности электрического поля. Наблюдаемая тенденция снижения доли максимального заряда для длинного ворса по всей видимости связана с порогом возникновения коронного разряда. Начало коронного разряда (4.11) ограничивает рост заряда, что воспринимается, как снижение коэффициента зарядки.

Оценка влияния расстояния между электродами на коэффициент зарядки ворса

Проведенный анализ процесса зарядки показал взаимосвязь заряда ворсинки и напряженности электрического поля. Однако исследования, подтверждающие это положение, были проведены при постоянном расстоянии между электродами. Это оставляет за кадром вопрос, будет ли коэффициент пропорциональности между зарядом и напряженностью одинаковым для разного межэлектродного расстояния. Для изучения этого вопроса были проведены серии измерений заряда ворса от напряженности при $h = 7$ см и $h = 10$ см. Диапазон изменения напряженности в первом случае составил от 1,4 до 4,3 кВ/см, а во втором – от 1,5 до 3,5 кВ/см. Проведенные расчеты коэффициентов зарядки (коэффициент пропорциональности) показали:

$$k(h = 7 \text{ см}) = (3,34 \pm 0,31)10^{-18} \text{ Кл·м/В}; k(h = 10 \text{ см}) = (2,96 \pm 0,11)10^{-18} \text{ Кл·м/В}.$$

С учетом полученных погрешностей значения коэффициентов отличаются не существенно. Это подтверждает предположение о том, что основной фактор влияния – это напряженность электрического поля у поверхности заряжающего электрода.

Полученные результаты дают возможность в дальнейшем разработать модели процесса флокирования, которые позволят рассчитать плотность тока, создаваемого движущимся заряженным ворсом, с учетом возникающего динамического равновесия: заряд ворсинок зависит от напряженности электрического поля у поверхности заряжающего электрода, величина среднего заряда ворсинок обуславливает в значительной степени объемный заряд в области нанесения ворса, а значение объемного заряда и его распределение весьма существенно влияют на распределение напряженности в зоне флокирования и, в первую очередь, на ее значение около заряжающего электрода. Именно в этом смысле идет речь о динамическом равновесии процесса.

5. АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ЗАРЯЖЕННОГО ВОРСА В ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОФЛОКИРОВАНИЯ

Целью данного раздела является создание физической модели процесса флокирования. Важной частью в него входит получение взаимосвязи свойств ворса и технологических характеристик процесса флокирования, отвечающих, в первую очередь, за производительность, с условиями его протекания. Для этого, прежде всего, необходимо определить основные факторы процесса, влияющие на формирование ворсового покрытия [9]–[12], [19], [42].

Важнейшим вопросом технологии электрофлокирования является вопрос о максимально возможной скорости протекания данного процесса. Для этого сначала необходимо определить, какие факторы ограничивают скорость формирования ворсового покрытия. Поскольку речь в данном случае идет о движении потока заряженных частиц в электрическом поле, то будет разумно для построения математической модели использовать методы, применяемые в теории электричества. Существует, конечно, ряд отличий от описания процесса движения потока электронов или ионов. Выражается это, например, в том, что заряд движущихся частиц зависит от напряженности электрического поля и размера частиц.

Сначала проведем мысленный эксперимент. Представим себе, что мы имеем возможность неограниченно увеличивать скорость поступления ворса в зону флокирования. Будем считать, что при этом условия зарядки ворса не нарушаются. Вопрос состоит в том, будет ли в той же степени расти и скорость флокирования. Ответ на этот вопрос очевидно отрицательный, поскольку возрастающий заряд ворса, находящегося в пространстве между электродами, будет препятствовать проникновению нового ворса. Неизбежно, при некотором значении скорости подачи ворса должно установиться динамическое равновесие между объемным зарядом между электродами и скоростью поступления туда заряженного ворса. Уже на начальном этапе для проверки этого положения необходимо было выяснить экспериментально, будет ли одинаковой скорость подачи ворса без напряжения и при наличии рабочего напряжения на электродах. Было показано [19], что скорость подачи ворса без напряжения можно увеличивать практически неограниченно, в то время как наличие напряжения в рабочем диапазоне однозначно ведет к существенному ограничению скорости подачи ворса.

Проанализируем процессы, происходящие на начальном этапе флокирования как наиболее важном. Будем считать, что это интервал времени, когда практически весь ворс, поступающий из бункера, внедряется в клеевой слой. Т. е. мы имеем однонаправленный поток заряженного ворса. В дальнейшем, по мере заполнения материала ворсом, возникает и нарастает встречный (обратный) поток ворса с зарядами противоположной полярности. Однако определяющим фактором протекания процесса флокирования является именно начальный этап.

Сквозь сетку бункера в зону флокирования поступает ворс (*рис. 5.1*), который заряжается и начинает двигаться к противоположному электроду, имея в начальный момент скорость, близкую к нулю. Это означает, что объемная плотность заряда около подающего электрода будет максимальной.

По мере нарастания скорости движения ворса объемная плотность заряда снижается. Ворс, заряженный одноименно с электродом и находящийся в объеме флокатора, препятствует проникновению в зону нового ворса, и возникает динамическое равновесие между количеством ворса, проходящего сквозь сетку, и объемным зарядом ворса, уже находящимся между электродами. Движущийся заряженный ворс создает электрический ток между электродами.

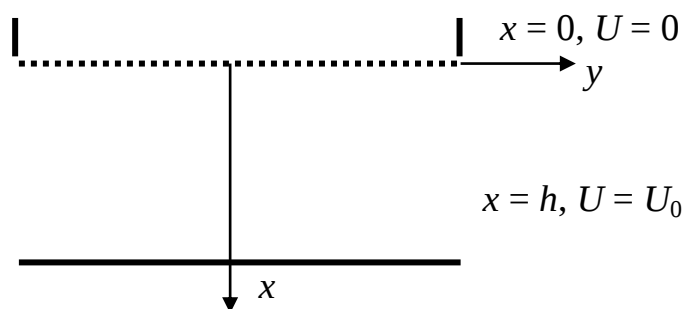


Рис. 5.1. Схема расположения электродов в координатах XU

Вследствие всего изложенного задачу можно сформулировать следующим образом: необходимо выявить взаимосвязь плотности тока, формируемого движущимся заряженным ворсом, со свойствами ворса и условиями его осаждения. Т. е. надо получить аналитическую зависимость для плотности тока от напряженности электрического поля, технологических параметров процесса и свойств ворса при отсутствии ограничения на скорость поступления ворса в зону флокирования. Эта зависимость позволит вычислить максимально возможную скорость поступления ворса к поверхности флокируемого материала, которая определяет длительность формирования ворсового покрытия.

Решать поставленную задачу можно различными путями и с разной степенью приближения, но сначала необходимо сформулировать основные положения, на основе которых будет строиться теория процесса.

5.1. Исходные положения для построения модели осаждения ворса

Построение любой модели физического процесса должно основываться на определенных, четко сформулированных исходных положениях, характеризующих принципиальные моменты рассматриваемого процесса. В данном случае сделана попытка сформулировать все необходимые в дальнейшем исходные положения [19], [42], [43].

1. Рассматриваем процесс между бесконечными плоскостями. Распределение потенциала U в зоне флокирования (рис. 5.1) зависит только от координаты x :

$$\frac{\partial U(x, y, z)}{\partial y} = \frac{\partial U(x, y, z)}{\partial z} = 0. \quad (5.1)$$

2. В зоне флокирования с учетом п. 1 выполняется уравнение Пуассона:

$$\frac{\partial^2 U(x)}{\partial x^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_0}, \quad (5.2)$$

где $\rho(x)$ – объемная плотность заряда, находящегося в межэлектродном пространстве; ε_0 – диэлектрическая постоянная.

3. Рассматриваем однонаправленное движение ворса вдоль оси x , т. е., как было сказано выше, начальный этап флокирования. Плотность тока $\mathbf{j}$, создаваемая движением заряженного ворса от верхнего электрода к нижнему, можно записать в следующем виде:

$$\mathbf{j} = \rho(x) \cdot \mathbf{v}(x) = \text{const}, \quad (5.3)$$

где $\mathbf{v}(x)$ – скорость ворса в точке с координатой x .

4. Напряженность электрического поля около заряжающего и противоположного электрода с учетом объемного заряда ворса с поверхностной плотностью заряда Q_Σ согласно теореме Гаусса можно записать

$$E_0 = E(x=0) = U/h - Q_\Sigma / 2\varepsilon_0, \quad E(x=h) = U/h + Q_\Sigma / 2\varepsilon_0. \quad (5.4)$$

5. Заряд всех ворсинок q одинаков и определяется напряженностью у поверхности заряжающего электрода:

$$q = k E_0, \quad (5.5)$$

где k – «коэффициент зарядки» ворса, Кл·м/В.

6. Выполняется закон сохранения энергии для каждой ворсинки с учетом работы против силы аэродинамического сопротивления:

$$\frac{mv^2(x)}{2} + \int_0^x C v(x) dx = qU(x), \quad (5.6)$$

где $C = C_0 l (d - d_0)$ – эмпирическое соотношение, определяющее коэффициент пропорциональности для силы аэродинамического сопротивления [9], [10] движению ворсинки $F_c = C \cdot v$, l – длина ворсинки, м; d – диаметр ворсинки, м; m – масса ворсинки, кг; $C_0 = 1,11 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$; $d_0 = 9,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

На этих положениях будет строиться модель поведения заряженного ворса в технологии электрофлокирования.

5.2. Модель процесса нанесения ворса с учетом его свойств и технологических параметров процесса

Все имеющиеся данные, как расчетные, так и экспериментальные [8]–[10], показывают: скорость ворсинок при флокировании такова, что сила аэродинамического сопротивления является соизмеримой с другими действующими силами и должна оказывать существенное влияние на процесс движения ворса. В свою очередь, распределение объемной плотности заряда и скорости ворсинок непосредственно связано с величиной плотности тока и скорости подачи ворса, являющимися уже технологическими характеристиками процесса. Поэтому объ-

ективный анализ этого вопроса требует создания модели, учитывающей влияние аэродинамического сопротивления на движение потока ворса [19], [42], [43]. Получение соотношений для плотности тока и максимальной скорости подачи ворса при всех указанных условиях позволяет вывести адекватные соотношения для предельно достижимой скорости нанесения ворса на материал в зависимости от напряжения, межэлектродного расстояния, заряда ворса и т. д.

5.2.1. Анализ процесса флокирования на основе «энергетического» подхода к его математическому описанию

При разработке данной модели были использованы исходные положения, представленные выше в разд. 5.1. Считаем малым влияние веса волокна, поскольку даже при напряженности электрического поля 2 кВ/см и малом заряде волокон, равном 10^{-13} Кл, сила электростатического взаимодействия примерно в 6 раз больше веса волокна (полиамид, $l = 1$ мм, $d = 0,02$ мм).

Используем уравнение закона сохранения энергии для ворсинки с зарядом q , движущейся между электродами с разностью потенциалов U (5.6). Это соотношение верно для произвольной точки с координатой x между электродами. Продифференцировав это уравнение дважды, получаем

$$\frac{d}{dx} \left(m\nu \frac{d\nu}{dx} + C \cdot \nu \right) = q \frac{d^2 U}{dx^2}. \quad (5.7)$$

Как было показано в работах [19], [43], при движении ворса во флокаторе с учетом его объемного заряда выполняется соотношение, обусловленное двумя положениями (5.3) и (5.4). Таким образом:

$$\frac{d^2 U}{dx^2} = \frac{j}{\varepsilon_0 \nu(x)}.$$

Следовательно, уравнение (5.7) можно переписать в виде

$$\frac{d}{dx} \left(m\nu \frac{d\nu}{dx} + C\nu \right) = \frac{qj}{\varepsilon_0 \nu(x)}. \quad (5.8)$$

Решение этого дифференциального уравнения ищем в виде $\nu = A \cdot x^k$. Результат постановки в (5.8) дает следующее выражение для скорости ворсинки в зависимости от координаты:

$$\nu = \sqrt{\frac{2jqx}{\varepsilon_0 C}}. \quad (5.9)$$

Имея распределение ворсинок по скоростям вдоль оси x , легко получить и распределение потенциала между электродами. Воспользуемся выражением закона сохранения энергии (5.6) и формулой для скорости ворсинки в произвольной точке между электродами (5.9). Тогда распределение потенциала в зоне между электродами, с учетом объемного заряда ворса, будет выглядеть следующим образом:

$$U(x) = \frac{jm}{\varepsilon_0 C} x + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2jC}{\varepsilon_0 q}} x^{3/2}. \quad (5.10)$$

Теперь можно получить выражение для плотности тока в зависимости от параметров процесса. Для этого воспользуемся граничными условиями задачи: $U(x=0) = 0$, $U(x=h) = U_0$. Решая полученное уравнение относительно величины плотности тока j , легко получить искомое соотношение, характеризующее процесс флокирования, т. е. зависимость плотности тока от разности потенциалов и других параметров:

$$j = \frac{2\varepsilon_0 h C^3}{9m^2 q} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{9mq}{2h^2 C^2} U_0} \right)^2. \quad (5.11)$$

Как уже было сказано выше, это исключительно важная технологическая характеристика, определяющая величину заряда, переносимого ворсинками, через площадь 1 м^2 за 1 с . Исключительно важно то, что плотность тока напрямую связана с максимально достижимой при данных условиях скоростью поступления ворса к флокируемому материалу:

$$P = j \cdot m / q. \quad (5.12)$$

В полном виде это выражение будет выглядеть следующим образом:

$$P = \frac{2\varepsilon_0 h C^3}{9mq^2} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{9mq}{2h^2 C^2} U_0} \right)^2. \quad (5.13)$$

Использование выражений (5.11), (5.13) непосредственно будет не вполне корректным, поскольку плотность тока зависит от среднего заряда ворса, который, в свою очередь, связан с величиной напряженности около заряжающего электрода (5.5).

5.2.2. Анализ процесса флокирования на основе граничных условий зарядки ворса

Как было отмечено выше, величина заряда ворса, согласно модели процесса зарядки и экспериментальным данным, пропорциональна напряженности электрического поля у поверхности заряжающего электрода $q = k \cdot E_0$, а эту напряженность легко определить из распределения потенциала в зоне флокирования (5.10):

$$E(x) = -\frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{jm}{\varepsilon_0 C} - \sqrt{\frac{2jC}{\varepsilon_0 q}}. \quad (5.14)$$

Отсюда, учитывая граничные условия (5.4), получаем величину напряженности на поверхности электродов

$$E(x=0) = E_0 = -\frac{jm}{\varepsilon_0 C}; \quad E(x=h) = E_h = -\frac{jm}{\varepsilon_0 C} - \sqrt{\frac{2jCh}{\varepsilon_0 q}}. \quad (5.15)$$

Из полученных соотношений можно выразить величину плотности тока двумя способами:

$$j = \frac{\varepsilon_0 C}{m} E_0 \quad \text{и} \quad j = \frac{\varepsilon_0 q}{2Ch} (E_h - E_0)^2. \quad (5.16)$$

Поскольку это одна и та же величина и учитывая взаимосвязь заряда с напряженностью около заряжающего электрода (5.5), получим ряд важных соотношений:

1. Разность напряженностей у поверхностей «подающего» и «принимающего» электродов при максимальной скорости подачи ворса зависит только от свойств ворса:

$$E_h - E_0 = C \sqrt{\frac{2h}{mk}}. \quad (5.17)$$

2. Напряженность около подающего бункера ниже, а у принимающего электрода выше напряженности однородного поля $E = U/h$:

$$E_0 = \frac{U}{h} - C \sqrt{\frac{h}{2km}}. \quad (5.18)$$

$$E_h = \frac{U}{h} + C \sqrt{\frac{h}{2km}}. \quad (5.19)$$

3. Соотношение для вычисления плотности тока, создаваемой движением заряженного ворса, при максимальной скорости поступления ворса несколько отличается от выражения (5.11), полученного ранее.

$$j = \frac{\varepsilon_0 C}{m} \left(\frac{U}{h} - C \sqrt{\frac{h}{2km}} \right). \quad (5.20)$$

Сравним величину плотности тока в зависимости от напряженности, рассчитанную на основе соотношений (5.11) и (5.20). На *рис. 5.2* представлены упомянутые зависимости для ПА ворса длиной 1 мм, линейной плотностью 0,33 текс и межэлектродном расстоянии $h = 0,1$ м при максимальном заряде ворса (*табл. 4.3*), причем величина заряда для соотношения (5.11) рассчитана как для напряженности $E = U/h$, так и для E_0 . Напряженность E_0 определяется соотношением (5.18).

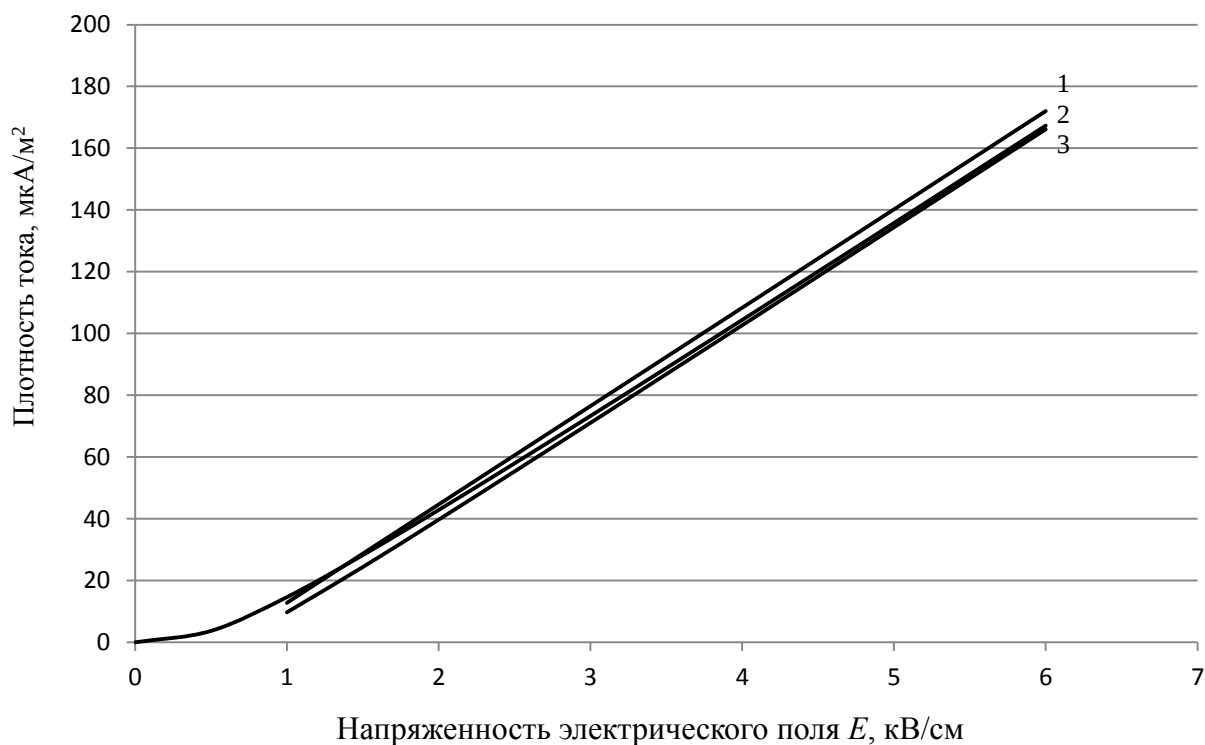


Рис. 5.2. Зависимость плотности тока от напряженности электрического поля при максимальной скорости подачи ворса:

1 – модель (5.11), $q = k_{\max} U/h$; 2 – модель (5.11), $q = k_{\max} E_0$;
3 – модель (5.20)

Как мы видим из графика на *рис. 5.2*, значения плотности тока в диапазоне напряженностей от 1 до 6 кВ/см, т. е. во всем рабочем диапазоне, для всех вариантов практически не отличаются.

Представляет интерес оценить влияние электрофизических свойств ворса, а именно коэффициента зарядки, на величину плотности тока. Для расчетов использовали те же характеристики ворса и режимы флокирования, как и в выше описанном примере. Коэффициент зарядки был выбран: 0,3, 0,7, $1,0k_{\max}$. Для расчетов, в данном случае, использовали модель (5.20) с учетом (5.5) и (5.21).

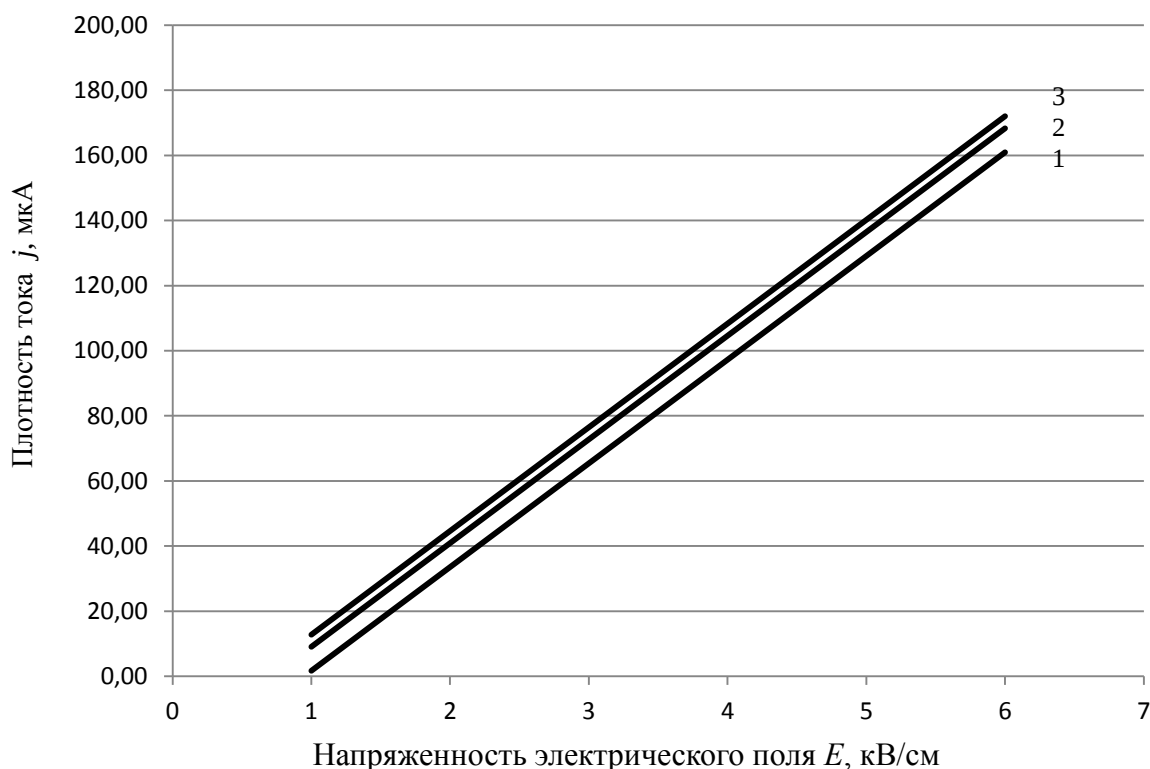


Рис. 5.3. Зависимость плотности тока от напряженности электрического поля при максимальной скорости подачи ворса:
 $1 - k = 0,3k_{max}$; $2 - k = 0,7k_{max}$; $3 - k = 1,0k_{max}$

Как мы видим из графиков (рис. 5.3), даже при значительном отличии величины зарядов ворса значение плотности тока изменяется мало. Это можно объяснить тем, что уменьшение коэффициента зарядки ведет к увеличению значения максимальной скорости поступления ворса. Однако, как будет показано в следующих разделах, это же ведет к ухудшению ориентации ворса на поверхности материала, а значит, увеличить скорость процесса нанесения ворса этим путем не представляется возможным.

Мы получили влияние режима флокирования (напряженности) на величину предельного значения плотности тока. Но необходимо проанализировать и влияние свойств ворса, а именно коэффициента зарядки ворса, т. е. фактически качества ворса, на плотность тока при одинаковой напряженности электрического поля ($E = 5$ кВ/см). Поскольку мы знаем, что для ворса заданных геометрических размеров и для заданной напряженности поля существует максимально возможное значение заряда (разд. 4), то можно построить зависимость плотности тока от доли максимального заряда (рис. 5.4).

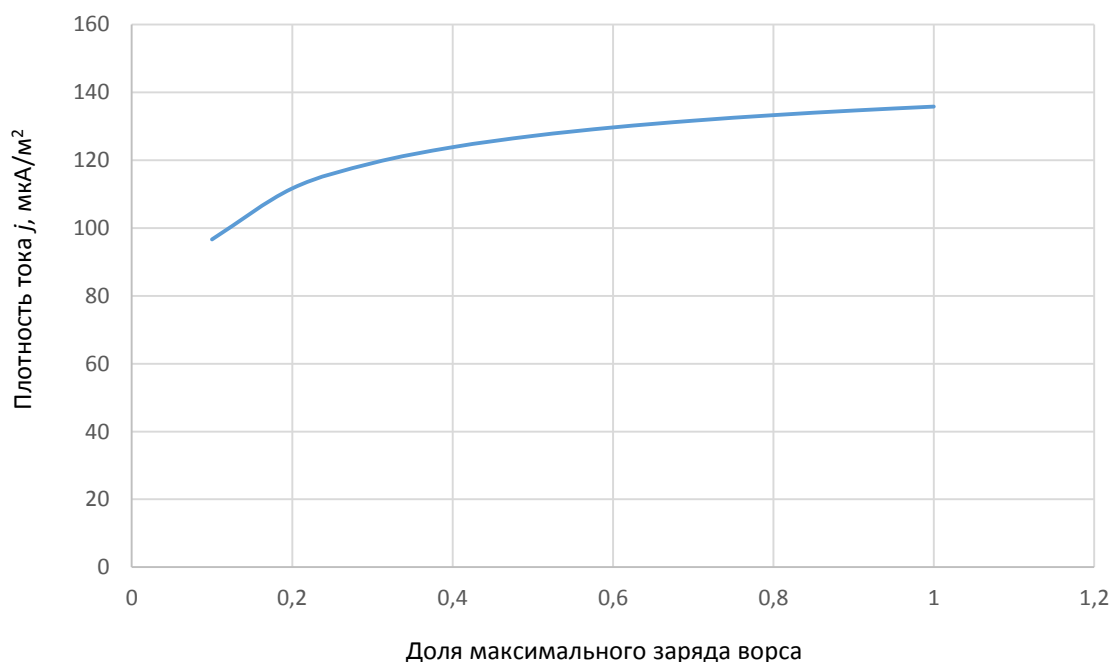


Рис. 5.4. Зависимость плотности тока от доли максимального заряда ворса

Как мы видим из *рис. 5.4*, в данном случае плотность тока растет медленнее, чем при возрастании напряженности. Это можно объяснить тем, что в данном случае снижения заряда (коэффициента зарядки) компенсируется ростом скорости поступления ворса.

$$P_{\max} = \frac{j m}{q} = \frac{\varepsilon_0 C}{q} E_0 = \frac{\varepsilon_0 C}{k}. \quad (5.21)$$

Т. е. при меньших значениях коэффициента зарядки меньше будет и заряд, но больше скорость поступления ворса. При этом **максимальная скорость подачи ворса зависит только от параметров ворса** и не зависит от условий флокирования. Данное соотношение носит оценочный характер. Для необработанного ворса (не заряженного) или при отсутствии электрического поля возникает ограничение в виде сетки подающего бункера и частоты его вибрации (скорости вращения щеток в бункере).

Используя соотношения (5.4), можно получить величину суммарного заряда ворса между электродами флокатора при максимальной скорости подачи ворса:

$$Q_{\Sigma} = 2\varepsilon_0 C \sqrt{\frac{h}{2km}}. \quad (5.22)$$

Соотношение (5.22) позволяет оценить максимальную величину заряда, который будет находиться между электродами при максимальной скорости поступления ворса и максимальном заряде ворса. В *табл. 5.1* представлены результаты расчета для различного ворса и флокатора площадью 1 м^2 при расстоянии между электродами $0,1 \text{ м}$. При этом величина суммарного заряда не зависит от напряженности электрического поля.

Т а б л и ц а 5.1. Суммарный заряд ворса для флокатора с площадью электродов 1 м^2

l , мм	T , текс	d , мм	$q_{\max}$, Кл	$k_{\max}$, Кл м/В	M , кг	$Q_{\max}$, мкКл
0,5	0,17	0,014	$8,23 \cdot 10^{-13}$	$2,06 \cdot 10^{-18}$	$0,85 \cdot 10^{-10}$	0,781
0,5	0,33	0,020	$9,25 \cdot 10^{-13}$	$2,31 \cdot 10^{-18}$	$1,65 \cdot 10^{-10}$	1,20
1,0	0,33	0,020	$2,98 \cdot 10^{-12}$	$7,45 \cdot 10^{-18}$	$3,3 \cdot 10^{-10}$	0,948
1,5	0,67	0,027	$6,51 \cdot 10^{-12}$	$16,3 \cdot 10^{-18}$	$10,1 \cdot 10^{-10}$	0,912
2,0	0,67	0,027	$1,07 \cdot 10^{-11}$	$26,8 \cdot 10^{-18}$	$13,4 \cdot 10^{-10}$	0,821
2,0	2,20	0,050	$1,27 \cdot 10^{-11}$	$31,8 \cdot 10^{-18}$	$44,0 \cdot 10^{-10}$	0,957
3,0	2,20	0,050	$2,57 \cdot 10^{-11}$	$64,3 \cdot 10^{-18}$	$66 \cdot 10^{-10}$	0,824

На *рис. 5.5* представлены графические зависимости для максимально возможной скорости поступления ворса от напряженности электрического поля для разных моделей и при различных значениях коэффициента зарядки ворса.

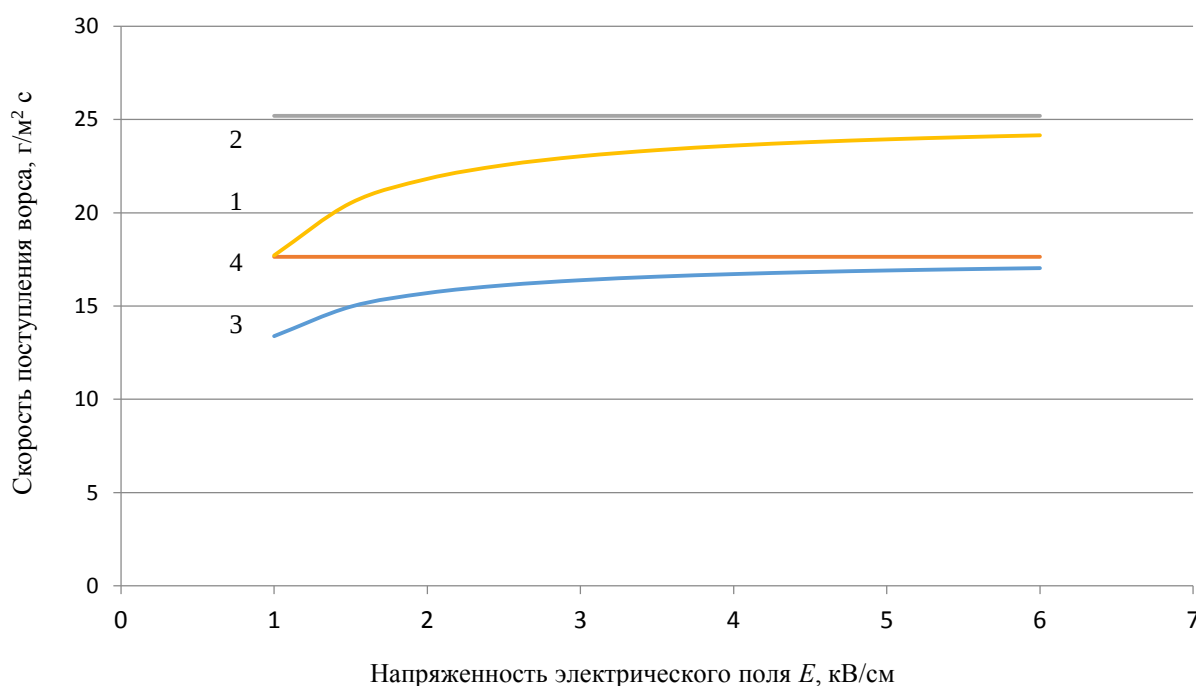


Рис. 5.5. Зависимость максимальной скорости поступления ворса от напряженности электрического поля:

- 1 – модель (5.13), $k = 0,7k_{\max}$; 2 – модель (5.22), $k = 0,7k_{\max}$;
 3 – модель (5.13), $k = 1,0k_{\max}$; 4 – модель (5.22), $k = 1,0k_{\max}$

Это очень существенно для разработанной модели и ниже будет представлено экспериментальное обоснование. Таким образом, скорость подачи ворса при флокировании можно увеличить только до определенного предела, определяемого лишь свойствами ворса.

Важно оценить, как на максимальную скорость поступления ворса будет влиять его качество. В качестве критерия качества ворса мы вновь возьмем коэффициент зарядки ворса. Этот коэффициент может меняться от 0 (необрабо-

танный ворс) до максимального значения (разд. 4). На *рис. 5.6* представлена данная зависимость. Следует, конечно, учитывать, что скорость поступления ворса в реальности не может расти до бесконечности при снижении заряда (коэффициента зарядки), поскольку существует ограничение в виде сетки, сквозь которую ворс поступает в зону флокирования.

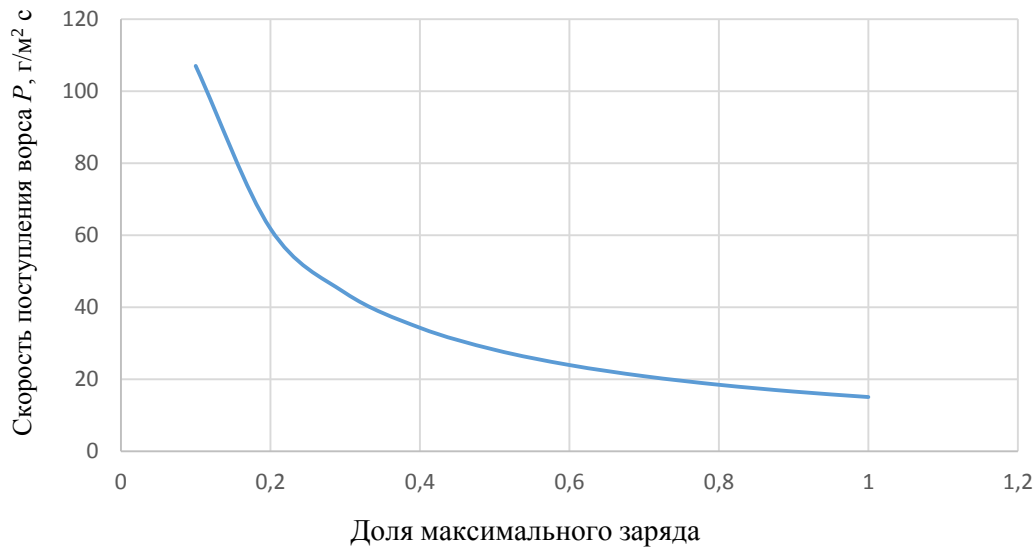


Рис. 5.6. Зависимость скорости подачи от коэффициента зарядки ворса

Воспользовавшись соотношением (5.20), можно установить взаимосвязь плотности тока со скоростью подачи ворса:

$$j = \frac{P_{\max} k}{m} \left(\frac{U}{h} - C \sqrt{\frac{h}{2km}} \right). \quad (5.23)$$

Можно предположить, что при снижении скорости подачи ворса относительно максимального значения плотность тока будет линейно уменьшаться.

Возникает еще один вопрос, касающийся проверки модели. Соотношения для напряженности около электродов (5.18) и (5.19) при отсутствии ворса в объеме флокатора должны переходить в напряженность однородного электрического поля. Запишем упомянутые значения напряженностей с использованием полученного выше соотношения (5.21):

$$E_0 = \frac{U}{h} - \frac{P_{\max}}{\varepsilon_0} \sqrt{\frac{kh}{2m}}. \quad E_h = \frac{U}{h} + \frac{P_{\max}}{\varepsilon_0} \sqrt{\frac{kh}{2m}}. \quad (5.24)$$

Т. е. если мы уменьшаем скорость подачи ворса, то отклонение напряженностей около электродов от напряженности однородного поля уменьшается и при $P = 0$ становится одинаковой: $E = U/h$.

5.3. Проверка адекватности модели процесса флокирования на основе результатов эксперимента

Для проверки достоверности результатов, полученных на основе теоретических исследований, необходимо определиться с параметрами процесса, которые, с одной стороны, могут быть рассчитаны на основе модели, а, с другой стороны, измерены с достаточной точностью. Кроме того, эти параметры должны иметь определяющее значение для технологического процесса. Наиболее удобными для этой цели представляются плотность тока, создаваемая заряженным движущимся ворсом, скорость поступления ворса в зависимости от напряженности электрического поля и величина среднего заряда ворса. Величина скорости поступления ворса и плотности тока, с одной стороны, важны для технологического процесса и связаны друг с другом, а с другой стороны, измеряются одновременно и независимо друг от друга.

Методика измерения упомянутых характеристик, к сожалению, неизбежно сопряжена со значительными погрешностями как при определении характеристик ворса, в особенности при измерении его заряда, так и при измерении плотности тока и скорости поступления ворса. Все это следует учитывать при определении адекватности созданной теории.

5.3.1. Методика проведения эксперимента

При построении математической модели процесса флокирования был особо выделен начальный этап формирования ворсового покрова как в значительной мере определяющий скорость нанесения ворса. На этой стадии можно считать, что движение ворса происходит только в одном направлении, т. е. весь заряженный ворс, вылетевший из бункера, внедряется в клеевой слой. Однако вначале необходимо поставить задачу о количественном соотношении заряда, приобретаемого ворсинками, и напряженностью электрического поля у поверхности заряжающего электрода, а именно о величине коэффициента пропорциональности k , связывающего эти величины. Это крайне важно, поскольку через «коэффициент зарядки» проявляется влияние электрофизических свойств ворса. Фактически этот коэффициент является основной характеристикой, отвечающей за электрофизические свойства ворса.

Таким образом, важной задачей, решаемой в этом разделе, является описание экспериментальной методики, позволяющей измерять одновременно все необходимые параметры: средний заряд ворса, плотность тока и скорость подачи ворса.

Первое, на что надо обратить внимание, это то, что при определении «коэффициента зарядки» измерение среднего заряда ворса необходимо проводить при минимальной скорости его подачи. Это позволяет принимать напряженность электрического поля около заряжающего электрода, равной напряженности однородного поля $E_0 = U_0/h$, т. е. не учитывать объемный заряд ворса в межэлектродном пространстве. Контролируя при этом скорость подачи ворса или плотность тока, можно на основе модели приближенно оценить возможную степень отклонения напряженности зарядки от напряженности однородного

поля. Малая величина скорости подачи обеспечивалась путем использования сетки подающего электрода с малым размером ячеек (менее 0,5 мм), а также минимальной частоте вибрации подающего бункера.

Вторая проблема, возникающая при измерении, это получение достоверных значений среднего заряда ворса. Как известно, средний заряд волокон в технологии флокирования обычно измеряют с помощью емкостного датчика [10], [15]. Широко используемый «емкостной» метод имеет существенные недостатки [19]. Поэтому был предложен альтернативный вариант измерения среднего заряда ворсинок, показанный схематически на *рис. 5.7*.

В разработанном устройстве подача ворса осуществляется из бункера 1 с сетчатым дном посредством вибрации от двигателя постоянного тока с эксцентриком. Двигатель постоянного тока 3 был выбран вследствие удобства регулирования частоты его вращения и, тем самым, скорости подачи ворса. Бункер 1 одновременно подключен к источнику высокого напряжения 2.

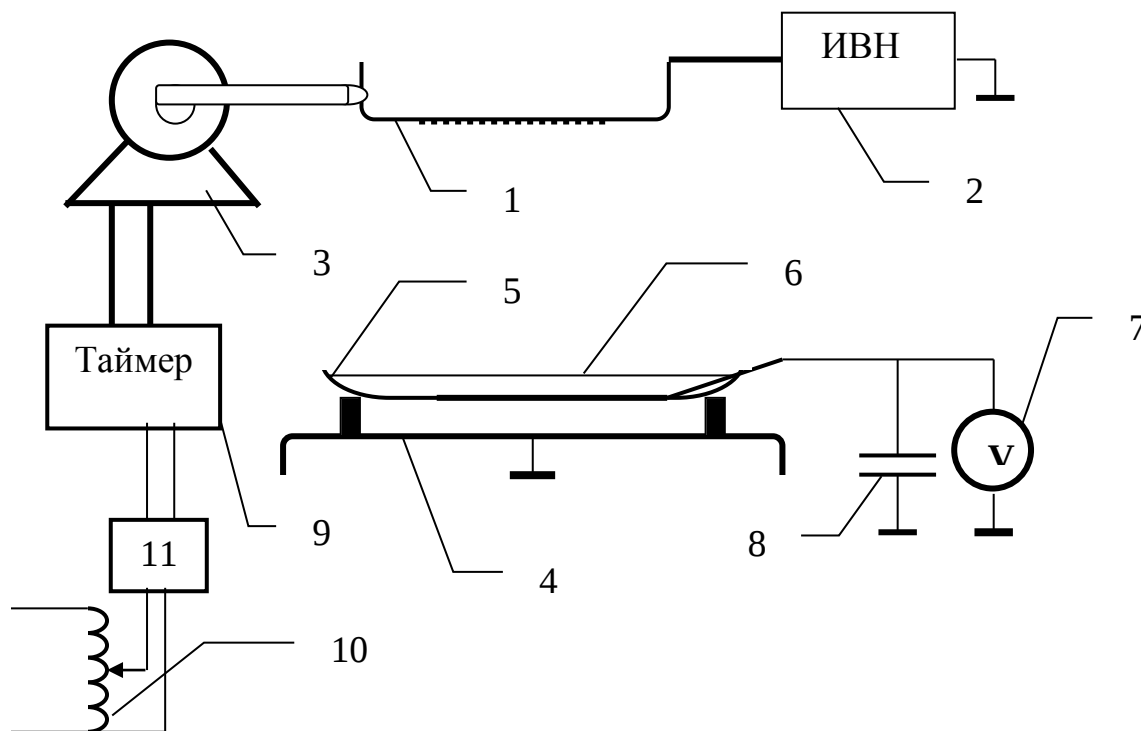


Рис. 5.7. Схема датчика для измерения параметров ворса и исследования режимов флокирования

Диапазон изменения напряжения от 0 до 50 кВ. На нижнем заземленном электроде 4 на диэлектрическом кольце из фторопласта установлена емкость 5, которую заполняют электролитом 6 (обычно был использован 20%-й раствор NaCl в воде). На дне емкости располагался электрод, обеспечивающий контакт электролита с электростатическим вольтметром 7. Параллельно была подключена батарея конденсаторов 8 с возможностью изменения емкости путем переключения. Вольтметр электростатического типа имеет для данных измерений большое значение благодаря своему исключительно высокому входному сопротивлению, которое достигает $10^{13} - 10^{14}$ Ом.

Двигатель постоянного тока 3 запускают таймером 9, что обеспечивает точное время подачи ворса. Напряжение подают от ЛАТРа 10, позволяющего регулировать его величину, через выпрямитель 11.

Эта установка была использована для исследования однонаправленного движения ворса. Метод, как и требовалось, обеспечивает измерение не только заряда ворса, но и целого ряда параметров процесса флокирования.

Процесс измерения среднего заряда заключается в следующем:

Ворс помещают в бункер 1 с сетчатым дном, которое одновременно является верхним заряжающим электродом. Нижний электрод представляет собой диэлектрическую ячейку 5 с электролитом 6, который фактически и является нижним электродом, причем диаметр ячейки существенно больше диаметра области подачи верхнего электрода. Это гарантирует, что весь ворс, вылетевший с верхнего электрода, попадет в ячейку с электролитом, и не будет возвращаться обратно к верхнему электроду. Минимальная скорость подачи обеспечивается малой частотой вибрации бункера, которая регулируется, и сеткой с ячейками малых размеров (сетка на установке сменная).

Таким образом, ворс заряжается на поверхности верхнего электрода 1, движется к поверхности нижнего электрода 6 и остается в воде, отдав электроду свой заряд. Так как емкость системы C , включая емкость конденсатора 8, емкость измерительного электрода 5 и подводных проводов, известна (предварительно измерена), то, измеряя напряжение U на емкости с помощью электростатического вольтметра 7, легко определить значение суммарного заряда ворса $Q_0 = C U$.

Электрод 5 с электролитом 6 предварительно взвешивали на аналитических весах, а затем его же – с ворсом, определяя массу попавших ворсинок M . Зная массу одной ворсинки $m = T \cdot l \cdot 10^{-3}$ (T – линейная плотность ворса, текс; l – длина ворса, мм; m – масса ворсинки, г), вычисляют средний заряд одной ворсинки q :

$$q = \frac{C U m}{M}. \quad (5.25)$$

Данный метод достаточно универсален и позволяет одновременно определить скорость подачи ворса:

$$P = \frac{M}{S \cdot t}, \quad (5.26)$$

где S – площадь сетки, подающего бункера, м^2 ; t – время подачи, с.

Кроме того, способ дает возможность определить плотность тока, созданного движущимся заряженным ворсом:

$$j = \frac{C \cdot U}{S \cdot t}. \quad (5.27)$$

Таким образом, разработанный метод позволяет провести широкий спектр измерений основных технологических параметров процесса флокирования. На основе измерений, проведенных с помощью данного комплекса приборов, осуществлялось сравнение созданных моделей с данными эксперимента.

5.3.2. Анализ результатов измерения основных характеристик процесса флокирования

Для объективного сравнения моделей флокирования были выбраны три вида ворса и с использованием разработанной методики исследована взаимосвязь заряда ворса с напряженностью электрического поля. На основе этого для каждого ворса определен «коэффициент зарядки», характеризующий его электрофизические свойства.

Результаты, полученные для полиамидного ворса длиной 1 мм и линейной плотностью $T = 0,33$ текс, представлены в *табл. 5.2*. Межэлектродное расстояние составляло 7,2 см. Данные таблицы (Q , M) представляют результат усреднения по 5 измерениям.

Т а б л и ц а 5.2. Оценка коэффициента зарядки ворса

U_0 , кВ	5	10	15	20	25	30
E , кВ/см	0,70	1,39	2,08	2,78	3,47	4,17
Q_0 , Кл	$6,4 \cdot 10^{-8}$	$13,2 \cdot 10^{-8}$	$22,4 \cdot 10^{-8}$	$35,5 \cdot 10^{-8}$	$40,5 \cdot 10^{-8}$	$46,7 \cdot 10^{-8}$
M , г	0,053	0,058	0,066	0,078	0,061	0,064
N , шт.	$1,60 \cdot 10^5$	$1,76 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^5$	$2,36 \cdot 10^5$	$1,85 \cdot 10^5$	$1,94 \cdot 10^5$
q , Кл	$3,98 \cdot 10^{-13}$	$7,51 \cdot 10^{-13}$	$11,2 \cdot 10^{-13}$	$15,0 \cdot 10^{-13}$	$21,9 \cdot 10^{-13}$	$24,1 \cdot 10^{-13}$
k , Кл·м/В	$5,69 \cdot 10^{-18}$	$5,40 \cdot 10^{-18}$	$5,38 \cdot 10^{-18}$	$5,40 \cdot 10^{-18}$	$6,31 \cdot 10^{-18}$	$5,77 \cdot 10^{-18}$

На основе экспериментальных данных, представленных в *табл. 5.2*, на *рис. 5.8* представлена зависимость среднего заряда ворсинок от напряженности электрического поля.

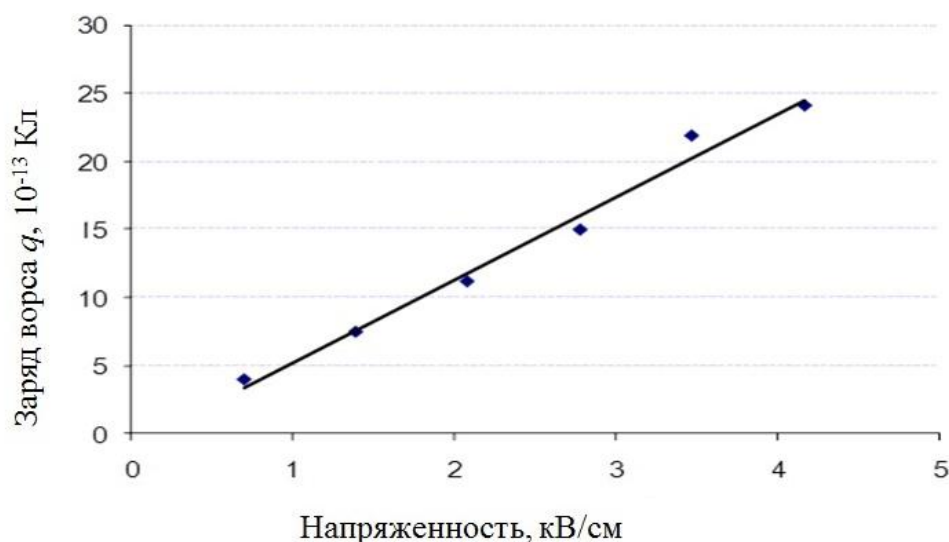


Рис. 5.8. Влияние напряженности поля на величину заряда ворса

Полученная зависимость, с достаточной степенью точности, является линейной, что хорошо согласуется с выводами модели, изложенной в разд. 4, и лишний раз подтверждает обоснованную в этом разделе линейную связь сред-

него заряда ворса с напряженностью, использованную при создании теории осаждения заряженного ворса в технологии электрофлокирования.

Таким образом, на основе полученных результатов можно определить значение «коэффициента зарядки» этого ворса: $k_1 = (5,8 \pm 0,4)10^{-18}$ Кл·м/В.

Аналогичным образом этот коэффициент был определен для ворсов с другими геометрическими параметрами: $l = 0,5$ мм; $T = 3,3$ dtex; $k_2 = (1,25 \pm 0,12)10^{-18}$ Кл·м/В; $l = 2,0$ мм, $T = 22$ dtex, $k_3 = (9,1 \pm 0,8)10^{-18}$ Кл·м/В.

Именно эти 3 ворса были использованы для сравнения разработанной математической модели с результатами эксперимента, проведенного описанным методом, относительно прогноза значений плотности тока и скорости подачи ворса.

Одним из следствий рассматриваемого в работе базисного положения о принципиальном и очень существенном влиянии объемного заряда ворса в зоне флокирования является то, что заряд, приобретаемый ворсинками при малой и большой скорости подачи, будет отличаться. Причем минимальная скорость подачи соответствует большему заряду, а ее возрастание ведет к снижению заряда. Это следует из того, что увеличение объемного заряда снижает напряженность электрического поля около заряжающего электрода.

Для проверки этого вывода был использован упомянутый выше короткий ворс ($l = 0,5$ мм, $k = 1,25 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В), поскольку он дает более однородный объемный заряд и должен лучше соответствовать математической модели. «Малая» скорость подачи соответствовала условиям определения коэффициента зарядки и была равна 12 г/(м²·с) при отсутствии напряжения на электродах, «большая» скорость подачи была равна $96,5$ г/(м²·с) без напряжения и около 40 г/(м²·с) при напряженности, изменяющейся от $1,43$ до 5 кВ/см. Все остальные условия сохранялись неизменными. Результаты измерений представлены в виде графиков (рис. 5.9).

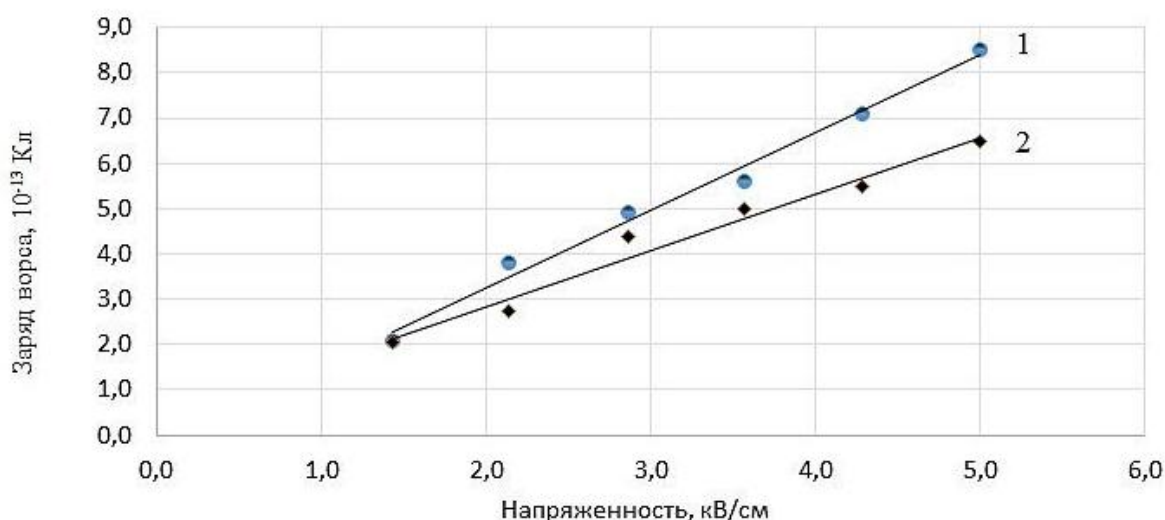


Рис. 5.9. Зависимость заряда ворса от напряженности
для разной скорости подачи ворса:
1 — скорость подачи ворса 12 г/(м²·с);
2 — скорость подачи ворса $96,5$ г/(м²·с)

Определение заряда при большой подаче происходило на основе измерения плотности тока и скорости подачи ворса, т. е. $q = j \cdot m / P$.

Представленные зависимости подтверждают предполагаемую закономерность, следующую из теории, т. е. прямая 1 (малая подача) имеет больший угол наклона по сравнению с прямой 2 (большая подача). Это является достаточно важным подтверждением развиваемых в данной работе положений.

Как уже было показано, предложенный способ позволяет измерять, кроме заряда, плотность тока и скорость подачи ворса вплоть до максимальных значений. Варьирование скорости подачи достигается заменой сетки подающего бункера и изменением частоты вибрации. Важно отметить и то, что для всех серий измерений фиксировалась скорость подачи ворса при нулевом значении напряжения между подающим бункером и нижним электродом P_0 . Для всех случаев эта величина в два и более раз превосходила скорость подачи ворса под напряжением. По-видимому, это можно считать косвенным подтверждением того, что измерения действительно были проведены при **максимальной скорости подачи** ворса, а именно этот вариант и был заложен при создании теории.

Адекватность развитой в данной работе теории должна оцениваться как по абсолютным значениям технологических параметров, рассчитанных и измеренных в эксперименте, так и по характеру зависимости, предполагаемой в теории и полученной в исследовании.

Результаты экспериментальных исследований приведены в табл. 5.3–5.5. Представленные три комплекта данных соответствуют трем разным ворсам.

1. Ворс РА, $l = 1$ мм; $T = 3,3$ dtex; $h = 7$ см; $k = 5,8 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В; $P_0 = 46,8$ г/м²·с.

Т а б л и ц а 5.3. Результаты измерений характеристик процесса флокирования

U_0 , кВ	10	15	20	25	30	35
E , кВ/см	1,43	2,14	2,86	3,57	4,28	5
q , 10^{-13} Кл	9,4	12,6	16,4	19,9	22,6	30,3
j , мкА/м ²	39	67	103	116	135	178
P , г/м ² ·с	13,7	17,5	20,7	19,2	19,7	19,4

2. Ворс РА, $l = 0,5$ мм; $T = 3,3$ dtex; $h = 7$ см; $k = 1,65 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В; $P_0 = 96,5$ г/м²·с.

Т а б л и ц а 5.4. Результаты измерений характеристик процесса флокирования

U_0 , кВ	10	15	20	25	30	35
E , кВ/см	1,43	2,14	2,86	3,57	4,28	5
q , 10^{-13} Кл	2,06	2,73	4,37	5	5,49	6,47
j , мкА/м ²	52	75	102	120	138	180
P , г/м ² ·с	41,7	45,3	38,5	39,6	41,5	45,9

3. Ворс РА, $l = 2$ мм; $T = 22$ dtex; $h = 7$ см; $P_0 = 156$ г/м²·с; $k = 9,1 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В.

Т а б л и ц а 5.5. Результаты измерений характеристик процесса флокирования

U_0 , кВ	10	15	20	25	30	35
E , кВ/см	1,43	2,14	2,86	3,57	4,28	5
q , 10^{-13} Кл	10,5	13,1	22,1	31,2	33,4	37,6
j , мкА/м ²	18,4	24,6	40,3	54,2	63,7	73,7
P , г/м ² ·с	77,2	82,3	80,2	76,2	83,8	86,2

Анализ результатов эксперимента

Максимальная скорость подачи ворса

Данные, представленные в таблицах, получены при условиях, приближенных к максимальной скорости поступления ворса в зону флокирования. Об этом свидетельствует скорость подачи ворса без напряжения на электродах. Во всех случаях она значительно превосходит скорость подачи в условиях процесса флокирования. Поэтому необходимо сравнить значения скорости подачи, полученные в эксперименте, и значения, вычисленные на основе соотношения (5.23). При этом расчетные значения максимальной скорости подачи вычислены с использованием коэффициента зарядки, полученного в эксперименте. Результаты представлены на графике (рис. 5.10).

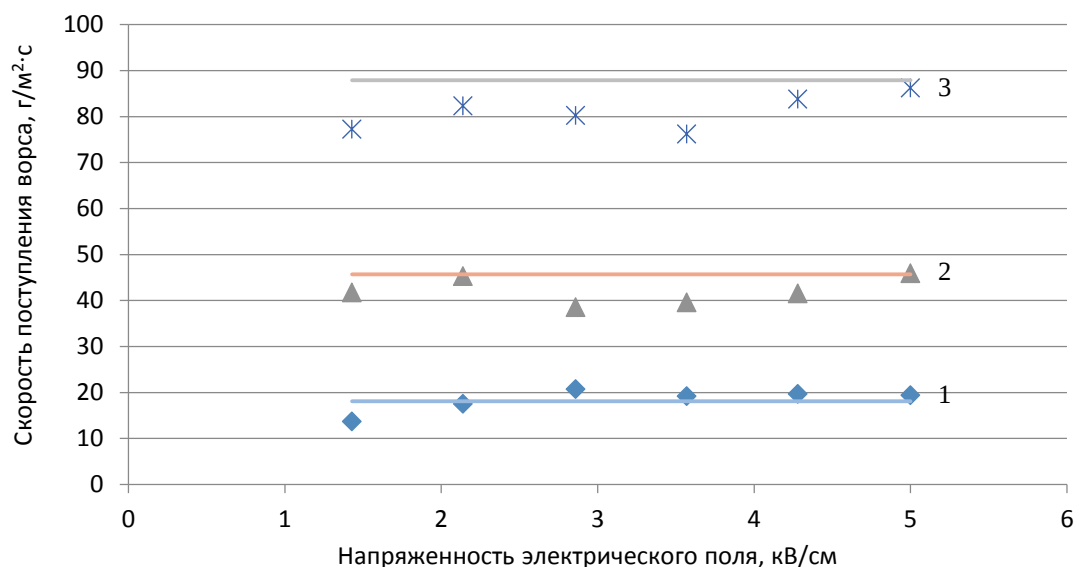


Рис. 5.10. Скорость поступления ворса в зону флокирования:

1 – $l = 1,0$ мм; $T = 3,3$ dtex; 2 – $l = 0,5$ мм; $T = 3,3$ dtex;

3 – $l = 2,0$ мм; $T = 22$ dtex

Как мы видим (рис. 5.10), оценка максимальной скорости подачи из соотношения (5.21) с достаточной степенью точности позволяет прогнозировать реальные значения. Следует отметить, что значения коэффициента зарядки, получаемые на основе данных о максимальной скорости подачи ворса (5.21), доста-

точно хорошо совпадают с результатами, полученными по описанной выше методике: $k_1 = 5,32 \cdot 10^{-18}$ ($5,8 \cdot 10^{-18}$) Кл·м/В; $k_2 = 1,25 \cdot 10^{-18}$ ($1,25 \cdot 10^{-18}$) Кл·м/В; $k_3 = 9,87 \cdot 10^{-18}$ ($9,1 \cdot 10^{-18}$) Кл·м/В.

Результаты оценки заряда ворса и их анализ

Расчетные значения заряда получали с использованием полученных в эксперименте коэффициентов зарядки и напряженности электрического поля у поверхности заряжающего электрода (5.18).

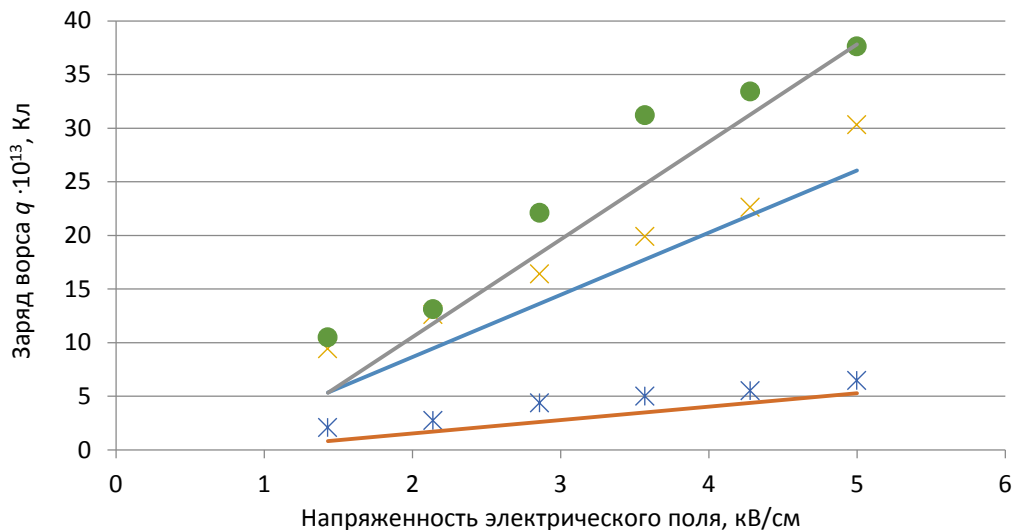


Рис. 5.11. Влияние напряженности на величину заряда ворса

Как мы видим из графика (рис. 5.11), расчет заряда ворса с учетом снижения напряженности электрического поля у поверхности заряжающего электрода достаточно хорошо совпадает с результатами, полученными в эксперименте.

Стоит отметить, что значение коэффициента зарядки в пределах погрешности не изменяется при увеличении напряженности.

Интересно оценить, какую долю от максимального заряда (для ворса заданной длины и при указанных значениях напряженности поля) составляют заряды, полученные в эксперименте. Эта величина с достаточной степенью точности постоянна при всех значениях напряженности и равна: для ворса 1,0 мм – 0,79; для ворса 0,5 мм – 0,59; для ворса 2 мм – 0,24.

Это может свидетельствовать о влиянии обработки ворса, а именно его электрического сопротивления, на величину коэффициента зарядки и, соответственно, и на величину заряда ворса. Т. е. электрическое сопротивление ворса определяет величину его заряда или долю от максимальной величины заряда.

Хочется отметить и то, что все измеренные значения зарядов не превышают теоретических максимальных значений (табл. 5.2–5.4).

Оценка плотности тока для ворса разных геометрических размеров

Сравнение расчетных значений плотности тока с результатами, полученными экспериментально, является важным моментом. Здесь важны как характер зависимости, так и абсолютные значения величин. На рис. 5.12 показана за-

висимость плотности тока, создаваемого заряженнымдвигающимся между электродами ворсом, от напряженности для трех образцов ворса разных размеров.

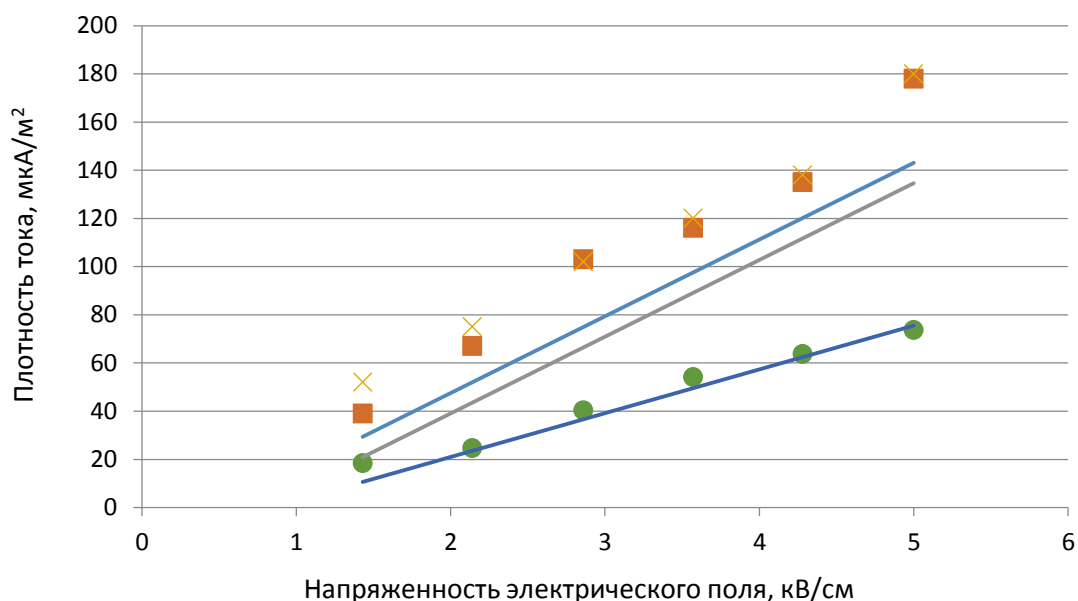


Рис. 5.12. Влияние напряженности электрического поля на плотность тока, формируемого заряженным ворсом

В заключении следует сказать:

- при сравнении расчетных и экспериментальных данных необходимо учитывать значительные погрешности при измерении плотности тока, скорости подачи ворса и, особенно, его заряда при разной напряженности электрического поля;
- все расчеты основаны только на одной характеристике ворса (остальные известны или легко измеримы) – величине коэффициента зарядки;
- косвенным подтверждением модели можно считать тот факт, что величина плотности тока (5.20) для ворса разной длины, но одинаковой линейной плотности и диаметра должна быть примерно одинаковой. Это следует из того простого факта, что параметр C и m (масса ворсинки) одинаковым образом (линейно) зависят от длины ворса (табл. 5.3 и 5.4).

5.4. Анализ процесса флокирования на основе «кинематического» подхода к описанию движения потока ворса

Рассмотрим иной подход к математическому описанию процесса флокирования. Попробуем построить модель процесса на основе анализа движения ворса с точки зрения кинематики. Проанализируем временные характеристики процесса флокирования с учетом влияния аэродинамического сопротивления [19].

Для изучения процесса движения ворса во флокаторе в зависимости от времени воспользуемся дифференциальным уравнением (5.8), записав его в виде, удобном для дальнейших преобразований:

$$m\nu \frac{d}{dx} \left(\nu \frac{d\nu}{dx} \right) + C\nu \frac{d\nu}{dx} = \frac{qj}{\varepsilon_0}. \quad (5.28)$$

Преобразуем функциональные зависимости, заменив аргумент x на t , в соответствии с формулами математического анализа:

$$\frac{d\nu}{dx} = \frac{d\nu}{dt} \frac{dt}{dx} = \frac{d\nu}{dt} \frac{1}{dx/dt} = \frac{d\nu}{dt} \frac{1}{\nu}.$$

При этом уравнение (5.28) преобразуется к виду

$$m\nu \frac{da}{dx} + Ca = \frac{qj}{\varepsilon_0}, \quad (5.29)$$

где a – ускорение ворсинки.

Используя аналогичное преобразование $\frac{da}{dx} = \frac{da}{dt} \frac{dt}{dx} = \frac{da}{dt} \frac{1}{\nu}$, получим

$$m \frac{da}{dt} + Ca = \frac{qj}{\varepsilon_0}. \quad (5.30)$$

Теперь мы имеем дифференциальное уравнение первой степени с разделяющимися переменными. Проведем разделение переменных и проинтегрируем его

$$\int \frac{da}{\frac{qj}{\varepsilon_0 C} - a} + B = \frac{C}{m} \int dt,$$

где B – постоянная интегрирования.

Записав постоянную интегрирования в виде $B = \ln B_1$ и интегрируя уравнение, получим

$$\ln \frac{B_1}{\frac{qj}{\varepsilon_0 C} - a} = \frac{C}{m} t.$$

Для определения постоянной интегрирования используем начальное условие в виде

$$a(t=0) = \frac{qE_0}{m}, \quad (5.31)$$

где E_0 – напряженность электрического поля у поверхности подающего ворс электрода.

Тогда постоянную интегрирования получим в виде $B_1 = \frac{qj}{\varepsilon_0 C} - \frac{qE_0}{m}$.

Теперь можно записать зависимость ускорения ворсинки от времени в процессе ее движения между электродами:

$$a = \frac{qj}{\varepsilon_0 C} - \left(\frac{qj}{\varepsilon_0 C} - \frac{qE_0}{m} \right) e^{-\frac{C}{m} t}. \quad (5.32)$$

Поскольку $a = dv/dt$, то далее мы можем получить скорость ворсинок как функцию времени:

$$v(t) = \frac{qj}{\varepsilon_0 C} t + \frac{m}{C} \left(\frac{qj}{\varepsilon_0 C} - \frac{qE_0}{m} \right) \ell^{-C/m \cdot t} + C_1, \quad (5.33)$$

где C_1 – постоянная интегрирования.

Эту постоянную интегрирования легко определить исходя из начального условия для скорости ворсинки $v(t=0) = 0$:

$$C_1 = -\frac{m}{C} \left(\frac{qj}{\varepsilon_0 C} - \frac{qE_0}{m} \right).$$

Тогда выражение для скорости ворсинки от времени будет выглядеть таким образом:

$$v(t) = \frac{qj}{\varepsilon_0 C} t - \frac{m}{C} \left(\frac{qj}{\varepsilon_0 C} - \frac{qE_0}{m} \right) \left(1 - \ell^{-C/m \cdot t} \right). \quad (5.34)$$

Следующим шагом необходимо определить зависимость координаты, движущейся ворсинки от времени. Поскольку $v(t) = dx/dt$, то, проинтегрировав выражение (5.34), можно получить искомую зависимость. Аналогично предыдущему случаю постоянную интегрирования легко определить, используя начальное условие $x(t=0) = 0$. Тогда эта зависимость будет выглядеть следующим образом:

$$x(t) = \frac{qj}{\varepsilon_0 C} \frac{t^2}{2} - \frac{m}{C} \left(\frac{qj}{\varepsilon_0 C} - \frac{qE_0}{m} \right) t + \left(\frac{m}{C} \right)^2 \left(\frac{qj}{\varepsilon_0 C} - \frac{qE_0}{m} \right) \left(1 - \ell^{-C/m \cdot t} \right). \quad (5.35)$$

Теперь нами получен набор кинематических уравнений, описывающих движение потока заряженного ворса с учетом создаваемого им объемного заряда, аэродинамического сопротивления и условий зарядки ворса.

Проведем анализ первой из этих зависимостей, а именно ускорения (5.32). Как видно из этого выражения, величина ускорения может как снижаться со временем, так и возрасть, оставаясь, конечно, положительной.

Рассмотрим, как меняется характер движения потока заряженного ворса по мере нарастания скорости его подачи. При малой скорости подачи мала и плотность тока, а величина напряженности E_0 близка к напряженности поля в отсутствии заряженного ворса $E = U_0/h$. В этом случае ускорение ворсинки (5.32) максимально при начале движения ($a = \frac{q}{m} E_0 = \frac{k}{m} E_0^2$) и снижается, стремясь в пределе к величине $a = \frac{jq}{\varepsilon_0 C} = \frac{jk}{\varepsilon_0 C} E_0$. Это означает, что действие аэро-

динамического сопротивления, снижающего ускорение, сильнее действия объемного заряда, повышающего ускорение.

Увеличение скорости подачи ворса, а следовательно, и увеличение объемного заряда в межэлектродном пространстве приводит к снижению начальной напряженности E_0 и возрастанию плотности тока j . В некоторый момент $\frac{j}{E_0} = \frac{\varepsilon_0 C}{m}$. Это важный случай, поскольку он соответствует максимальной скорости поступления ворса в зону флорирования $P_{\max} = \frac{\varepsilon_0 C}{k}$. При этом ускорение ворсинки в процессе движения постоянно:

$$a = \text{const} = \frac{qj}{\varepsilon_0 C} = \frac{kmj^2}{(\varepsilon_0 C)^2}. \quad (5.36)$$

Зависимости скорости и координаты ворсинок от времени при этом кардинально упрощаются и выглядят следующим образом:

$$v(t) = \frac{qj}{\varepsilon_0 C} t, \quad x(t) = \frac{qj}{\varepsilon_0 C} \frac{t^2}{2}.$$

Нам важно получить распределение скорости ворсинок при их движении между электродами. Для решения этой задачи достаточно выразить время через координату x и подставить в выражение для скорости:

$$t = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 C}{qj}} x, \quad v(x) = \sqrt{\frac{2qj}{\varepsilon_0 C}} x. \quad (5.37)$$

Важность полученной зависимости скорости ворсинок от координаты состоит в том, что она идентична зависимости (5.9), полученной раньше, совершенно иным путем. Это подтверждает то, что оба развитых здесь подхода к анализу процесса осаждения заряженного ворса являются, фактически, двумя сторонами одной теории.

Теперь, в рамках развитой здесь теории, необходимо определить возможные границы увеличения скорости подачи ворса при условии выполнения основных положений (5.1)–(5.6). Исходя из соотношения, связывающего плотность тока и скорость подачи ворса $P = jm/q$, возрастание скорости подачи должно неизбежно вести к увеличению отношения j/q . Величина заряда связана с напряженностью около заряжающего электрода и определяется выражением $q = kE_0$, а максимальная плотность тока, как показано выше, $j = \varepsilon_0 CE_0/m$. Тогда указанное отношение может быть только постоянной величиной. Следовательно, максимальная скорость подачи ворса действительно зависит только от параметров ворса.

Продолжим далее анализ полученных кинематических уравнений. Учитывая, что поверхностная плотность заряда между электродами $Q_\Sigma = j T_0$ и принятое соотношение (5.4), можно получить взаимосвязь времени движения ворсинки между электродами T_0 с другими параметрами процесса [19].

$$T_0 = \frac{2\varepsilon_0}{j} \left(\frac{U}{h} - E_0 \right).$$

После преобразования соотношения для времени T_0 легко получить

$$T_0 = \frac{2m}{\left(E \sqrt{\frac{2km}{h}} - C \right)}. \quad (5.38)$$

Расчеты дают следующие результаты: для напряженности $E = 5$ кВ/см, ворса длиной $l = 1$ мм с линейной плотностью $T = 0,33$ текс и максимальных значений коэффициента зарядки $T_0 = 6,28 \cdot 10^{-3}$ с; $T_0(l = 0,5 \text{ мм}, T = 0,33 \text{ текс}) = 10,2 \cdot 10^{-3}$ с; $T_0(l = 2 \text{ мм}, T = 2,2 \text{ текс}) = 19,8 \cdot 10^{-3}$ с. Этот, вполне правдоподобный результат получен на основе теоретической модели и дополнительно свидетельствует об адекватности модели.

Если подставить в уравнение (5.34) время движения ворсинки между электродами T_0 и учесть, что при этом $x(T_0) = h$, получим

$$h = \frac{2\varepsilon_0 q}{cj} \left(\frac{U}{h} - E_0 \right)^2 - \frac{m}{c} \left(\frac{qj}{\varepsilon_0 c} - \frac{qE_0}{m} \right) \frac{2\varepsilon_0}{j} \left(\frac{U}{h} - E_0 \right) + \left(\frac{m}{c} \right)^2 \left(\frac{qj}{\varepsilon_0 c} - \frac{qE_0}{m} \right) \left(1 - \ell^{-\frac{c}{m} \frac{2\varepsilon_0}{j} (U/h - E_0)} \right). \quad (5.39)$$

Теперь воспользуемся условием зарядки ворса $q = kE_0$ и введем переменную $\alpha = E_0 / (U/h)$, т. е. «относительную напряженность» электрического поля около заряжающего электрода. Она удобна тем, что ее область изменения четко определена $\alpha \in [0, 1]$.

Полученное соотношение, с одной стороны, включает все исходные условия и должно, по-видимому, адекватно отражать реальный процесс флокирования. С другой стороны, полученное уравнение (5.39) является трансцендентным и его можно анализировать только численно. Упростим его для дальнейшего анализа, применив для этой цели разложение экспоненты в ряд Тейлора. При использовании первых трех членов разложения уравнение (5.39) преобразуется к виду, из которого легко получить взаимосвязь плотности тока с напряженностью электрического поля.

$$j = \varepsilon_0 \sqrt{\frac{2k}{mh}} \alpha(1 - \alpha) E^2. \quad (5.40)$$

Используя связь плотности тока со скоростью подачи ворса $P = jm/q$, легко получить аналогичное соотношение для скорости подачи ворса:

$$P = \varepsilon_0 \sqrt{\frac{2m}{kh}} (1 - \alpha) E. \quad (5.41)$$

Полученные выражения переходят в ранее выведенные соотношения для максимальной плотности тока и скорости подачи ворса при учете взаимосвязи для напряженности электрического поля у поверхности заряжающего электрода.

Мы получили удобные для расчетов выражения, но следует иметь в виду, что разложение экспоненты осуществлено в окрестности 0, поэтому следует рассмотреть вопрос об области использования полученного выражения. Разложение экспоненты в ряд до квадратичного слагаемого дает хорошую точность до значения показателя менее 0,5. Учитывая это и используя взаимосвязь плотности тока со скоростью подачи, можно записать

$$\frac{1}{1 + kP/4\varepsilon_0 c} \leq \alpha \leq 1. \quad (5.42)$$

Если воспользоваться максимальным значением скорости подачи ворса P , то диапазон изменения относительной напряженности определяется численно: $0,8 \leq \alpha \leq 1$.

Взаимосвязь относительной напряженности около заряжающего электрода с условиями флокирования (напряженностью) и свойствами ворса при максимальной скорости подачи имеет следующий вид:

$$\alpha = 1 - \frac{C}{E} \sqrt{\frac{h}{2km}}. \quad (5.43)$$

Для ПА ворса длиной 1 мм, линейной плотности 0,33 текс, имеющем коэффициент зарядки $k = 5,8 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В при межэлектродном расстоянии $h = 0,12$ м эта величина для разной напряженности будет равна

E , кВ/см	4	5	6
α	0,83	0,87	0,89

Теперь рассмотрим соотношение (5.39) для случая максимальной скорости подачи ворса (5.21), соответствующей плотности тока (5.20). В этом случае выражение (5.39) также можно радикально упростить:

$$h = \frac{2\varepsilon_0 q}{Cj} \left(E - \frac{mj}{\varepsilon_0 C} \right)^2.$$

Продолжая преобразования с учетом того, что $q = kE_0 = \frac{kmj}{\varepsilon_0 C}$, можно записать

$$j = \frac{\varepsilon_0 C}{m} \left(E - C \sqrt{\frac{h}{2km}} \right). \quad (5.44)$$

Полученное соотношение еще раз демонстрирует, что оба подхода (энергетический и кинематический) являются двумя сторонами одной теории. Легко видеть, что полученное выражение (5.44) полностью совпадает со значением максимальной плотности тока (5.20) при учете зависимости (5.43) для относительной напряженности.

Таким образом, развитые здесь представления о процессе осаждения заряженного ворса в технологии электрофлокирования существенно отличаются от моделей, созданных ранее [9], [10], [12], и значительно более полно и точно описывают взаимосвязь основных технологических параметров и характеристик ворса. Это позволяет обоснованно выбирать режимы флокирования и прогнозировать получаемый результат.

6. ОРИЕНТАЦИЯ ВОРСА НА ПОВЕРХНОСТИ ФЛОКИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА

В технологии электрофлокирования важное место занимает понятие предельной или максимальной плотности ворсового покрытия [9]–[11], [19] $n_{\max}$. Эта величина не зависит от времени флокирования, так как является асимптотой, к которой стремится плотность ворсового покрытия. Она определяется параметрами ворса (геометрическими и электрофизическими) и технологического процесса (напряжение, межэлектродное расстояние).

В разд. 3 показано, что, во-первых, данная характеристика является одной из важнейших, определяющих производительность процесса флокирования и, во-вторых, величина предельной поверхностной плотности ворса однозначно связана с его ориентацией на материале.

Экспериментально предельную плотность ворса можно получить путем многократного флокирования образца, стряхивая не внедрившийся ворс после каждого флокирования и измеряя при этом массу ворса, закрепившегося в клеевом слое. Если после очередного флокирования прирост массы ворса $\Delta m_n \ll \Delta m_1$, т. е. много меньше прироста массы ворса при первом нанесении за одинаковое время, то максимальную плотность можно определить как $n_{\max} = \Sigma \Delta m_i / S$, где $\Sigma \Delta m_i$ – суммарная масса ворса на образце, S – площадь, занятая ворсом.

Иной способ оценки предельной плотности основан на использовании зависимости плотности ворсового покрытия от продолжительности нанесения. Далее можно воспользоваться методом наименьших квадратов. Поскольку известен вид зависимости (3.2), то вычисляют плотность ворсового покрытия для той же продолжительности, как и в эксперименте, и сумму квадратов разности расчетных и экспериментальных значений. Используя опцию «Поиск решения» программы *Excel* для минимума суммы, находят значение предельной плотности и постоянной времени [19], [25], [28].

Поскольку было сказано, что предельная плотность ворсового покрытия $n_{\max}$ однозначно связана с его ориентацией на поверхности материала, то возникает вопрос, как физически определить понятие ориентации ворса в технологии флокирования. Это понятие анализировалось в целом ряде работ [9], [10], [17], [20]–[23], но здесь мы попытаемся подойти к этому вопросу с другой стороны. Для этого необходимо рассмотреть распределение ворсинок по углам наклона к вертикали [47], [49]–[51]. На *рис. 6.1* показан срез образца флокированного материала.



Рис. 6.1. Увеличенное изображение среза флокированного образца

6.1. Анализ распределения ворсинок по углам наклона к вертикали

На первый взгляд ворс на поверхности материала расположен весьма хаотично (рис. 6.1). Однако уже здесь видно, что основная часть ворсинок ориентирована преимущественно близко к вертикали. Ворсинки, значительно отклоняющиеся от вертикального положения, встречаются редко, а ворсинок, ориентированных близко к горизонтальному положению, практически нет. На этом наблюдении строится модель распределения ворсинок по углам наклона.

Будем считать, что распределение ворсинок по их углам наклона к вертикали подчиняется нормальному закону распределения. Тогда ориентацию ворса на поверхности материала можно характеризовать параметром распределения σ (среднеквадратичным отклонением). Если обозначить угол наклона через φ , можно записать плотность распределения в виде

$$P(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \ell^{-\frac{\varphi^2}{2\sigma^2}}. \quad (6.1)$$

Предположим, что предельная поверхностная плотность ворсового покрытия достигается при полном перекрытии ворсинками всей площади основы.

Для получения взаимосвязи параметра σ и максимальной плотности ворсового покрытия $n_{\max}$ необходимо вычислить, при каком значении σ для известной величины $n_{\max}$ и принятым законом распределения происходит полное перекрывание ворсинками всей площади материала. Следует сразу отметить, что мы не будем учитывать случаи возможного пересечения проекций ворси-

нок. Также останется не учтенной некоторая доля площади, не перекрытая проекциями волокон. Это может быть, если промежутки между ворсинками меньше сечения ворса. Фактически перекрытие всей площади для нас будет означать, что площадь оставшихся промежутков приблизительно равна площади пересечения проекций волокон.

Площадь, перекрываемая одной ворсинкой, расположенной под произвольным углом к вертикали φ , равна

$$s = ld \sin \varphi + \frac{\pi d^2}{4} \cos \varphi, \quad (6.2)$$

где l – длина ворсинки; d – диаметр ворсинки.

Здесь первое слагаемое – это проекция продольного сечения ворсинки, второе слагаемое – проекция торца волокна. При этом, вообще говоря, даже при малых углах φ половина проекции торца перекрыта проекцией продольного сечения ворсинки. Есть ли необходимость учитывать второе слагаемое, будет видно из дальнейших расчетов.

Количество ворсинок на единице площади, имеющих угол наклона от φ до $\varphi + d\varphi$, при плотности n (1/мм²) можно записать следующим образом:

$$dn = n \cdot P(\varphi) d\varphi. \quad (6.3)$$

Тогда доля площади, перекрываемая этими ворсинками, будет равна

$$\frac{ds}{s_0} = nP(\varphi) \cdot (ld \sin \varphi + \frac{\pi d^2}{8} \cos \varphi) d\varphi. \quad (6.4)$$

Угол наклона ворсинок теоретически может изменяться от $-\pi/2$ до $\pi/2$. Реально практически не встречается ворсинок с углами наклона $\varphi > \pi/3$, а не менее 80–90 % всех ворсинок [19] имеют углы наклона к вертикали $\varphi < \pi/6$.

Таким образом, доля площади, перекрываемая проекциями всех ворсинок, будет равна

$$\begin{aligned} \frac{s}{s_0} &= \int_0^{\pi/2} (ld \sin \varphi + \frac{\pi d^2}{8} \cos \varphi) \frac{n}{\sigma \sqrt{2\pi}} \ell^{-\frac{\varphi^2}{2\sigma^2}} d\varphi = \\ &= \frac{ndl}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{\pi/2} \sin \varphi \ell^{-\frac{\varphi^2}{2\sigma^2}} d\varphi + \frac{\pi d^2 n}{8\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{\pi/2} \cos \varphi \ell^{-\frac{\varphi^2}{2\sigma^2}} d\varphi. \end{aligned} \quad (6.5)$$

Обозначим первое слагаемое $I_1 = s_1/s_0$ и упростим его, заменив $\sin \varphi \approx \varphi$. Это вполне допустимо по двум причинам: для подавляющего числа ворсинок $\varphi < \pi/6$ и такая замена оправдана, а для тех, которые расположены под большими углами, отклонение от равенства компенсируется влиянием экспоненты, особенно при $\varphi > \sigma$.

Учитывая сказанное, можно записать

$$I_1 = \frac{ndl}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{\pi/2} \varphi \ell^{-\frac{\varphi^2}{2\sigma^2}} d\varphi. \quad (6.6)$$

Сделав замену переменной $t = \varphi^2/2\sigma^2$, получим

$$I_1 = \frac{ndl\sigma}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{\pi^2}{8\sigma^2}} \ell^{-t} dt = \frac{ndl\sigma}{\sqrt{2\pi}} \left(1 - \ell^{-\frac{\pi^2}{8\sigma^2}} \right). \quad (6.7)$$

Оценка значения параметра σ на основе эксперимента дает, как правило, величины, не превышающие $\pi/6$. Тогда второе слагаемое в скобках можно считать пренебрежимо малым: $e^{-4,5} \ll 1$. В этом случае результат интегрирования будет выглядеть следующим образом:

$$I_1 = \frac{ndl\sigma}{\sqrt{2\pi}}. \quad (6.8)$$

Теперь рассмотрим второе слагаемое $I_2 = s_2/s_0$. Оно может оказывать влияние на результат лишь при очень малых углах φ . Оценим его величину, начиная с угла, получаемого из приближенного равенства:

$$ld \sin \varphi \cong \frac{\pi d^2}{4} \cos \varphi.$$

Второе слагаемое влияет на результат только в пределах углов:

$$\varphi \leq \arctg \frac{\pi d}{4l} \cong \frac{\pi d}{4l}.$$

Так как для ворса практически всегда выполняется соотношение $l/d > 25$, следовательно, $\varphi < \pi/100$.

Для таких значений углов $\cos \varphi \approx 1$. Взяв верхний предел интеграла с «запасом», равным $\pi/10$, можно записать

$$I_2 = \frac{\pi d^2 n}{4\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{\pi}{10}} \ell^{-\frac{\varphi^2}{2\sigma^2}} d\varphi. \quad (6.9)$$

Используя замену переменной $t = \varphi/\sigma$, получим

$$I_2 = \frac{\pi d^2 n}{4} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\pi/10\sigma} \ell^{-t^2/2} dt = \frac{\pi d^2 n}{4} \Phi_0 \left(\frac{\pi}{10\sigma} \right). \quad (6.10)$$

Величину такого интеграла, являющегося функцией Лапласа, можно определить из таблиц [109]. Если на основе экспериментальных данных принять значение σ в пределах от $\pi/30$ до $\pi/6$, то значения функции будут

$$\Phi_0(0,6) \approx 0,226; \quad \Phi_0(3) \approx 0,499,$$

т. е. $\Phi_0(z) < 1/2$.

Теперь запишем сумму интегралов $I = I_1 + I_2$, вынеся за скобки значение I_1 , и сравним величину первого и второго слагаемых:

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 = \frac{ndl\sigma}{\sqrt{2\pi}} + \frac{\pi d^2 n}{4} \Phi_0 \left(\frac{\pi}{10\sigma} \right) = \\ &= \frac{ndl\sigma}{\sqrt{2\pi}} \left[1 + \frac{\pi\sqrt{2\pi}}{4} \frac{d}{l} \frac{\Phi_0 \left(\frac{\pi}{10\sigma} \right)}{\sigma} \right]. \end{aligned} \quad (6.11)$$

Для реального соотношения d/l и значения σ второе слагаемое в квадратных скобках не превышает $1/5$, а в подавляющем большинстве случаев значительно меньше. Поэтому при оценке площади проекций всех ворсинок второе слагаемое мы будем считать пренебрежимо малым по сравнению с первым. Тогда

$$\frac{s}{s_0} = \frac{ndl\sigma}{\sqrt{2\pi}}. \quad (6.12)$$

Исходя из этого выражения можно оценить степень ориентации ворса σ : если $n = n_{\max}$ можно приближенно считать, что вся площадь основы перекрыта проекциями ворсинок, т. е. $s/s_0 = 1$, тогда

$$\sigma_{\max} = \frac{\sqrt{2\pi}}{n_{\max}ld}. \quad (6.13)$$

В данном случае $\sigma_{\max}$ означает не наибольшее значение, а значение параметра, соответствующее значению $n_{\max}$.

Этот параметр важен тем, что позволяет сравнивать между собой ориентацию ворса с различными геометрическими параметрами и при разных режимах флокирования.

6.2. Экспериментальное исследование распределения ворсинок по углам наклона к вертикали

Возникает вопрос: как экспериментально определить параметр ориентации ворса на поверхности? Эта весьма трудоемкая операция была описана в работах [19], [49], [50]. В настоящее время процесс стал проще и, все равно, он требует значительного времени.

Для анализа ориентации были изготовлены образцы с ворсом одинаковой длины, но с разными электрофизическими свойствами. Образцы нарезали на полоски толщиной до 2 мм и с помощью прибора *MICROCOLOR 2000 250B-LAB* производили съемку среза образца.

Прибор *MICROCOLOR 2000 250B-LAB* состоит из микроскопа, компьютера и фотокамеры высокого разрешения, связанных друг с другом (рис. 6.2). На предметный столик микроскопа укладывали нарезанные полоски флокированного материала. Съемку срезов производили фотокамерой высокого разрешения при 80-кратном увеличении. Данные с фотокамеры поступали на компьютер. На рис. 6.3 для наглядности представлена фотография среза, на которую наложен шаблон с лучами, имеющими углы наклона от 0 до 180° с шагом 10° .

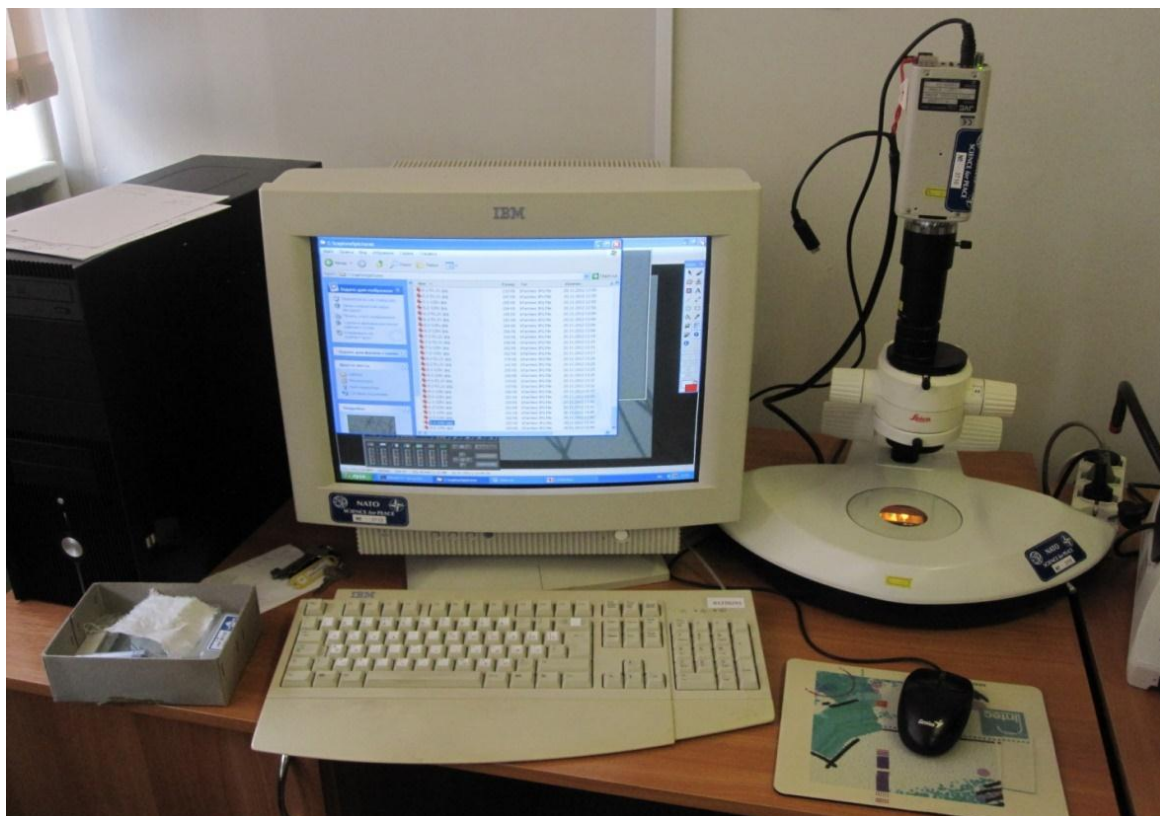


Рис. 6.2. Прибор MICROCOLOR 2000 250B-LAB

Перемещая шаблон вдоль изображения, определяют: в какой интервал углов попадает каждая ворсинка.

Результаты полученного распределения по углам наклона для одного образца представлены в табл. 6.1 (гр. 1–5). В 5-й графе $n_{\text{отн}}$ представляет собой отношение числа ворсинок в данном интервале к общему числу ворсинок. Шестая графа показывает расчетное значение относительного числа ворсинок исходя из плотности нормального распределения (6.1).

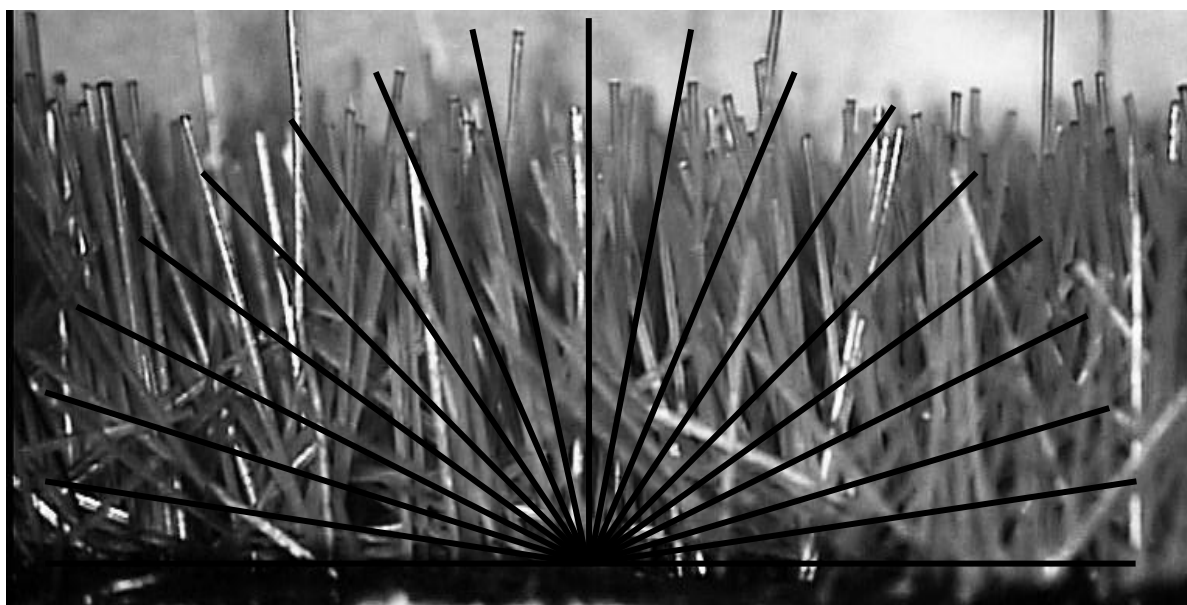


Рис. 6.3. Увеличенное изображение среза флокированного образца

Расчет параметра распределения σ проводили на основе опции «Поиск решения» программы *Excel*, задавая сначала произвольное значение параметра σ (например, 15°), а затем минимизируя сумму квадратов отклонений расчетного и экспериментального значений.

Т а б л и ц а 6.1. Экспериментально-расчетная таблица для определения σ

Интервал $\Delta\varphi, ^\circ$	$\varphi_{срi}, ^\circ$	$\varphi_{срi}, \text{рад}$	Количество ворсинок, n_i	$n_{отн. \text{ э}}$	$n_{отн. \text{ р}}$	$(n_{отн. \text{ р}} - n_{отн. \text{ э}})^2$
1	2	3	4	5	6	7
-50 – -40	-45	-0,77	0	0,000	0,001	0,000
-40 – -30	-35	-0,60	3	0,035	0,006	0,001
-30 – -20	-25	-0,43	4	0,047	0,043	0,000
-20 – -10	-15	-0,26	9	0,106	0,155	0,002
-10 – 0	-5	-0,09	27	0,318	0,294	0,001
0 – 10	5	0,09	23	0,271	0,294	0,001
10 – 20	15	0,26	15	0,176	0,155	0,000
20 – 30	25	0,43	4	0,047	0,043	0,000
30 – 40	35	0,60	0	0,000	0,006	0,000
						$\Sigma = 0,007$

Расчетная плотность распределения и экспериментальные результаты в виде гистограммы представлены на *рис. 6.4*.

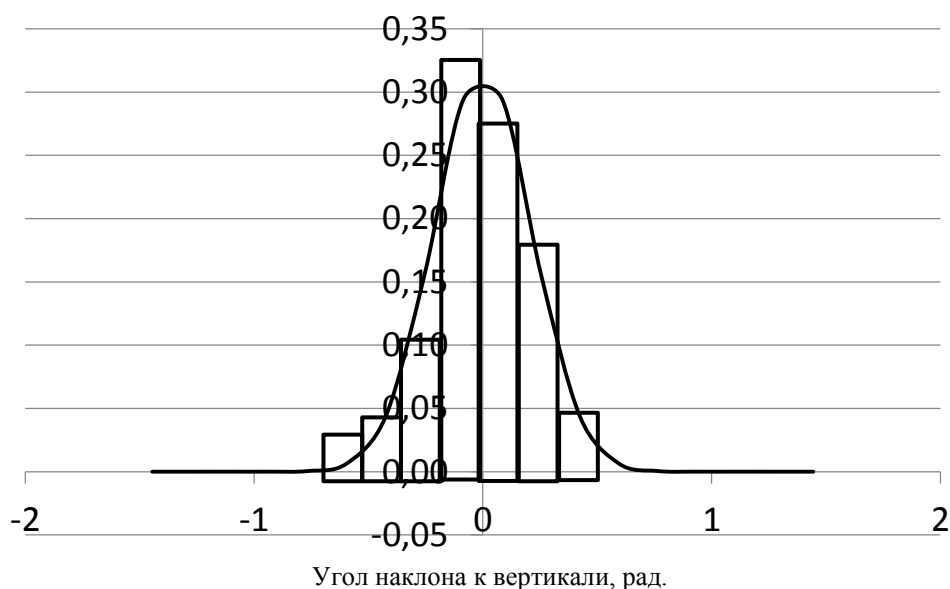


Рис. 6.4. Плотность распределения ворса по углам наклона к вертикали

Для этого примера параметр распределения $\sigma = 12,75^\circ$.

В качестве примера в *табл. 6.2* представлены результаты определения параметра ориентации по описанной методике для трех ворсов с одинаковыми геометрическими характеристиками и при одинаковом режиме нанесения, но с

различными электрофизическими параметрами (электропроводность ворса λ и средний заряд ворсинки q).

Т а б л и ц а 6.2. Результаты определения параметра ориентации

Ворс	λ , Ом ⁻¹ м ⁻¹	q , Кл	σ , град.
1	$14,6 \cdot 10^{-8}$	$3,44 \cdot 10^{-13}$	12,04
2	$5,65 \cdot 10^{-8}$	$5,57 \cdot 10^{-13}$	14,7
3	$10,5 \cdot 10^{-8}$	$3,9 \cdot 10^{-13}$	12,75

Методика измерения электропроводности описана, например, в работах [10], [14]. Измерение среднего заряда было проведено по способу, описанному в работе [19], с использованием дополнительного электрода.

Для анализа влияния режима флокирования на параметр распределения был проведен расчет $\sigma_{\max}$ с использованием полученного выше соотношения (6.13) при разном напряжении и, соответственно, напряженности. При исследовании использовали ворс длиной 3 мм и ворс длиной 0,7 мм. Нанесение осуществляли как традиционным способом сверху вниз, так и снизу-вверх. Результаты представлены в табл. 6.3, 6.4.

Т а б л и ц а 6.3. Влияние условий нанесения ворса на ориентацию ($l = 3$ мм)

Ворс	Способ нанесения	Напряжение флокирования, кВ	$n_{\max}$, 1/мм ²	$\sigma_{\max}^0$
РА $l = 3,0$ мм $d = 50$ мкм	Сверху-вниз	45	51	19
		60	58	16,5
		75	67	14,3
	Снизу-вверх	45	63	15,3
		60	74	12,9
		75	78	12,3

Т а б л и ц а 6.4. Влияние условий нанесения ворса на ориентацию ($l = 0,7$ мм)

Ворс	Способ нанесения	Напряжение флокирования, кВ	$n_{\max}$, 1/мм ²	$\sigma_{\max}^0$
РА $l = 0,7$ мм $d = 20$ мкм	Сверху-вниз	45	330	31
		60	490	21
		75	700	15
	Снизу-вверх	45	460	22
		60	645	16
		75	860	12

Полученные результаты позволяют сделать некоторые заключения.

По степени ориентации действительно можно сравнивать самый разный по геометрическим параметрам ворс.

С ростом напряженности электрического поля ориентация ворса на поверхности материала улучшается, что вполне закономерно.

При нанесении ворса снизу-вверх ориентация оказалась существенно лучше. Это, по-видимому, связано с тем, что вверх может лететь и закрепляться в клеевом слое только качественный ворс, в то время как вниз на материал попадает любой ворс. Однако улучшить ориентацию таким путем можно только для качественного ворса и при высокой напряженности электрического поля.

6.3. Модель ориентации ворса и формирование ворсового покрытия в процессе флокирования

Поток ворса при внедрении в клеевую поверхность имеет определенную ориентацию. Под ориентацией, как было сказано выше, мы будем понимать распределение ворсинок по углам наклона к вертикали при внедрении в клей (т. е. направлению, перпендикулярному плоскости материала). Ориентация ворса, как и величина его заряда, связана с предварительной химической обработкой волокна, которая в значительной степени определяет качество получаемого материала и производительность процесса. В ряде работ [19], [49], [50] было показано, что распределение ворсинок по углам наклона близко к нормальному распределению и характеризуется параметром распределения σ (*средне-квадратичное отклонение для углов наклона ворса к вертикали*). Поэтому количественно ориентацию мы будем характеризовать этим параметром. Чем меньше его значение, тем лучше ориентация ворсинок.

Логично предположить, что в начальный момент времени, когда поверхность клея свободна, все прилетевшие ворсинки внедряются в клеевой слой. По мере роста количества ворсинок на поверхности сокращается размер промежутков между ними. Следовательно, достичь клеевой поверхности и закрепиться могут только те ворсинки, которые лучше ориентированы. В конце концов, вся площадь оказывается перекрыта, и новые ворсинки достичь клеевой поверхности уже не могут. Из этого следует, что по мере заполнения поверхности ворсом параметр распределения σ будет уменьшаться.

Следует отметить, что нормальное распределение в данном случае, конечно, является приближенным описанием. С физической точки зрения максимальные значения угла на оси абсцисс по абсолютному значению не могут превышать $\pi/2$, т. е. 1,57. Однако это не должно существенно влиять на результаты расчетов с использованием модели, поскольку количество ворсинок с углами наклона больше 1 крайне незначительно. В качестве иллюстрации на *рис. 6.5* показаны плотности распределения ворса в начале и при завершении процесса флокирования.

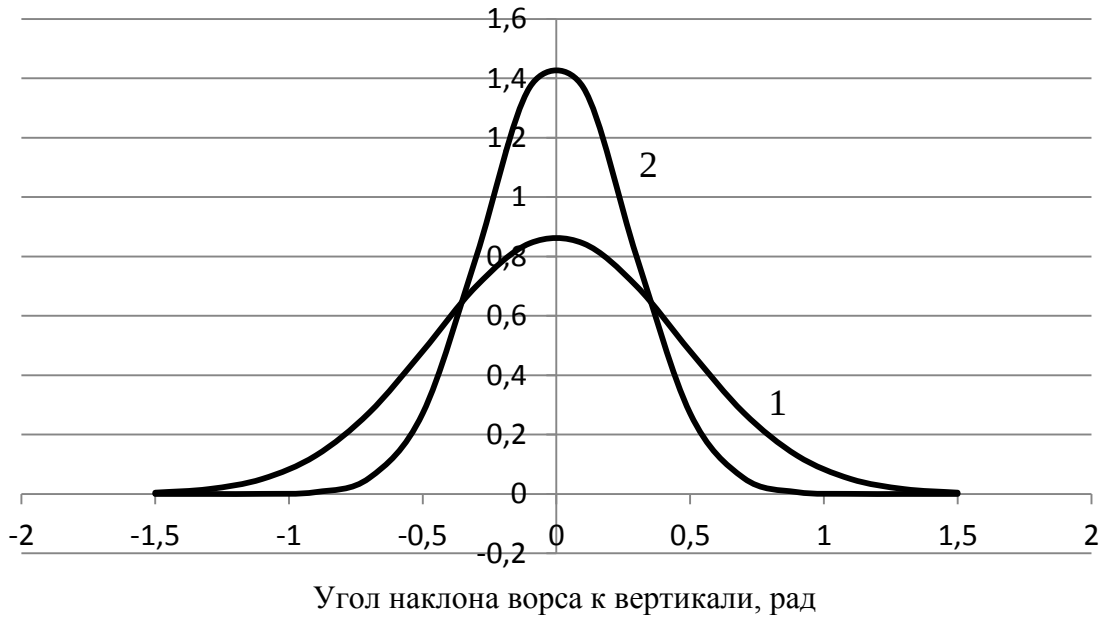


Рис. 6.5. Плотность распределения ворса по углам наклона к вертикали:
1 – начальное распределение; 2 – конечное распределение

6.3.1. Теоретический анализ процесса ориентации ворса

Доля площади, перекрываемой ворсинками, распределение которых по углам наклона соответствует нормальному закону, было рассмотрено в разд. 6.1 и описано в [19].

$$\frac{s}{s_0} = \frac{ld}{\sqrt{2\pi}} \sigma n, \quad (6.14)$$

где l – длина ворса, мм; d – диаметр ворса, мм; n – плотность ворсового покрытия, $1/\text{мм}^2$; σ – параметр ориентации ворса на поверхности, рад.

Будем предполагать, что скорость изменения поверхностной плотности ворсового покрытия пропорциональна скорости поступления ворса к поверхности P ($\text{г}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$) и интегралу, определяющему вероятность внедрения ворса в клеевой слой, величина которого определяется пределом интегрирования. Под интегралом вероятности мы будем иметь в виду следующую величину:

$$\Phi(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^X e^{-X^2/2} dX. \quad (6.15)$$

При достижении предельной плотности ворсового покрова $n_{\max}$ значение параметра ориентации [19] будет равно

$$\sigma(n_{\max}) = \frac{\sqrt{2\pi}}{ldn_{\max}}. \quad (6.16)$$

Следовательно, величина интервала интегрирования сокращается от $\pi/2$ (при $n = 0$) до 0 (при $n = n_{\max}$) по мере заполнения ворсом поверхности. Т. е. аргумент функции в этом случае будет равным

$$X = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{ld}{\sqrt{2\pi}} \sigma n \right). \quad (6.17)$$

Таким образом, в начальный момент пределы интегрирования от 0 до $\pi/2$, т. е. внедряются все ворсинки достигшие поверхности клеевого слоя. При $n = n_{\max}$ верхний предел интегрирования уменьшается до 0.

Математически скорость роста поверхностной плотности ворсового покрытия будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{dn}{dt} = 2P \cdot \Phi \left[\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{ld}{\sqrt{2\pi}} \sigma n \right) \right]. \quad (6.18)$$

При этом хорошо известна ранее полученная зависимость плотности ворсового покрытия от длительности нанесения ворса [28], [29], подтвержденная обширными экспериментальными данными:

$$n(t) = n_{\max} (1 - e^{-t/\tau}), \quad (6.19)$$

где τ – постоянная времени, определяющая скорость роста плотности ворсового покрытия, с; t – продолжительность нанесения ворса, с.

Такая зависимость, как показали многочисленные исследования, очень хорошо описывает динамику изменения плотности ворсового покрытия, если верном определены значения предельной плотности ворсового покрытия и постоянной времени. Производная от этой функции будет равна

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n_{\max}}{\tau} e^{-t/\tau}. \quad (6.20)$$

Объединим полученные зависимости (6.18) и (6.20), учитывая связь $\tau = n_{\max}/P$, и получим следующее соотношение:

$$\Phi \left[\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{ld}{\sqrt{2\pi}} \sigma n \right) \right] = \frac{1}{2} e^{-t/\tau}. \quad (6.21)$$

В работе [110] экспериментально было показано, что ориентация ворса улучшается по мере заполнения поверхности ворсом. Это выражается простым эмпирическим соотношением

$$\sigma = \sigma_0 - kn, \quad (6.22)$$

где σ – параметр ориентации, характеризующий распределение ворсинок по углам наклона к вертикали; σ_0 – параметр, характеризующий начальную ориентацию ворса; n – плотность ворсового покрова ($1/\text{мм}^2$); k – эмпирический коэффициент, определяющий скорость изменения ориентации.

Воспользуемся соотношением (6.13), полученным в работе [19], которое показывает взаимосвязь между предельной плотностью ворсового покрытия $n_{\max}$ и соответствующим параметром ориентации $\sigma(n_{\max})$.

Подставив выражение (6.13) в соотношение (6.22) при $n = n_{\max}$, получим

$$\frac{\sqrt{2\pi}}{ldn_{\max}} = \sigma_0 - kn_{\max}.$$

Выражая из полученного соотношения параметр k , получим зависимость параметра σ от плотности ворсового покрова n :

$$\sigma = \sigma_0 - \frac{n}{n_{\max}} \left(\sigma_0 - \frac{\sqrt{2\pi}}{ldn_{\max}} \right). \quad (6.23)$$

Таким образом, можно численно, на основе экспериментальных значений $n(t)$, определить величину X (см. (6.17)) и, далее, вычислить величину начальной ориентации:

$$\sigma_0 = \frac{n_{\max}}{n_{\max} - n} \cdot \left[\sigma - \sigma_{\max} \frac{n}{n_{\max}} \right]. \quad (6.24)$$

Другим важным следствием соотношения (6.23) является возможность определения скорости изменения ориентации ворса по мере роста плотности ворсового покрова. Коэффициент, определяющий эту скорость, можно записать следующим образом:

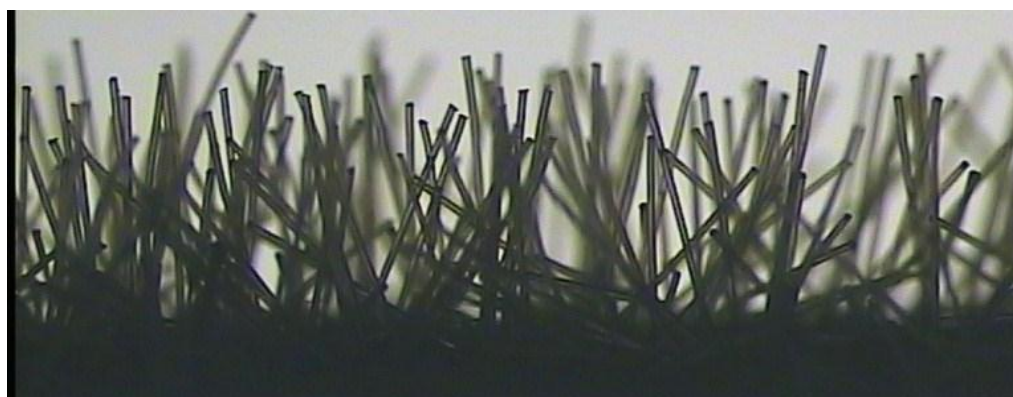
$$k = \frac{1}{n_{\max}} [\sigma_0 - \sigma(n_{\max})]. \quad (6.25)$$

Предлагаемая модель, основанная на представлении об ориентации ворса, нуждается в экспериментальном обосновании.

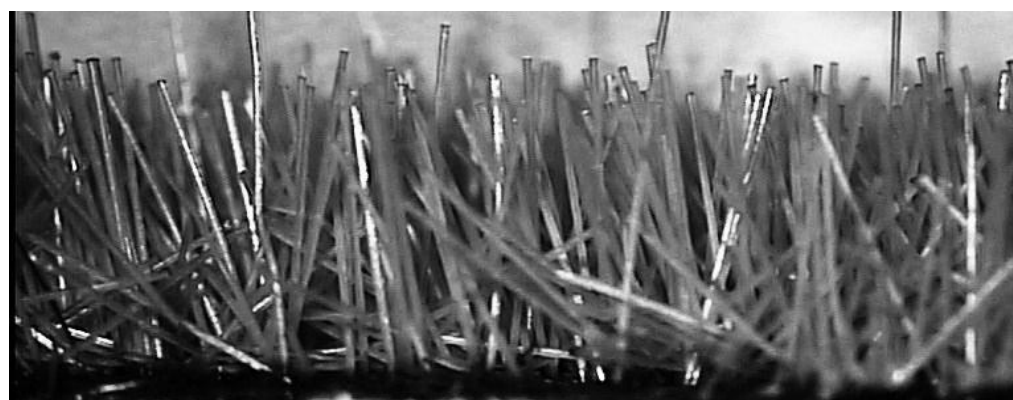
6.3.2. Экспериментальное исследование процесса ориентации ворса в процессе формирования ворсового покрытия

В работе [49], [110] была проведена экспериментальная оценка ориентации ворса на поверхности флокированного материала при разной плотности ворсового покрытия. Оценка базировалась на изучении распределения ворсинок по углам наклона на срезе материала. Для каждого из них измерена поверхностная плотность ворсового покрова и приготовлены тонкие срезы для оценки ориентации ворса.

Изображение срезов получали с помощью прибора *MICROCOLOR 2000 250B-LAB* [110]. Пример такого изображения представлен на *рис. 6.5*.



a



б

Рис. 6.6. Увеличенное изображение среза флокированного образца:
a – время нанесения 3 с; *б* – время нанесения 25 с

На основе полученных изображений по методике, описанной в работе [110], получены плотности распределения ворсинок по углам наклона к вертикали и определены значения параметра распределения σ .

Во всех случаях было обнаружено снижение параметра ориентации σ , т. е. улучшение ориентации, при возрастании поверхностной плотности ворсового покрытия.

На основе тех же экспериментальных данных по предложенной методике, описанной в подразд. 6.3.1, была проведена численная оценка параметра ориентации σ .

Методика расчета была построена таким образом, чтобы не использовать результаты вычисления параметров флокирования $n_{\max}$ и τ на основе традиционной модели (6.19), а основываться только на предложенной модели формирования ворсового покрова (6.21).

Последовательность расчетов и результаты представлены в *табл. 6.5*. Первые две графы включают результаты эксперимента: время и поверхностная плотность ворсового покрытия (г/м^2). Третья графа – это пересчет поверхностной плотности из г/м^2 в $1/\text{мм}^2$, так как в соотношениях (6.23)–(6.25) размерность поверхностной плотности ворсового покрытия должна быть такова. В четвертой графе представлены результаты расчета параметра ориентации σ на основе соотношения (6.23) с использованием значений, приведенных в *табл. 6.6*. Следующая графа – это вычисление аргумента X (6.21) функции $\Phi(X)$. Графа 6 – это вычисленное значение функции $\Phi(X)$. Последние две графы используются для непосредственного вычисления параметров процесса σ_0 , τ и $n_{\max}$ (*табл. 6.6*). В графе 7 вычислена разность правой и левой части соотношения (6.23), а в графе 8 квадрат этой разности. Критерием выбора указанных параметров служит соотношение

$$\Delta = \sum \left\{ \Phi \left[\frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{ld}{\sqrt{2\pi}} \sigma n \right) \right] - \frac{1}{2} e^{-\frac{t}{\tau}} \right\}^2 = \min. \quad (6.26)$$

Для численного расчета параметров использована опция программы *Excel* «Поиск решения». Начальные значения параметров устанавливали приближенно.

Т а б л и ц а 6.5. Расчет параметров процесса флокирования

$t, \text{с}$	$n, \text{г/м}^2$	$n, 1/\text{мм}^2$	$\sigma, \text{рад.}$	X	$\Phi(X)$	$[\Phi(X) - e^{-t/\tau}/2]^2$
1	2	3	4	5	6	7
4	30,6	92,8	0,687	0,769	0,278	0,000 1
8	47,8	144,9	0,619	0,443	0,171	0,000 6
12	66,9	202,6	0,544	0,186	0,075	0,000 9
16	71,6	216,9	0,525	0,140	0,056	0,000 1
						$\Delta = 0,001 7$

Результаты расчетов представлены в *табл. 6.6*, где кроме этого вычислены значения $\sigma_{\max}$ (6.16) и k (6.25).

Т а б л и ц а 6.6. Результаты расчета параметров процесса

σ_0 , рад	τ , с	k	$n_{\max}$, 1/мм ²	$\sigma_{\max}$, рад.
0,809	6,98	0,0013	309,0	0,404

По такой же методике были проведены расчеты для второго ворса ($l = 0,5$ мм, $T = 0,33$ текс, $d = 20$ мкм).

Сводные результаты измеренных значений параметра ориентации и его расчеты представлены в табл. 6.7.

Т а б л и ц а 6.7. Сравнение расчетной и экспериментальной ориентации ворса

Ворс 1: ПА, $l = 1$ мм, $T = 0,33$ текс, $d = 20$ мкм				Ворс 2: 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	30,625	44,67	39,413 57	2	26,25	34,65	36,81
8	47,812 5	37,8	35,505 12	5	73,75	25,59	28,56
12	66,875	36,3	31,170 29	10	83,75	25,44	26,82
16	71,562 5	31,4	30,104 35	15	82,5	23,49	27,04

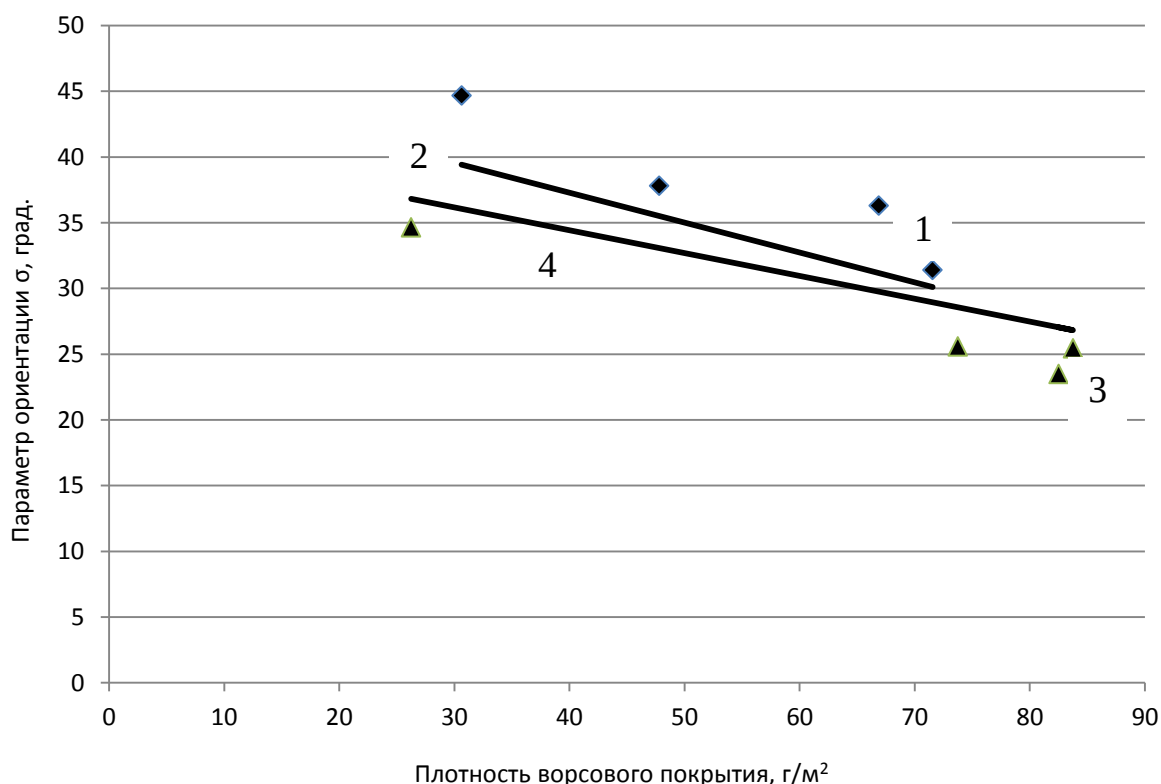


Рис. 6.7. Изменение ориентации ворса по мере роста плотности ворсового покрытия:

1, 2 — экспериментальные и расчетные значения параметра ориентации для 1-го ворса ($l = 1$ мм); 3, 4 — для 2-го ворса ($l = 0,5$ мм)

Важным моментом является возможность расчета плотности ворсового покрытия при различной продолжительности процесса нанесения ворса. В данной модели эта процедура несколько сложнее, чем в традиционной модели, но вполне реализуема численно с использованием, например, *Excel*. На *рис. 6.8* представлены расчетные зависимости для модели (6.19) и новой модели (6.21). Это сплошная и пунктирная кривые. Здесь же представлены экспериментально измеренные значения плотности ворсового покрытия. Как мы видим, расчетные кривые практически совпадают.

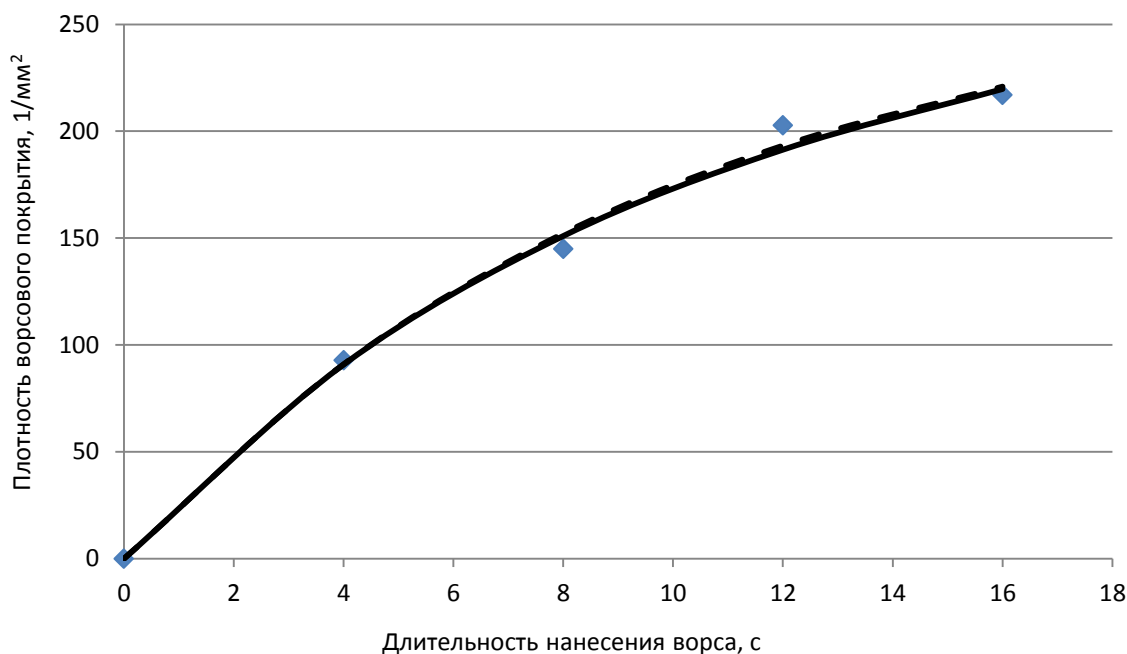


Рис. 6.8. Зависимость поверхностной плотности ворсового покрытия от длительности процесса нанесения

Таким образом, предлагаемые представления об ориентации ворса в процессе формирования ворсового покрытия на флокированном материале позволили получить математическую модель, которая дает возможность не только рассчитать поверхностную плотность ворсового покрытия при различной длительности нанесения, но и оценить ориентацию ворса с начального момента до достижения предельного значения плотности. Это позволит в дальнейшем выявить влияние режима нанесения и электрофизических параметров ворса на начальную ориентацию ворса и динамику ее изменения в процессе флокирования. Такая взаимосвязь необходима для определения более точных требований к химической подготовке ворса, обеспечивающей максимальную производительность процесса флокирования.

6.3.3. Анализ процесса ориентации ворса с использованием относительных характеристик

Полученная модель, основанная на рассмотрении процесса ориентации ворса, как показали исследования, хорошо описывает динамику изменения плот-

ности ворсового покрытия. Эту же зависимость можно представить как взаимосвязь относительной плотности ворсового покрытия и относительной продолжительности флокирования:

$$\frac{n}{n_{\max}} = f\left(t/\tau\right) = 1 - e^{-t/\tau}. \quad (6.27)$$

Если предположение об универсальном характере такой зависимости соответствует действительности, то любая зависимость плотности ворсового покрова от продолжительности нанесения в таких координатах будет ложиться на одну кривую. На *рис. 6.9* представлена эта кривая и экспериментальные значения относительной плотности ворсового покрытия для 5 серий при различных условиях флокирования и для различного ворса.

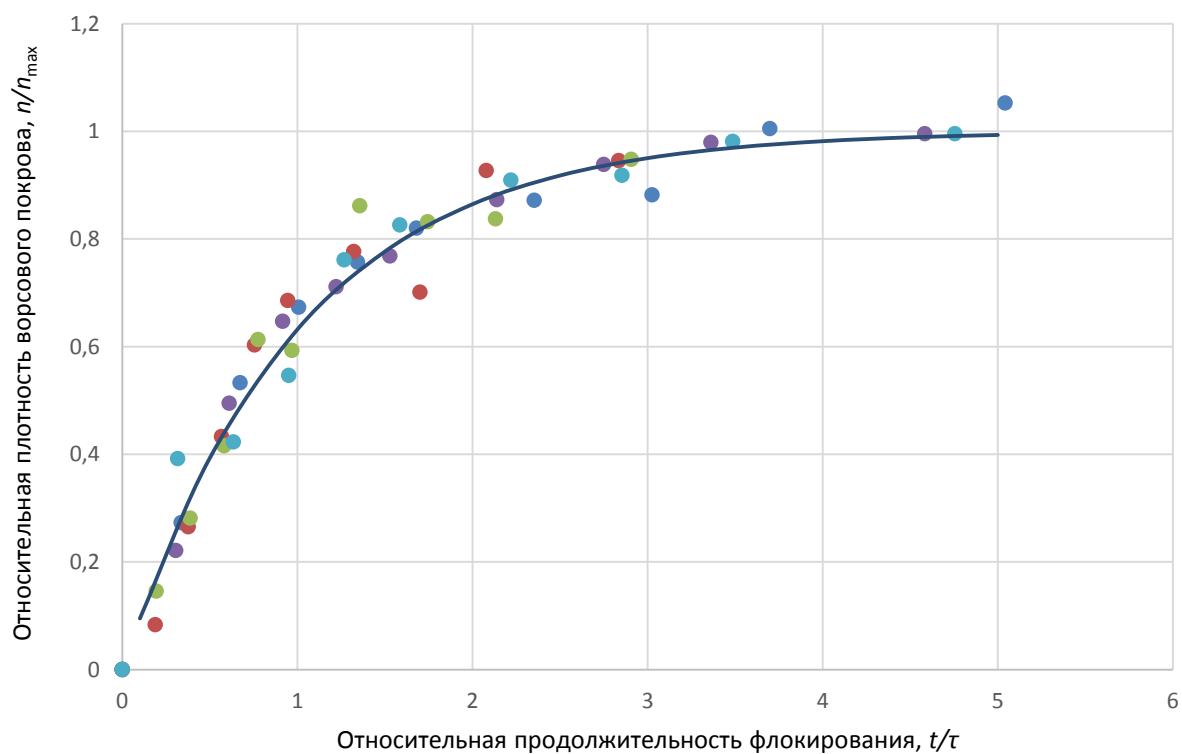


Рис. 6.9. Относительная плотность ворсового покрова $n/n_{\max}$ от относительной длительности флокирования t/τ

Результаты численных расчетов для относительной ориентации $\sigma/\sigma_{\max}$ и относительной плотности ворсового покрова $n/n_{\max}$ от относительной длительности флокирования t/τ на основе соотношения (6.21) представлены в *табл. 6.8*.

Т а б л и ц а 6.8. Взаимосвязь относительных параметров процесса флокирования

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
$\sigma/\sigma_{\max}$	1,268	1,161	1,10	1,055	1,031	1,018	1,010 5	1,006 3	1,003 8	1,002 3	1,001 4

Полученная зависимость $\sigma/\sigma_{\max} = f(n/n_{\max})$ является линейной (рис. 6.10) и универсальной для ворса любых геометрических размеров и для любых условий нанесения.

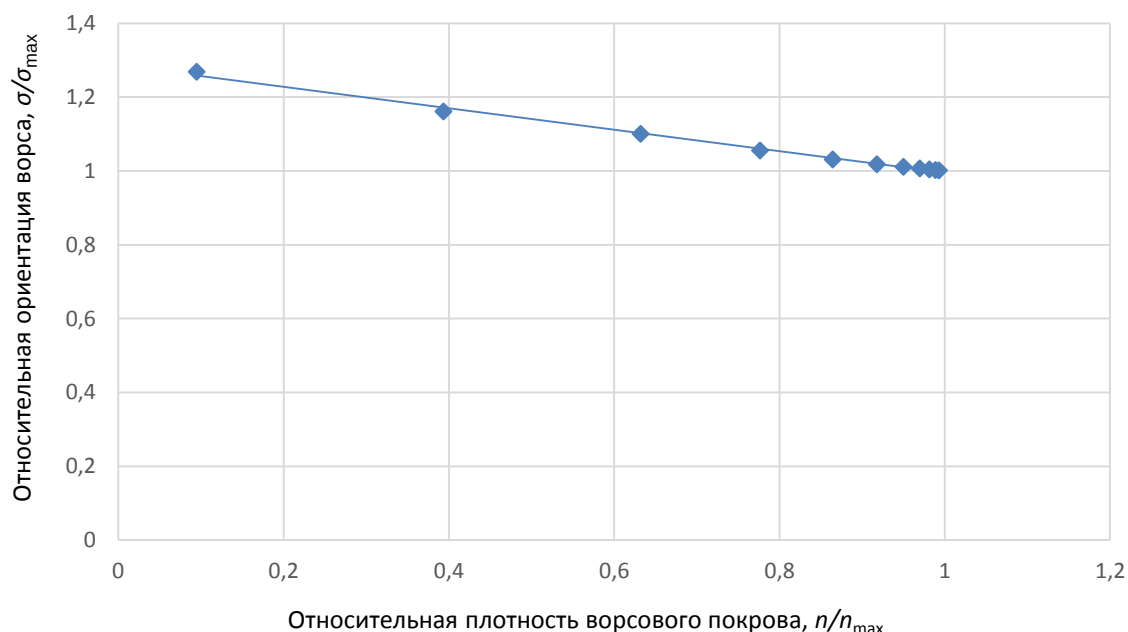


Рис. 6.10. Зависимость относительной ориентации от относительной плотности ворсового покрытия

Математически полученное соотношение с достоверностью 0,995 8 выглядит следующим образом:

$$\sigma/\sigma_{\max} = 1,286 - 0,286 n/n_{\max}. \quad (6.28)$$

Первое важное следствие – это постоянство соотношения $\sigma_0/\sigma_{\max} = 1,286$. Это означает, что при неизменном режиме флокирования начальная ориентация определяет конечную ориентацию, соответствующую предельной плотности ворсового покрытия, и, тем самым, ориентацию в любой момент времени. Следовательно, определяющим моментом является начальная ориентация потока ворса или средняя ориентация потока ворса в начальный момент внедрения в клеевую поверхность.

Аналогичное положение вытекает из зависимости относительной ориентации от относительной продолжительности процесса флокирования $\sigma/\sigma_{\max} = f(t/\tau)$ (рис. 6.11).

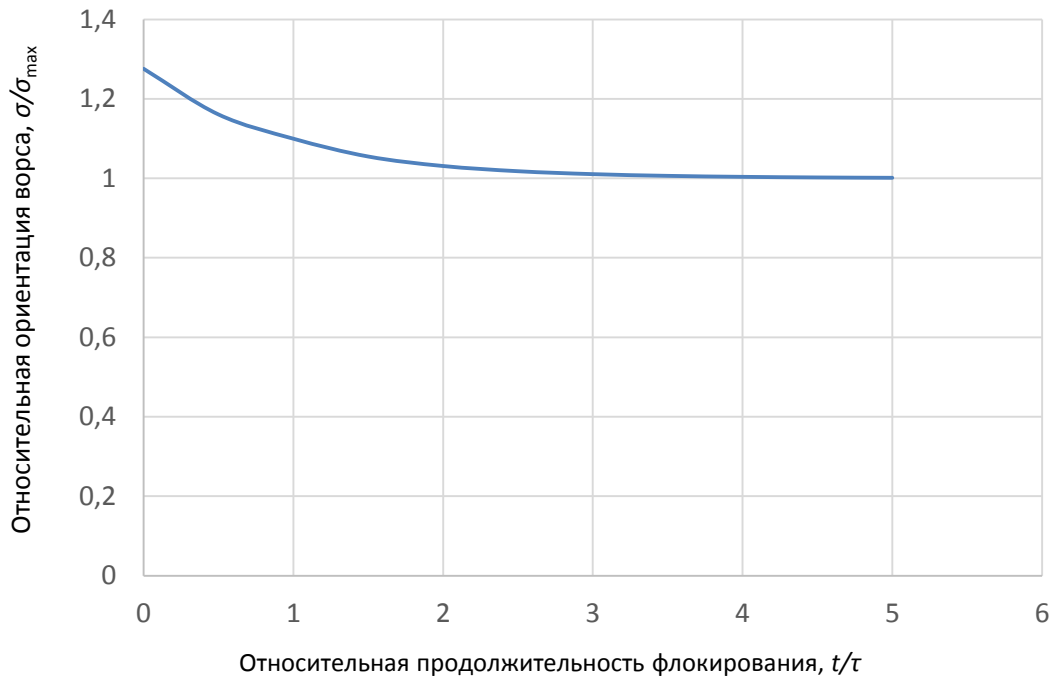


Рис. 6.11. Зависимость относительной ориентации от относительной длительности флокирования.

Эта зависимость не является линейной, и ее можно записать следующим образом:

$$\sigma/\sigma_{\max} = 0,286 e^{-t/\tau} + 1. \quad (6.29)$$

Ее следствие аналогично предыдущему: в начальный момент времени параметр ориентации в 1,286 раз больше конечного значения. Динамика формирования ворсового покрытия определяется ориентацией ворса в начальный момент, т. е. ориентацией потока ворса, подлетающего к поверхности материала.

Попробуем оценить влияние начальной ориентации ворса на производительность процесса. Зависимость относительной продолжительности формирования нужной относительной плотности ворсового покрытия выглядит следующим образом:

$$t_0/\tau = \ln \left(1 - n_0/n_{\max} \right). \quad (6.30)$$

$$t_0/\tau = \ln \left(1 - \frac{ldn_0\sigma_0}{1,286\sqrt{2\pi}} \right). \quad (6.31)$$

Для ворса длиной $l = 1$ мм, $d = 0,02$ мм и линейной плотности $T = 0,33$ текс при заданном значении плотности ворсового покрытия $n_0 = 80$ г/м² мы построили 3 кривых, представляющих зависимости времени формирования ворсового покрытия требуемой поверхностной плотности t_0 от начального параметра ориентации σ_0 при трех значениях постоянной времени τ , равном 7, 10 и 13 с.

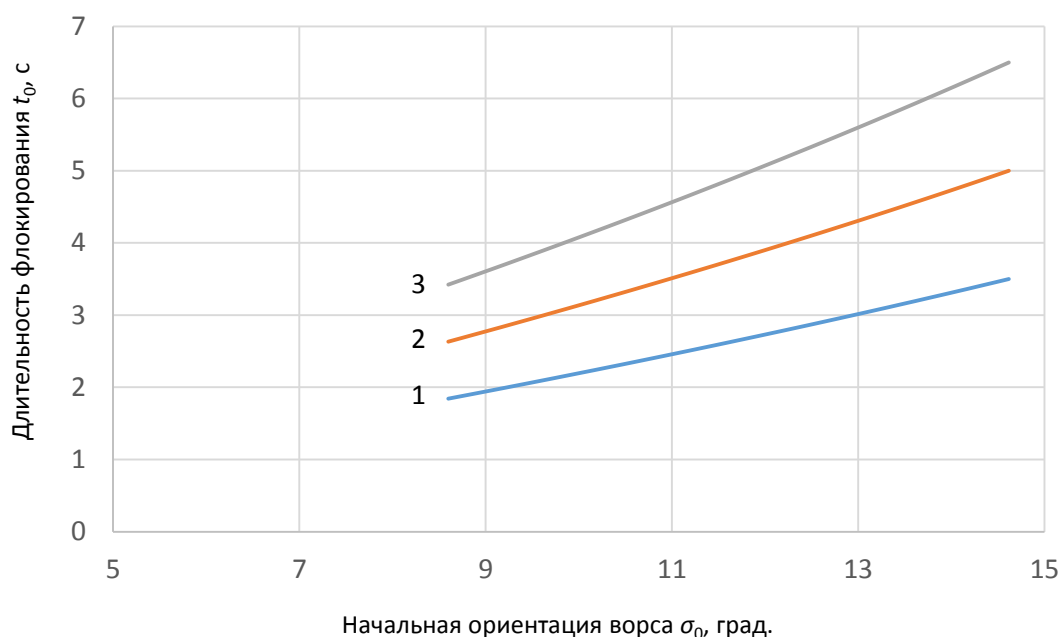


Рис. 6.12. Влияние начальной ориентации ворса на время формирования заданной плотности ворсового покрытия:
 $1 - \tau = 7$ с; $2 - \tau = 10$ с; $3 - \tau = 13$ с

Представленные на *рис. 6.12* зависимости показывают насколько значима начальная ориентация ворса для повышения производительности.

6.4. Ориентация ворса на цилиндрической поверхности

В предыдущих разделах был рассмотрен вопрос об ориентации ворса при его нанесении на поверхность плоских материалов. Однако, как было замечено в процессе получения флокированных нитей, на их поверхности плотность ворса оказывается существенно выше, чем для такого же ворса на поверхности плоского материала. Это, по-видимому, можно объяснить цилиндрической формой поверхности нити, причем важно, что её радиус вполне сравним с длиной ворса.

Рассмотрим взаимосвязь ориентации ворса с величиной предельно достижимой плотности ворса на цилиндрической поверхности малого радиуса [19], соизмеримого с длиной ворса. На *рис. 6.13* показано произвольное расположение ворсинки 1 на цилиндрической поверхности 2. Из рисунка видно, что перекрываемая ворсинкой площадь цилиндрической поверхности Δs_0 существенно меньше площади, перекрываемой на плоской поверхности Δs_1 .

Предположим, что ворсинка при внедрении в клеевой слой на нити оказалась расположенной под некоторым углом к радиальному направлению. Для определения площади перекрываемой ворсинкой можно спроектировать ворсинку на плоскость, касательную к поверхности цилиндра в точке внедрения ворсинки и далее разложить эту проекцию на направление оси нити и направление, перпендикулярное к нему. Ясно, что если ворсинка имеет только проекцию на направление оси нити, то площадь, ею перекрываемая, будет такая же,

как и на плоскости. Наоборот, если проекция ворсинки перпендикулярна оси нити, то площадь, перекрываемая ею, значительно меньше, чем на плоскости (рис. 6.13), и равна в этом случае

$$S_n = \frac{l d r_0 \sin \alpha}{l \cos \alpha + r_0}, \quad (6.32)$$

где r_0 – радиус нити с клеевым слоем; l – длина ворса; d – диаметр ворса.

Теперь приближенно оценим суммарную долю площади, перекрываемую всеми ворсинками на цилиндрической поверхности. Реально ворсинки распределены на цилиндрической поверхности относительно радиального направления случайным образом. Так как количество ворсинок даже на 1 мм^2 весьма велико, будем считать, что половина ворсинок имеет наклон вдоль нити, а половина – поперек. Тогда

$$\frac{S}{S_0} = \frac{n_{\max} d l \sigma}{2\sqrt{2\pi}} \left[1 + \frac{r_0}{l + r_0} \right].$$

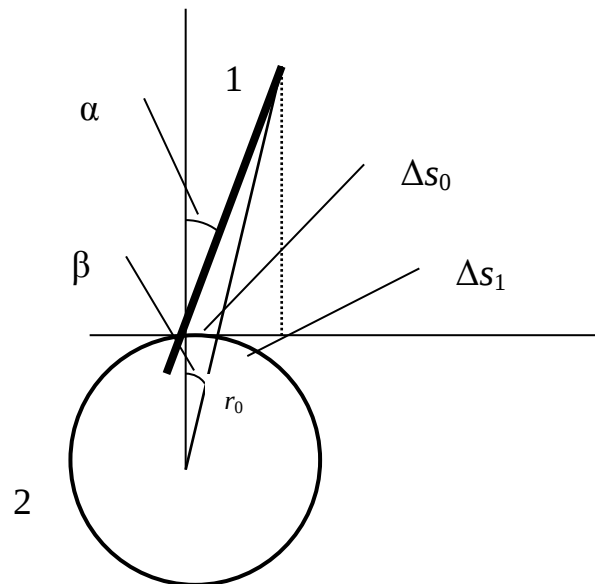


Рис. 6.13. Расположение ворсинки на цилиндрической поверхности:

1 – ворсинка длиной l ; 2 – стержневая нить с клеевым слоем радиуса r_0

Далее, полагая, как и для плоских материалов, что при достижении предельной плотности $n_{\max}$ будет перекрыта вся площадь поверхности основы, получим для параметра σ следующее выражение:

$$\sigma = \frac{2\sqrt{2\pi}}{l d n_{\max}} \frac{1}{1 + \frac{r_0}{l + r_0}}. \quad (6.33)$$

Используя полученное выражение, можно, как и для плоских материалов, оценивать и сравнивать степень ориентации ворса на флокированных нитях исходя из величины предельной плотности, при различных режимах флокирования и для различного ворса.

Полученное выражение можно проверить путем предельного перехода. По мере возрастания радиуса кривизны поверхности r_0 её форма приближается к плоскости. В соответствии с этим, действительно, при $r_0 \rightarrow \infty$ значение параметра σ стремится к его значению для плоской поверхности.

На основе полученных результатов можно сравнить максимальные плотности ворса на цилиндрической и плоской поверхностях при одинаковой ориентации σ . Для этого вычислим отношение величин предельных плотностей ворса для цилиндрической и плоской поверхностей:

$$\delta = \frac{2}{1 + \frac{r_0}{l + r_0}}.$$

Теперь можно оценить приближенное численное значение этого отношения. Примем диаметр ворса d равным 20 мкм, длину ворса l – равной 1 мм и радиус нити с клеевым слоем r_0 – 0,25 мм. При таких условиях второе слагаемое в знаменателе будет существенно меньше 1, т. е. плотность ворса на цилиндрической поверхности может до двух раз превышать плотность ворса на плоском материале. Для указанных конкретных геометрических параметров превышение плотности составляет 1,7 раза.

Таким образом, проведенный анализ достаточно хорошо объясняет высокие значения плотности ворса, полученные при изготовлении флокированных нитей.

6.5. Модель процесса внедрения нового ворса в структуру ранее нанесенного ворсового покрова при их последовательном осаждении

Существует несколько технологий, в которых осуществляется последовательное или одновременное нанесение различного ворса на поверхность, покрытую клеевым слоем. В первую очередь это, конечно, относится к технологиям получения многоцветных флокированных рисунков [91], [95], [99]–[103]. Во всех вариантах возникает вопрос о четкости границ цветовых переходов. Этот вопрос непосредственно связан с процессом нанесения ворса на поверхность, где ранее уже нанесен с определенной плотностью другой ворс.

В разработанной новой технологии получения многоцветных ворсовых узоров [101]–[103] это проявляется особенно сильно, поскольку она отличается от других известных способов использованием неоднородного электрического поля для создания ворсового узора при последовательном нанесении ворсов разного цвета «поверх» ранее созданного узора. Применение неоднородного поля будет рассмотрено подробно в следующем разделе. Что же касается второго, то именно он определяет контрастность получаемого узора, т. е. ширину (размер) зоны перехода цвета. При нанесении первого ворса возникает узор с более или менее четкой границей, т. е. с плавным или резким изменением плотности ворса на границе узора. Плотность нанесения следующего ворса в каждой точке, а значит, и насыщенность данного цвета будет зависеть от плотности ранее нанесенного ворса. Поэтому для изучения возможности внедрения после-

дующих ворсов следует учесть распределение ворсинок на поверхности по углам наклона к вертикали для ранее нанесенного ворса.

В работе [19] было получено соотношение, из которого следует, что отношение доли площади, перекрытой ворсинками, примерно равно отношению соответствующей плотности ворса к предельному значению плотности:

$$\frac{S}{S_0} = \frac{n}{n_{\max}}. \quad (6.34)$$

Следовательно, доля свободной площади

$$1 - \frac{S}{S_0} = 1 - \frac{n}{n_{\max}}.$$

Если после нанесения первого ворса с плотностью n_1 на оставшуюся незаполненную площадь наносится второй ворс, то его количество на единице площади с ранее нанесенным ворсом не может превышать значения

$$\Delta n_2 = \left(1 - \frac{n_1}{n_{1\max}}\right) n_{2\max}. \quad (6.35)$$

Это соотношение позволяет оценить максимальную дополнительную поверхностную плотность ворса. Данную формулу можно использовать и в случае второго ворса с иными геометрическими параметрами, чем первый. Важно то, что это соотношение достаточно легко проверяется экспериментально.

6.5.1. Исследование процесса внедрения нового ворса в структуру ранее нанесенного ворсового покрытия

Методика экспериментального обоснования соотношения (6.35) заключается в том, что два различных ворса (например, разной длины) наносили на основу, покрытую клеем, по очереди. Сначала получали образцы различной плотности вплоть до максимальной с первым ворсом, измеряли плотность, а затем наносили второй ворс также до максимального значения, измеряя его плотность. Плотность ворса на каждом шаге оценивали по привесу. Зная величину предельной плотности для каждого ворса и плотность ранее нанесенного первого ворса, можно оценить, до какой плотности может быть доведена плотность второго ворса, наносимого «поверх» первого и сравнить с экспериментальными результатами.

Для эксперимента были выбраны два ворса разной длины – 0,5 и 1,0 мм, наносимые на основу с клеевым слоем по очереди и в разном порядке. Результаты представлены в *табл. 6.9* и *6.10*. В первой серии опытов сначала наносили ворс длиной 1 мм, а во второй – ворс длиной 0,5 мм. Также в каждой серии опытов нанесение второго ворса проводили при двух разных напряжениях. Прочерки в некоторых графах таблиц означают, что в этих случаях один из ворсов наносили с плотностью, близкой к предельной, а другой ворс не наносили вовсе.

Т а б л и ц а 6.9. Поверхностная плотность второго ворса от плотности первого ворса

$l_1 = 1 \text{ мм},$ $U_1 = 40 \text{ кВ}$	$l_2 = 0,5 \text{ мм},$ $U_2 = 30 \text{ кВ}$	$l_1 = 1 \text{ мм},$ $U_1 = 40 \text{ кВ}$	$l_2 = 0,5 \text{ мм},$ $U_2 = 25 \text{ кВ}$
$n_1, \text{ г/м}^2$	$n_2, \text{ г/м}^2$	$n_1, \text{ г/м}^2$	$n_2, \text{ г/м}^2$
225	—	225	—
152	61	141	52
124	72	112	67
105	98	91	84
74	126	59	106
—	198	—	151

Т а б л и ц а 6.10. Поверхностная плотность второго ворса от плотности первого ворса

$l_1 = 0,5 \text{ мм},$ $U_1 = 25 \text{ кВ}$	$l_2 = 1 \text{ мм},$ $U_2 = 40 \text{ кВ}$	$l_1 = 0,5 \text{ мм},$ $U_1 = 25 \text{ кВ}$	$l_2 = 1 \text{ мм},$ $U_2 = 50 \text{ кВ}$
$n_1, \text{ г/м}^2$	$n_2, \text{ г/м}^2$	$n_1, \text{ г/м}^2$	$n_2, \text{ г/м}^2$
146	—	146	—
114	42	108	54
96	56	92	73
77	88	71	108
61	114	60	126
—	196	—	215

Для наглядности результаты представлены в виде графиков (рис. 6.14).

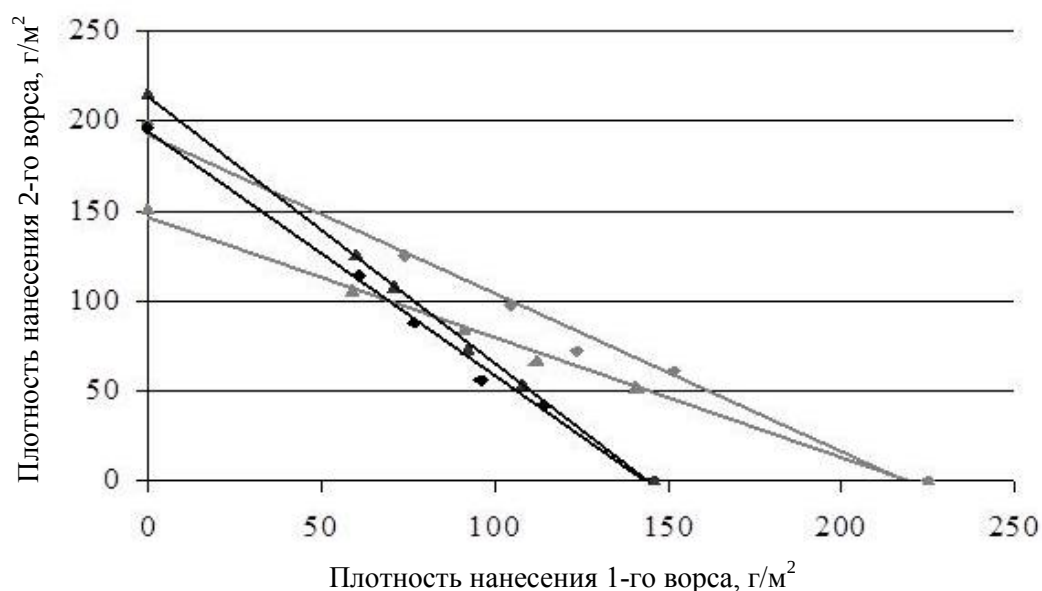


Рис. 6.14. Зависимость плотности второго ворса от плотности нанесения первого ворса:
 I серия II серия

Представленные зависимости однозначно подтверждают полученное соотношение (6.35). Т. е. можно констатировать, что процесс проникновения второго ворса при ранее нанесенном первом подтвержден экспериментально. Это позволяет в дальнейшем провести анализ проникновения ворса второго цвета в зоне перехода цвета на получаемых рисунках.

6.5.2. Методика анализа цветовых переходов на ворсовых узорах с использованием модели проникновения ворсов при их последовательном нанесении

Если распределение первого ворса на поверхности известно и описывается зависимостью $n_1(x)$, то рост плотности второго ворса зависит от времени и описывается известной зависимостью (2.2):

$$n_2 = n_{2\max} (1 - e^{-kt}).$$

С учетом того, что часть площади занята первым ворсом, имеющим указанное распределение $n_1(x)$, скорость роста второго ворса будет отличаться в разных точках x :

$$n_2(x, t) = \left(1 - \frac{n_1(x)}{n_{1\max}}\right) n_{2\max} (1 - e^{-kt}). \quad (6.36)$$

Дальнейший анализ процесса взаимопроникновения ворсов при последовательном нанесении сначала требует получения вида зависимости, описывающей распределение плотности ворса на границе при нанесении по данной технологии. Эту зависимость можно получить для простейшего варианта распределения ворса – параллельных ворсовых полос. Распределение плотности ворсового покрытия экспериментально можно получить с помощью датчика, использующего метод оптического пропускания [79]–[84]. Определение плотности проводилось через 3 мм. Вид распределения плотности ворса в направлении, перпендикулярном ворсовой полосе, хорошо описывается функцией

$$f(x) = \frac{C}{1 + e^{-k_n(x-a)}}. \quad (6.37)$$

Представленная зависимость определяется тремя параметрами – C , a и k_n , при этом параметр k_n отвечает за скорость изменения функции, т. е. за скорость изменения плотности ворса. Объединение уравнения распределения плотности ворса (6.36) и найденного вида зависимости (6.37) дает

$$n_2(x, t) = \left(1 - \frac{n_1}{n_{1\max}} \frac{1}{1 + e^{-k_n(x-a)}}\right) n_{2\max} \left(1 - e^{-\frac{P}{n_{2\max}}t}\right). \quad (6.38)$$

Как было указано вначале, задача исследований – оценка зоны цветового перехода, возникающей при создании ворсовых узоров по данной технологии. Экспериментально измерить плотность ворса двух цветов, одновременно присутствующих на поверхности материала, весьма затруднительно. Однако если это ворсы разных цветов, можно использовать компьютерные технологии. Для ворсов разных цветов изменение плотности ворса соответствует изменению

цвета на поверхности образца. Максимальная плотность и «цвет» одного ворса соответствуют минимальной плотности и «цвету» другого ворса.

6.5.3. Методика компьютерного анализа зоны цветового перехода

Для разработки методики анализа изменения цвета на поверхности флокированного материала [19] изготавливают флокированные образцы с параллельными полосами разного цвета. Затем образцы сканируют (рис. 6.15).

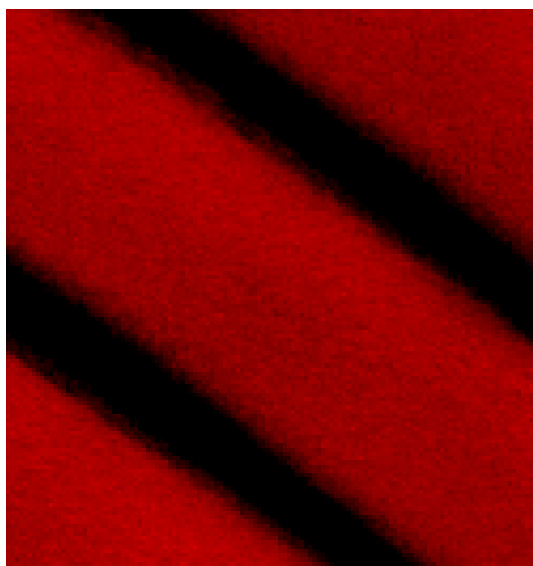


Рис. 6.15. Флокированный образец после сканирования

Далее полученное изображение обрабатывают с помощью программы *Adobe Photoshop* [19], выделяют участок и производят выравнивание цвета (рис. 6.16).

Суть дальнейших процедур состоит в том, что с помощью упомянутой программы последовательно вдоль прямой, перпендикулярной границе (рис. 6.16), определяются составляющие цвета в пространстве RGB . Каждому из двух цветов в пространстве RGB соответствует своя точка: первому – $R_1G_1B_1$, второму – $R_2G_2B_2$.

Переход от первого цвета ко второму соответствует перемещению от первой точки ко второй. Это перемещение может происходить не обязательно по прямой. При этом считаем, что плотность ворса данного цвета (например, первого) на образце пропорциональна расстоянию от исходной точки в пространстве RGB – $R_1G_1B_1$. По мере роста плотности ворса второго цвета координаты в пространстве RGB будут приближаться ко второй точке – $R_2G_2B_2$.

Переход от первого цвета ко второму соответствует перемещению от первой точки ко второй. Это перемещение может происходить не обязательно по прямой. При этом считаем, что плотность ворса данного цвета (например, первого) на образце пропорциональна расстоянию от исходной точки в пространстве RGB – $R_1G_1B_1$. По мере роста плотности ворса второго цвета координаты в пространстве RGB будут приближаться ко второй точке – $R_2G_2B_2$.

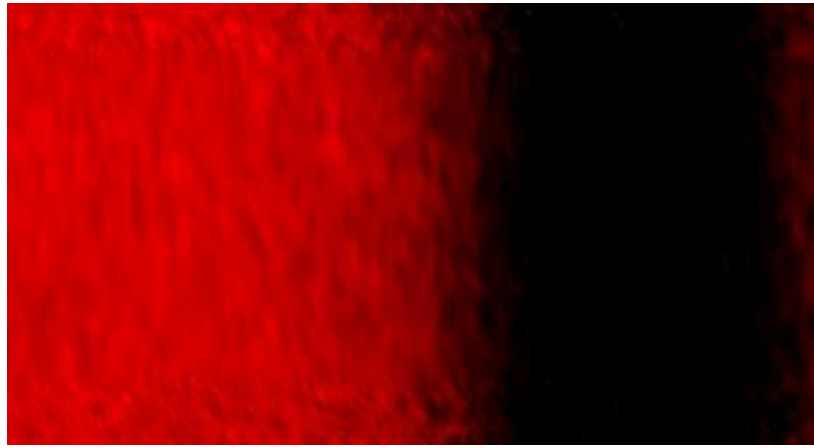


Рис. 6.16. Образец, преобразованный в программе *Adobe Photoshop*

Таким образом, график расстояния в пространстве RGB от исходной точки $R_1G_1B_1$ (или точки $R_2G_2B_2$) в зависимости от расположения этой точки на прямой, перпендикулярной полосам, будет соответствовать изменению плотности ворса вдоль этой прямой (рис. 6.17). Расстояние произвольной точки с координатами RGB от исходной точки

$$S = \sqrt{(R - R_1)^2 + (G - G_1)^2 + (B - B_1)^2}. \quad (6.39)$$

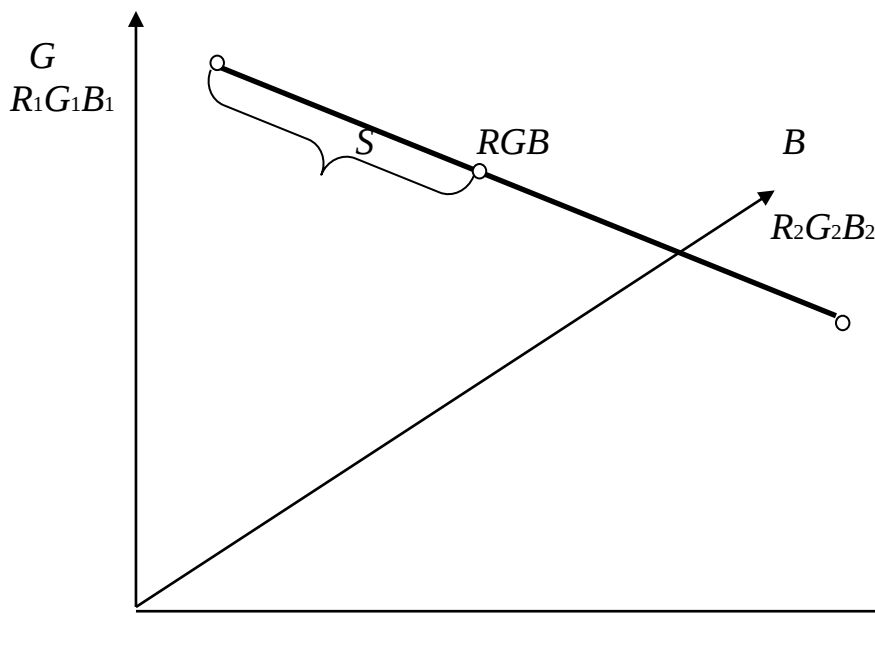


Рис. 6.17. Схема цветового перехода в пространстве RGB

6.5.4. Исследование распределения плотности ворса для случая параллельных ворсовых полос

После определения параметра S можно легко построить график $S(x)$ для любой пары цветов ворса и любых условий перехода от одного цвета к другому. На рис. 6.18 и 6.19 представлены графики для образцов, полученных при

различных значениях напряженности нанесения первого ворса, – 4 и 2 кВ/см соответственно.

Вид этой зависимости $S(x)$ должен соответствовать функции (6.37). Далее определяются значения констант, входящих в эту формулу, – C , a и k_n . Первые две константы определяются из вида полученной зависимости: C – значение асимптоты, к которой стремится величина S ; a – координата середины перехода от первого цвета ко второму.

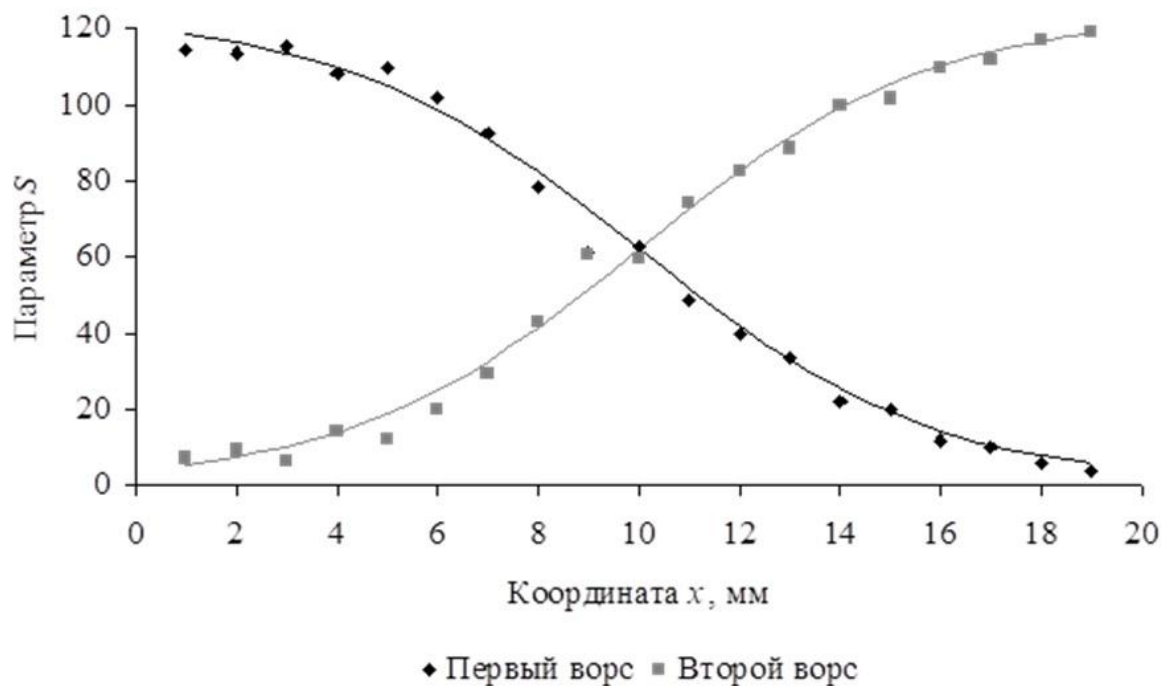


Рис. 6.18. График перехода цвета на образце ($E = 4$ кВ/см)

Коэффициент k_n , в сущности, определяет скорость изменения цвета, т. е. контрастность. Этот коэффициент определяется на основе всей серии измерений путем преобразования выражения (6.37) к линейному виду относительно x , причем в качестве функции $f(x)$ используется величина $S(x)$:

$$\ln \left[\frac{C}{S(x_i)} - 1 \right] = -k_n (x_i - a). \quad (6.40)$$

По полученной зависимости $S(x)$ определяется значение коэффициента k_n . Для этого следует учесть только значения S между координатами, соответствующими серединам полос. Пример такой прямой, полученной на основе данных рис. 6.18, представлен на рис. 6.20.

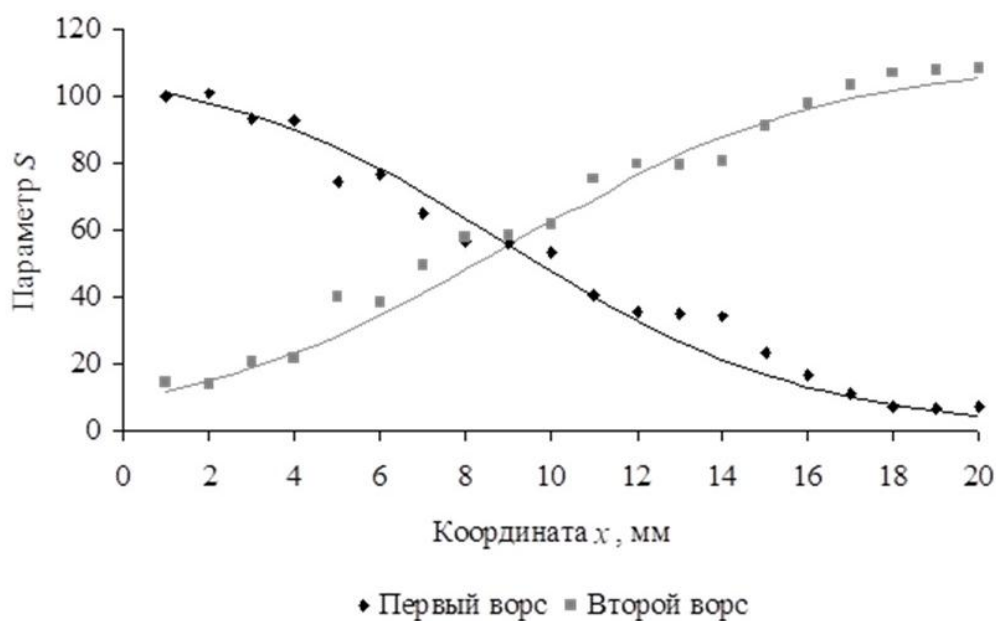


Рис. 6.19. График перехода цвета на образце ($E = 2$ кВ/см)

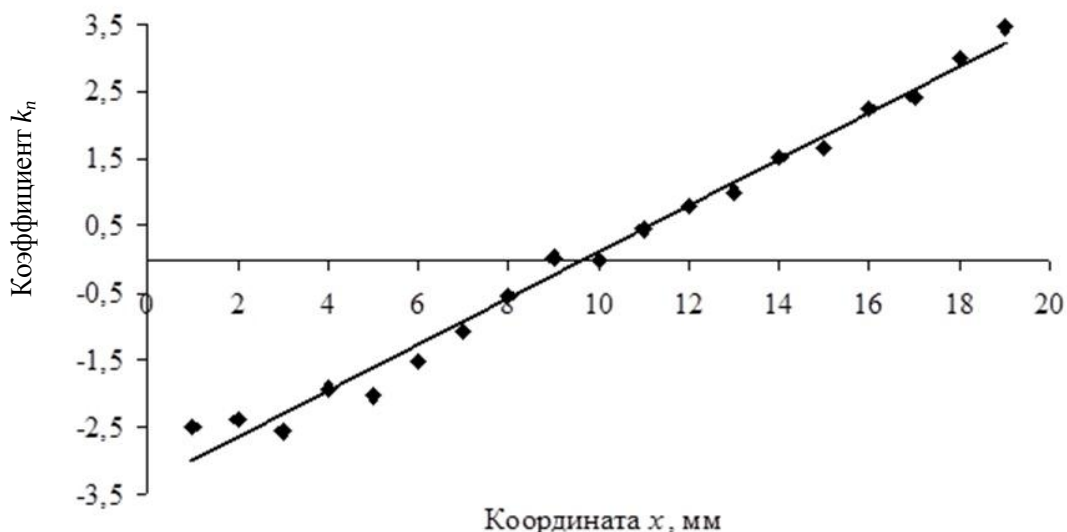


Рис. 6.20. Определение коэффициента k_n

После того как определено значение коэффициента k_n , строят кривые перехода цветов – непрерывные кривые на рис. 6.18, 6.19. На их основании вычисляют ширину зоны перехода цвета. Для этого принимается условие, что ширина этой зоны Δx определяется между значениями функции $S(x)$, равными $0,2C$ и $0,8C$. Эту ширину можно определить как из графика (рис. 6.20), так и расчетным путем

$$\Delta x = \frac{4 \ln 2}{k_n}. \quad (6.41)$$

Соответственно, чем больше ширина цветового перехода, тем меньше четкость ворсового рисунка, и наоборот. Полученная в ходе исследований количественная характеристика позволяет объективно и достаточно точно оценивать скорость перехода цвета ворсовой поверхности, а также дает возможность связать данный параметр с условиями нанесения и свойствами ворса.

6.5.5. Оценка влияния напряженности электрического поля и свойств ворса на размер зоны цветового перехода

Предложенная методика анализа перехода цветов, по-видимому, может иметь достаточно широкую сферу применения и не только в области электрофлорирования, однако наибольший интерес она представляет именно для этой области.

В рамках разработанной технологии очень важно оценить влияние на ширину зоны цветового перехода условий нанесения и, в первую очередь, напряженности электрического поля и свойств наносимого ворса. Были выбраны два варианта напряженности поля для нанесения первого ворса – 2 и 4 кВ/см (второй ворс во всех сериях опытов наносился с помощью ручного флокатора в течение 15 с при напряжении 60 кВ). В *табл. 6.11* представлены экспериментальные результаты, полученные для четырех ворсов разной длины (1 и 0,5 мм) и разного качества. Качество определяли по методике измерения «прыгучести» ворса (разд. 2.3), величина которой указана в *табл. 6.11*. «Прыгучесть» измеряется промежутком времени t , необходимым для разлета ворса: чем больше это время, тем ниже качество ворса. Нанесение ворса осуществляли в разной последовательности и при различной напряженности поля.

Т а б л и ц а 6.11. Анализ зоны цветового перехода

Параметры 1 ворса	Напряженность поля при нанесении 1 ворса, кВ/см	
	4	2
Ворс высокого качества ($t = 14$ с), длина 1 мм	$k_n = 0,49$ $\Delta x = 5,6$ мм	$k_n = 0,42$ $\Delta x = 6,6$ мм
Ворс низкого качества ($t = 28$ с), длина 1 мм	$k_n = 0,43$ $\Delta x = 6,4$ мм	$k_n = 0,38$ $\Delta x = 7,3$ мм
Ворс высокого качества ($t = 12$ с), длина 0,5 мм	$k_n = 0,72$ $\Delta x = 3,8$ мм	$k_n = 0,60$ $\Delta x = 4,6$ мм
Ворс низкого качества ($t = 26$ с), длина 0,5 мм	$k_n = 0,60$ $\Delta x = 4,6$ мм	$k_n = 0,44$ $\Delta x = 6,3$ мм

Все приведенные результаты свидетельствуют о вполне предсказуемом характере влияния основных параметров: с возрастанием степени ориентации ворса (вследствие увеличения напряженности или при повышении качества ворса) ширина зоны цветового перехода уменьшается, что означает большую четкость рисунка; нанесение первым более короткого ворса, при прочих равных условиях, также ведет к возрастанию контрастности рисунка.

Таким образом, на основе созданной модели ориентации ворса на флокированных материалах и модели процесса проникновения ворсов при их последовательном нанесении удалось создать методику компьютерного анализа зоны цветовых переходов. Разработанный метод подтвержден многократными исследованиями флокированных образцов, полученных при различных условиях нанесения и с различным ворсом. Всё это позволяет считать, что найден четкий и объективный критерий оценки контрастности ворсового узора.

7. ОРИЕНТАЦИЯ ВОРСА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ДВИЖЕНИЯ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДАМИ

В разд. 6 было показано, что ориентация ворса на поверхности флокированного материала связана с плотностью ворсового покрытия и влияет на производительность технологического процесса. В свою очередь, окончательная ориентация ворса $\sigma_{\max}$, связанная с максимальной поверхностной плотностью ворсового покрытия $n_{\max}$, зависит от ориентации ворса σ_0 в начальный момент времени. Эта начальная ориентация на поверхности материала должна определяться ориентацией ворса перед его внедрением в клеевой слой. Следовательно, для изучения факторов, определяющих ориентацию ворса в начальный момент формирования ворсового покрытия, необходимо проанализировать процесс ориентации ворса в процессе его движения между электродами флокатора.

Экспериментальная методика оценки начальной ориентации σ_0 рассмотрена ранее в разд. 6 и предложена ее численная оценка. Необходимо определить, какие факторы влияют на ориентацию ворса в процессе его движения между электродами и как выбирать условия, обеспечивающие наилучшую ориентацию.

Ориентацию заряженного ворса при его 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 при отклонении ее оси от направления вектора напряженности электрического поля. Этот момент можно считать постоянным для одинакового угла отклонения, поскольку заряд ворсинки, его распределение вдоль ворсинки и напряженность электрического поля в процессе движения существенно не меняются. Второй момент – это момент силы аэродинамического сопротивления $\vec{M}_2$. При движении ворсинки между электродами под действием электрического поля ее скорость растет. Это ведет к увеличению силы аэродинамического сопротивления. Следовательно, даже небольшое отклонение оси ворсинки от вектора скорости может создавать значительный момент силы аэродинамического сопротивления $\vec{M}_2$, разворачивающий ее перпендикулярно к вектору скорости. При этом будет происходить быстрое снижение скорости ворсинки. После этого процесс набора скорости и ориентация вдоль силовых линий начинается сначала. Это, конечно, не означает, что все ворсинки, достигшие определенной скорости, теряют ориентацию, но это возможно для значительной доли ворсинок. Дело в том, что подобные воздействия, нарушающие ориентацию, весьма вероятны. Плотность ворсинок в потоке весьма велика, причем существует как прямой поток (к материалу), так и встречный поток ворса с противоположным зарядом. Пролет таких ворсинок на малом расстоянии друг от друга может нарушить их ориентацию. Потеря ориентации даже у одной ворсинки может привести к потере ориентации у ворсинок, движущихся рядом. Поэтому речь идет о том, что с ростом скорости значительно повышается вероятность потери ориентации ворса. При малой скорости такая потеря не страшна: момент электростатических сил $\vec{M}_1$ будет сразу восстанавливать ее. Но при высокой скорости его

может оказаться недостаточно. Таким образом, в данном разделе сделана попытка оценить оба момента $\vec{M}_1$ и $\vec{M}_2$, которые действуют на ворсинку в процессе движения в электрическом поле, и рассмотреть их влияние на ориентацию потока ворса перед его внедрением в клеевой слой.

7.1. Оценка момента силы электростатического взаимодействия в процессе движения ворса между электродами

На *рис. 7.1* показаны силы, действующие на заряженную ворсинку, движущуюся в однородном электрическом поле с напряженностью $\vec{E}$. При этом для простоты рассмотрения возьмем биполярно заряженную ворсинку (на концах ворсинки сосредоточены уравновешенные заряды $+q$ и $-q$, расстояние между которыми равно длине ворсинки l) [1], [7], [10].

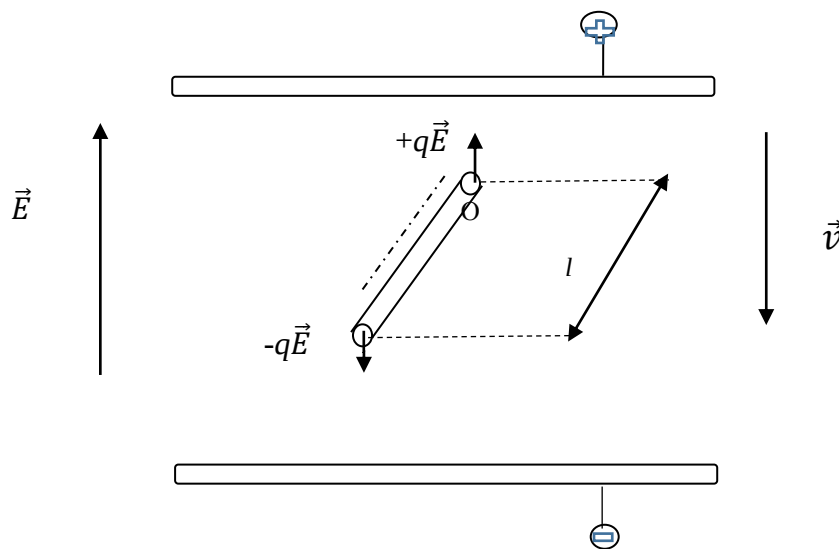


Рис. 7.1. Силы, действующие на биполярно заряженную ворсинку, в однородном электрическом поле с напряженностью $\vec{E}$

На заряды действует электростатическая сила $\vec{F} = q\vec{E}$. Момент этой силы (момент силы электростатического взаимодействия $\vec{M}_1$) действует на ворсинку в электрическом поле при отклонении ее оси от вектора напряженности и стремится ориентировать ее в направлении вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$. Момент силы $\vec{M}_1$ определяется векторным произведением радиус-вектора $\vec{r}$, проведенного из точки O (центр масс волокна) в точку A приложения силы, на силу $\vec{F}$:

$$\vec{M}_1 = [\vec{r} \times \vec{F}]. \quad (7.1)$$

Модуль момента силы для варианта, изображенного на *рис. 7.1*, равен

$$M_1 = Fr \sin \alpha = 2F \frac{l}{2} \sin \alpha = qEl \sin \alpha, \quad (7.2)$$

где F — модуль силы, приложенной в точке A ; r — модуль радиус-вектора, проведенный из точки O (центр волокна) в точку A приложения силы; $\sin \alpha$ — угол

между векторами $\vec{r}$ и $\vec{F}$; q – заряд волокна, Кл; E – напряженность электрического поля, В/м.

В выражении (7.2) модуль радиус-вектора r равен половине длины волокна l : $r = \frac{l}{2}$. Также учтено, что на волокно действуют 2 момента M_1 как со стороны положительно заряда $+q$, так и со стороны отрицательного заряда $-q$.

Если учесть, что заряд волокна связан с напряженностью $q = k E$, а коэффициент зарядки k можно записать, как долю β ($0 \leq \beta \leq 1$) от максимального коэффициента зарядки $k_{\max}$ (табл. 4.3), то выражение для заряда можно записать в виде $q = \beta k_{\max} E$.

Момент силы (7.2) можно записать в виде

$$M_1 = \beta k_{\max} E^2 l \sin \alpha = \beta q_{\max} E l \sin \alpha.$$

В реальности, как было показано в разд. 4, заряд распределен по длине волокна с линейной плотностью, которую можно приближенно записать в следующем виде:

$$\gamma(x) = E(ax^3 + bx). \quad (7.3)$$

Здесь выражение в скобках должно иметь размерность Φ (фарада).

Тогда выражение для электростатического момента (7.2) примет вид

$$M_1 = \beta E^2 \sin \alpha \int_0^l (ax^3 + bx) x dx = \beta E^2 \sin \alpha l^3 \left(\frac{al^2}{5} + \frac{b}{3} \right), \quad (7.4)$$

где l – длина ворса, м; a, b – коэффициенты полинома, описывающего распределение плотности заряда и зависящие от диаметра и длины ворсинки; E – напряженность электрического поля, В/м; β – доля от максимального коэффициента зарядки $k_{\max}$, определяющая реальную величину заряда в интервале от 0 до $q_{\max}$; α – угол между осью ворсинки и направлением вектора напряженности.

Поскольку значения параметров a и b зависят от длины ворсинки, то соотношение (7.4) обобщенно можно записать в следующем виде:

$$M_1 = C(l) \beta E^2 \sin \alpha. \quad (7.5)$$

В табл. 7.1 представлены численные значения параметров a и b , а также коэффициента $C(l)$ для ворса с разными геометрическими размерами.

Как видно из таблицы, например, для ворса длиной 0,5 мм и диаметром $d = 20$ мкм формула для момента M_1 будет выглядеть следующим образом:

$$M_1 = 8,13 \cdot 10^{-22} \beta E^2 \sin \alpha.$$

Зависимость $C(l)$ можно приближенно описать полиномом второй степени. Так, для ворса диаметром $d = 20$ мкм, линейной плотностью $T = 0,33$ текс, электростатический момент M_1 можно определить по формуле

$$M_1 = (1,19 \cdot 10^{-14} l^2 - 8,82 \cdot 10^{-18} l + 2,27 \cdot 10^{-21}) \beta E^2 \sin \alpha. \quad (7.6)$$

Для ворса с другими параметрами, например, диаметром $d = 50$ мкм и линейной плотностью $T = 2,2$ текс электростатический момент M_1 будет равен

$$M_1 = (2,25 \cdot 10^{-14} l^2 - 2,64 \cdot 10^{-17} l + 5,54 \cdot 10^{-21}) \beta E^2 \sin \alpha. \quad (7.7)$$

Как мы видим, этот момент линейно зависит от величины заряда ворса (β) и квадратично от напряженности электрического поля. На рис. 7.2 представлены за-

висимости от величины заряда при разной напряженности. Численные значения моментов рассчитаны при отклонении оси ворсинки на 3^0 .

Т а б л и ц а 7.1. **Выражения для определения электростатического момента M_1**

Характеристика ворса	Параметр a	Параметр b	Коэффициент $C(l)$
1	2	3	4
$l = 0,5 \text{ мм}; d = 13,4 \text{ мкм};$ $T = 0,17 \text{ текс}$	$4,35 \cdot 10^{-5}$	$1,07 \cdot 10^{-11}$	$7,0 \cdot 10^{-22}$
$l = 0,5 \text{ мм}; d = 20 \text{ мкм};$ $T = 0,33 \text{ текс}$	$5,79 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$8,13 \cdot 10^{-22}$
$l = 1,0 \text{ мм}; d = 20 \text{ мкм};$ $T = 0,33 \text{ текс}$	$9,02 \cdot 10^{-6}$	$1,03 \cdot 10^{-11}$	$5,2 \cdot 10^{-21}$
$l = 1,5 \text{ мм}; d = 20 \text{ мкм};$ $T = 0,33 \text{ текс}$	$3,57 \cdot 10^{-6}$	$0,94 \cdot 10^{-11}$	$15,7 \cdot 10^{-21}$
$l = 1,5 \text{ мм}; d = 27 \text{ мкм};$ $T = 0,67 \text{ текс}$	$4,28 \cdot 10^{-6}$	$0,965 \cdot 10^{-11}$	$17,3 \cdot 10^{-21}$
$l = 2,0 \text{ мм}; d = 50 \text{ мкм};$ $T = 2,2 \text{ текс}$	$2,12 \cdot 10^{-6}$	$1,09 \cdot 10^{-11}$	$42,2 \cdot 10^{-21}$
$l = 2,5 \text{ мм}; d = 50 \text{ мкм};$ $T = 2,2 \text{ текс}$	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$0,974 \cdot 10^{-11}$	$79,3 \cdot 10^{-21}$
$l = 3,0 \text{ мм}; d = 50 \text{ мкм};$ $T = 2,2 \text{ текс}$	$0,74 \cdot 10^{-6}$	$1,03 \cdot 10^{-11}$	$128,0 \cdot 10^{-21}$

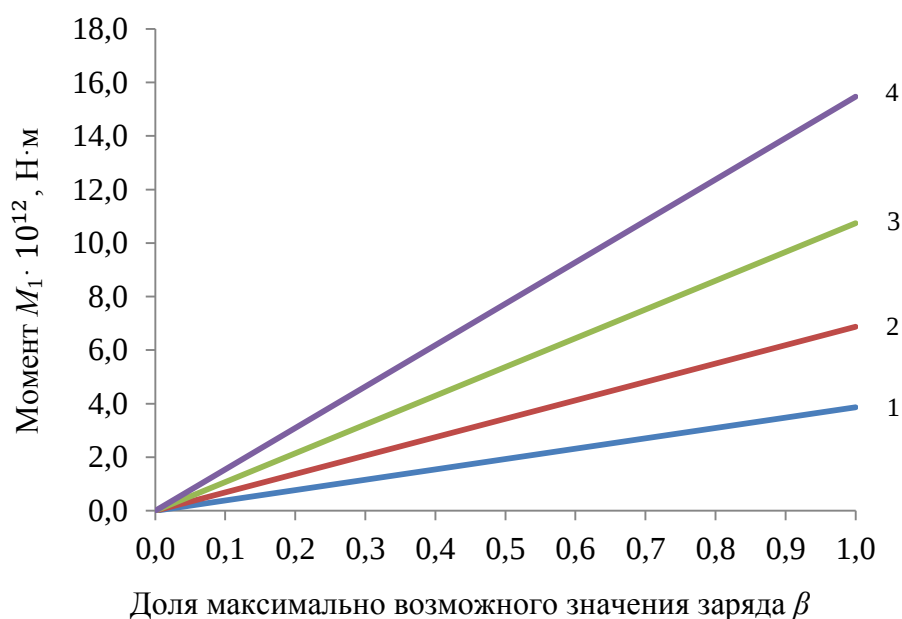


Рис. 7.2. Влияние доли максимального заряда ворса на момент электростатического взаимодействия:

1 – $E = 3 \text{ кВ/см}$; 2 – $E = 4 \text{ кВ/см}$; 3 – $E = 5 \text{ кВ/см}$; 4 – $E = 6 \text{ кВ/см}$

7.2. Оценка момента силы аэродинамического сопротивления в процессе движения ворса между электродами

Помимо силы электростатического взаимодействия $\vec{F}$ (рис. 7.1) на волокно действует вес и сила аэродинамического сопротивления $\vec{F}_c$. Это весьма непростая задача, но упрощает ее то, что мы хотим только приближенно сравнить моменты этих сил при малом отклонении оси ворсинки от направления вектора скорости и напряженности, которые в нашем случае совпадают.

В монографии [9] была сделана попытка проанализировать влияние аэродинамического сопротивления на ориентацию волокон в электрическом поле. Волокно представлялось в виде диполя с зарядами, расположенными на концах волокна. Уравнение для колебания волокна решали при небольших скоростях его поступательного движения, когда эффектом «парусности» можно пренебречь. Полученное решение в этих приближениях имеет вид затухающих колебаний, что представляется вполне обоснованным. В то же время сделанные серьезные допущения, привели к тому, что «существенным недостатком модели ... остается ... слишком быстрое уменьшение амплитудного значения угла ориентации практически до нуля, чего не наблюдается на практике» [9].

Таким образом, можно констатировать, что достоверной теоретической модели, описывающей движение цилиндрической частицы, имеющей отклонение оси частицы от направления скорости ее движения, не существует.

Воспользуемся для приближенной оценки силы аэродинамического сопротивления движению волокна эмпирическим соотношением (1.2). Величина этой силы соответствует движению ворсинки, когда ее ось совпадает с направлением вектора скорости. Очевидно, что при отклонении оси от вектора скорости аэродинамическое сопротивление резко возрастает и стремится развернуть ворсинку перпендикулярно направлению движения. Для оценки момента при отклонении оси от вектора скорости будем считать, что сила сопротивления возрастает пропорционально увеличению площади ворсинки, перпендикулярной вектору скорости, и распределена равномерно вдоль ворсинки.

В соответствии со сказанным выше для оценки момента аэродинамического сопротивления $\vec{M}_2$ необходимо учитывать коэффициент δ , показывающий отношение площади проекции ворсинки, находящейся под углом α к направлению вектора скорости, к площади сечения ворсинки. Этот коэффициент учитывает возрастание момента силы аэродинамического сопротивления $\vec{M}_2$ при отклонении оси ворсинки от направления вектора скорости на угол α [53]:

$$\delta = \frac{l d \sin \alpha + \frac{\pi d^2}{4} \cos \alpha}{\pi d^2 / 4}. \quad (7.8)$$

Тогда модуль момента силы аэродинамического сопротивления можно оценить как

$$M_2 = F_c \sin \alpha \frac{l}{2} \delta, \quad (7.9)$$

где F_c – сила аэродинамического сопротивления, Н (1.2); l – длина волокна, м; v – скорость движения ворсинки, м/с; α – угол между осью ворсинки и направлением вектора скорости; δ – коэффициент (7.8).

Аэродинамический момент зависит от скорости движения ворсинки. Для определения скорости необходимо учитывать, что она в свою очередь зависит от целого ряда факторов, включая заряд ворсинки и напряженность электростатического поля E . Величину скорости можно оценить, например, из соотношения, полученного в разд. 5, с учетом выражения для напряженности около заряжающего электрода E_0 (5.18):

$$v(x) = \left(\sqrt{\frac{2qE}{m}} - \frac{c\sqrt{h}}{m} \right) \sqrt{x}, \quad (7.10)$$

где m – масса ворсинки, кг; q – заряд ворса, Кл; C – коэффициент для силы аэродинамического сопротивления (1.2), равный $C = 1,11l(d - 9,3 \cdot 10^{-6})$; h – расстояние между электродами, м; x – координата ворсинки, м.

Это соотношение позволяет вполне адекватно оценить скорость во всем диапазоне зарядов и напряженностей электрического поля.

Теперь, воспользовавшись выражением (7.9), оценим величину аэродинамического момента M_2 в процессе движения ворсинки между электродами при случайном отклонении ее оси на угол $\alpha = 3^\circ$ для разного значения заряда (β – доля от максимального заряда ворса) и напряженности $E = 4$ кВ/см. Полученные результаты представлены в виде кривых на рис. 7.3.

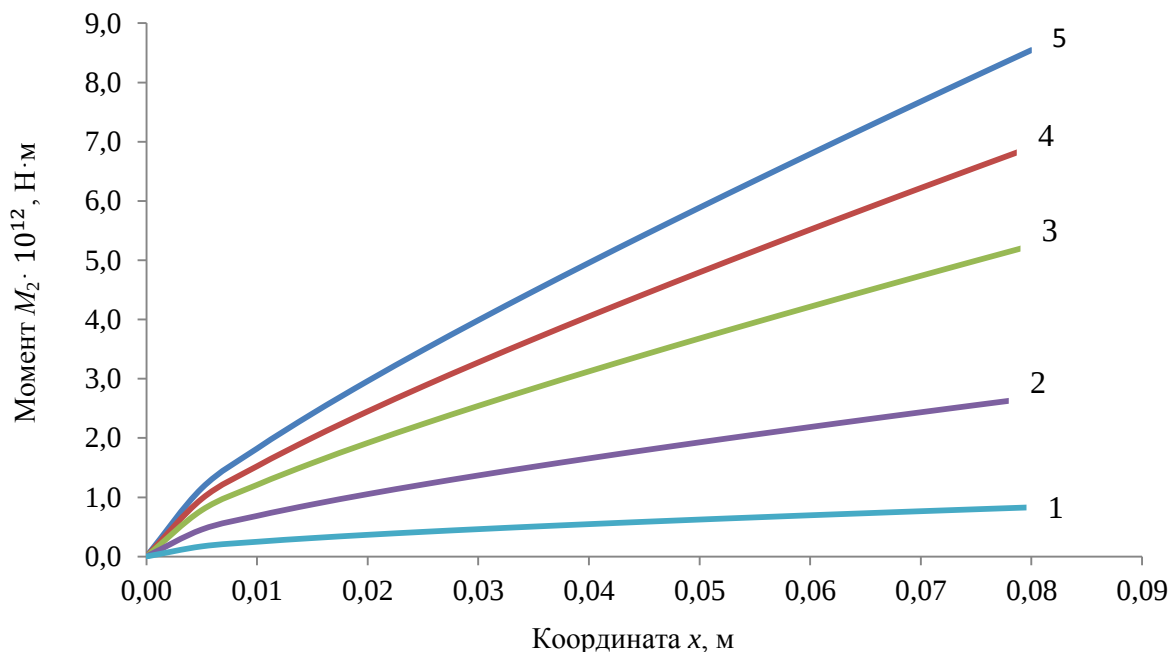


Рис. 7.3. Зависимость момента M_2 от координаты ворсинки:
1 – $\beta = 0,1$; 2 – $\beta = 0,3$; 3 – $\beta = 0,6$; 4 – $\beta = 0,8$; 5 – $\beta = 1$

Таким образом, в процессе движения ворсинки между электродами ее скорость может достигать величины, когда даже малое отклонение оси ворсин-

ки (например, $\alpha = 3^\circ$) приводит к тому, что момент M_2 становится больше M_1 . При этом ее ориентация становится неустойчивой. Это означает, что при случайном малом отклонении оси ворсинки момент $\vec{M}_1$ уже не может вернуть ворсинку к исходной ориентации. Тогда она быстро теряет ориентацию и скорость, и процесс ориентации и ускорения должен начинаться сначала.

7.3. Оценка критического угла потери ориентации ворсинки при движении между электродами

В разд. 7.1 и 7.2 были рассмотрены два основных фактора, влияющие на ориентацию ворса в процессе его движения между электродами. Это момент силы электростатического взаимодействия $\vec{M}_1$ и момент силы аэродинамического сопротивления $\vec{M}_2$. В процессе движения ворсинки между электродами, пока скорость ее мала, ориентация улучшается, и если даже ось ворсинки по какой-либо причине отклонилась от вектора напряженности на некоторый угол α , то под действием момента электростатической силы она вновь восстановится. Т. е. пока момент электростатического взаимодействия M_1 , преобладает над аэродинамическим моментом M_2 (при одинаковом угле отклонения α), ориентация быстро восстанавливается. С ростом скорости ворсинка вступает в стадию неустойчивой ориентации и при случайном отклонении ее оси на тот же угол α начинает преобладать момент M_2 и ориентация будет нарушена. Таким образом, условия потери ориентации связаны со скоростью движения ворсинки и с критическим углом отклонения α . Критический угол – это угол, при котором момент электростатического взаимодействия уже не может вернуть ворсинке ее ориентацию, когда ось ворсинки параллельна вектору скорости. Это сопровождается значительной потерей скорости ворсинки. При отклонении на угол, меньший чем критический, ориентация ворсинки быстро восстанавливается. Этот угол α в зависимости от скорости движения ворсинки можно рассчитать исходя из условия $M_1 = M_2$.

Так как скорость зависит от условия флокирования (напряженность электростатического поля, межэлектродное расстояние) и свойств ворса (заряд, длина и диаметр ворса), то расчет критического угла α , в качестве примера, будем рассматривать для трех вариантов:

1. Напряженность электрического поля от 3 до 6 кВ/см при межэлектродном расстоянии $h = 8$ см, длине ворса $l = 0,5$ мм и постоянном значении коэффициента зарядки ($k_{\max} = \text{const}$).

2. Различные значения заряда q (коэффициенты зарядки: $0,4 \cdot k_{\max}$; $0,6 \cdot k_{\max}$; $0,8 \cdot k_{\max}$) при постоянной напряженности электрического поля, межэлектродном расстоянии $h = 8$ см, длине ворса $l = 0,5$ мм.

3. Разные значения длин ворса (0,5; 1; 2; 3 мм) при постоянной напряженности электростатического поля, межэлектродном расстоянии $h = 8$ см.

Расчеты были проведены с использованием выражения для оценки скорости ворсинки v (7.10) и выражений для определения моментов M_1 (7.4) и M_2 (7.9) с помощью опции «Поиск решения».

В табл. 7.2 представлены результаты расчета критического угла по варианту 1 (разная напряженность) для ворса длиной $l = 0,5$ мм, диаметром $d = 20$ мкм, линейной плотностью $T = 0,33$ текс, межэлектродном расстоянии $h = 8$ см.

Заряд ворса q принят равным $0,5 \cdot q_{\max}$ ($\beta = 0,5$). Коэффициент зарядки $k_{\max}$ учитывает длину ворса ($k_{\max} = 2,28 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В). Расчет проведен в зависимости от координаты ворсинки x .

Т а б л и ц а 7.2. Оценка критического угла α для разной напряженности

$x, \text{ м}$	$E = 3 \text{ кВ/см}$		$E = 4 \text{ кВ/см}$		$E = 5 \text{ кВ/см}$		$E = 6 \text{ кВ/см}$	
	$v(x), \text{ м/с}$	$\alpha, ^\circ$	$v(x), \text{ м/с}$	$\alpha, ^\circ$	$v(x), \text{ м/с}$	$\alpha, ^\circ$	$v(x), \text{ м/с}$	$\alpha, ^\circ$
0,01	2,51	12,5	3,68	14,0	4,86	15,5	6,04	16,9
0,02	3,54	7,47	5,21	8,2	6,87	8,88	8,53	9,48
0,03	4,34	5,33	6,38	5,76	8,42	6,17	10,45	6,52
0,04	5,02	4,10	7,37	4,37	9,72	4,64	12,07	4,87
0,05	5,61	3,27	8,24	3,45	10,87	3,64	13,49	3,80
0,055	5,88	2,95	8,64	3,10	11,39	3,26	14,15	3,40
0,06	6,14	2,67	9,02	2,80	11,9	2,93	14,78	3,05
0,065	6,39	2,43	9,39	2,53	12,39	2,64	15,39	2,75
0,07	6,64	2,22	9,75	2,30	12,86	2,39	15,97	2,48
0,08	7,09	1,86	10,42	1,91	13,74	1,98	17,07	2,04

Для наглядности величину критического угла удобно представить в виде графика от скорости ворсинки (рис. 7.4).

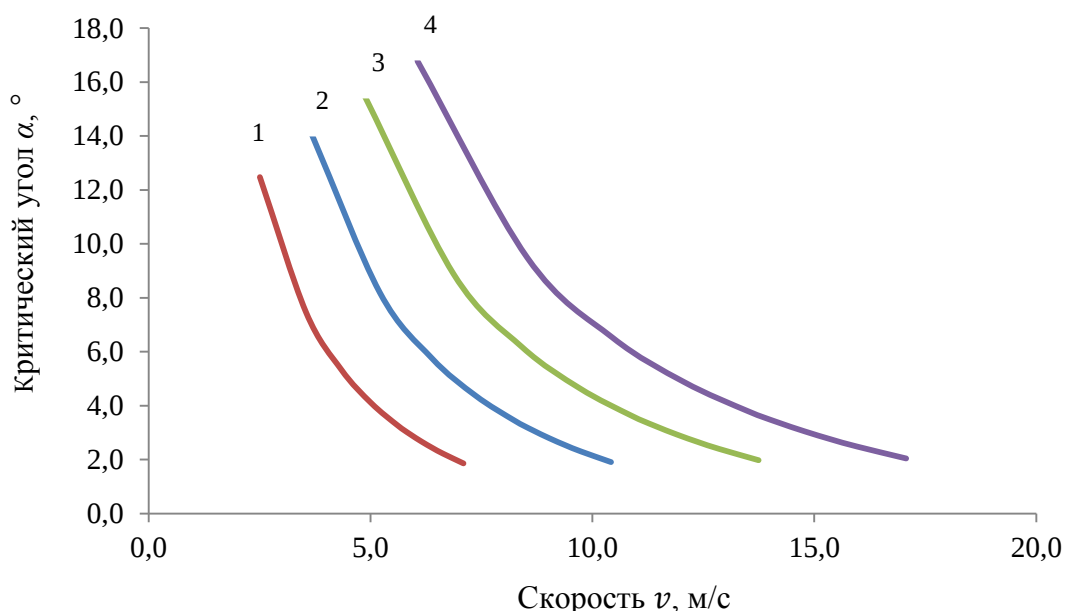


Рис. 7.4. Зависимость критического угла потери ориентации от скорости движения:

1 – $E = 3$ кВ/см; 2 – $E = 4$ кВ/см; 3 – $E = 5$ кВ/см; 4 – $E = 6$ кВ/см

Как мы видим, при малой скорости ворсинки потеря ее ориентации наблюдается только при значительном отклонении ее оси ($12,5^\circ - 16,9^\circ$). При мень-

ших углах отклонения ориентация будет быстро восстановлена. Зато при высоких скоростях ворсинки ориентация будет потеряна уже при отклонении оси всего на 2° .

Далее необходимо оценить влияние на критический угол величины заряда ворса. В *табл. 7.3* для ворса длиной $l = 0,5$ мм рассчитаны значения скорости v и соответствующие критические углы α при постоянной напряженности электростатического поля $E = 4$ кВ/см, межэлектродном расстоянии $h = 8$ см, но при разных значениях заряда q (коэффициент зарядки $k_{\max} = 2,28 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В). Расчет проведен в зависимости от координаты при движении ворсинки между электродами.

Т а б л и ц а 7.3. Оценка критического угла α

$x, \text{ м}$	$q = 3,65 \cdot 10^{-13} \text{ Кл}$ $k = 0,4 \cdot k_{\max}$		$q = 5,47 \cdot 10^{-13} \text{ Кл}$ $k = 0,6 \cdot k_{\max}$		$q = 7,3 \cdot 10^{-13} \text{ Кл}$ $k = 0,8 \cdot k_{\max}$	
	$v(x), \text{ м/с}$	$\alpha, ^\circ$	$v(x), \text{ м/с}$	$\alpha, ^\circ$	$v(x), \text{ м/с}$	$\alpha, ^\circ$
0,01	3,19	13,4	4,13	14,6	4,93	15,6
0,02	4,51	7,89	5,84	8,47	6,97	8,92
0,03	5,52	5,58	7,16	5,92	8,54	6,19
0,04	6,38	4,25	8,27	4,48	9,86	4,65
0,05	7,13	3,37	9,24	3,53	11,02	3,65
0,055	7,48	3,03	9,69	3,16	11,56	3,27
0,06	7,81	2,74	10,12	2,85	12,07	2,94
0,065	8,13	2,48	10,53	2,58	12,57	2,65
0,07	8,43	2,26	10,93	2,34	13,04	2,40
0,08	9,02	1,88	11,69	1,93	13,94	1,98

На основе данных *табл. 7.3* представлены графики для критического угла α от скорости движения ворсинки между электродами при разной величине заряда (*рис. 7.5*).

Проведенные расчеты критического угла потери ориентации от скорости движения демонстрируют ту же закономерность, как и в предыдущем случае: если скорость v ворса мала, то критический угол α достаточно велик (до 12° – 17°) и вероятность того, что ворсинка отклонится на больший угол небольшая. Однако уже на расстоянии от электрода $h \approx 6$ см, критический угол снижается приблизительно до $\alpha \approx 3^\circ$, и значительная часть ворсинок может легко терять ориентацию.

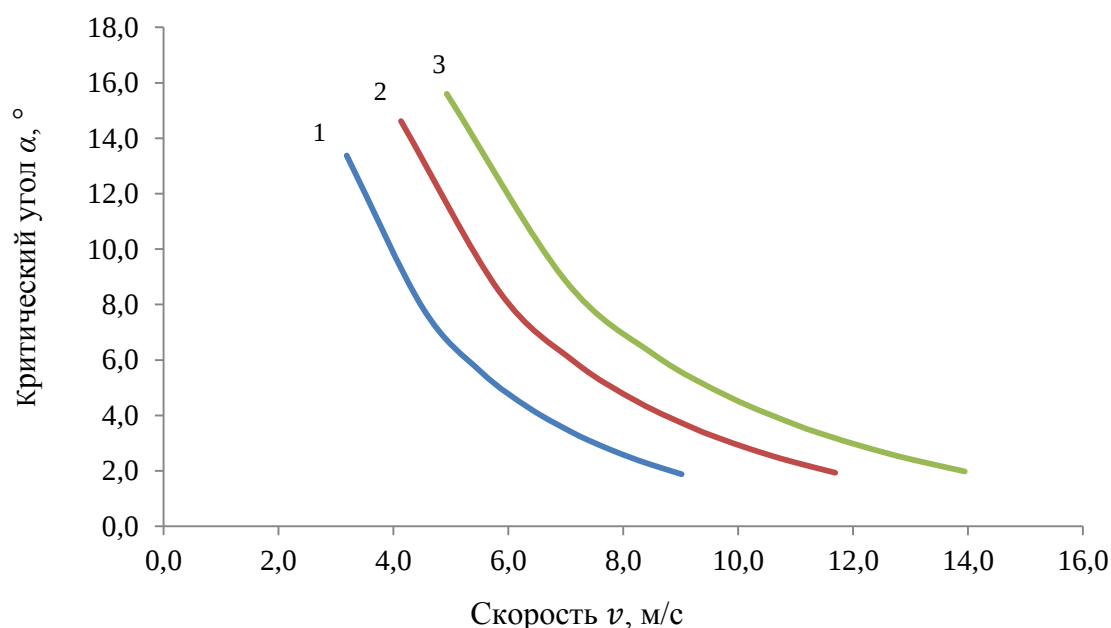


Рис. 7.5. Зависимость критического угла ориентации от скорости движения при постоянной напряженности:
 $1 - q = 3,65 \cdot 10^{-13}$ Кл; $2 - q = 5,47 \cdot 10^{-13}$ Кл; $3 - q = 7,3 \cdot 10^{-13}$ Кл

Теперь оценим величину критического угла α потери ориентации для ворса разной длины (l от 0,5 до 3 мм) в зависимости от скорости движения при напряженности $E = 4$ кВ/см и межэлектродном расстоянии $h = 8$ см. Результаты представлены в табл. 7.4.

Т а б л и ц а 7.4. Оценка критического угла α для ворса разной длины

x , м	$l = 0,5$ мм $d = 20$ мкм $k_{\max} = 2,28 \cdot 10^{-18}$		$l = 1,0$ мм $d = 20$ мкм $k_{\max} = 7,4 \cdot 10^{-18}$		$l = 1,5$ мм $d = 20$ мкм $k_{\max} = 1,5 \cdot 10^{-17}$		$l = 2,0$ мм $d = 50$ мкм $k_{\max} = 3,03 \cdot 10^{-17}$		$l = 3,0$ мм $d = 50$ мкм $k_{\max} = 6,05 \cdot 10^{-17}$	
	$v(x)$, м/с	α , °	$v(x)$, м/с	α , °	$v(x)$, м/с	α , °	$v(x)$, м/с	α , °	$v(x)$, м/с	α , °
0,01	3,68	14,0	4,97	7,60	5,97	5,33	2,74	11,03	3,25	8,08
0,02	5,21	8,20	7,03	4,37	8,44	3,03	3,87	6,78	4,59	4,91
0,03	6,38	5,76	8,61	3,04	10,3	2,08	4,74	4,9	5,63	3,56
0,04	7,37	4,37	9,94	2,28	11,9	1,55	5,47	3,85	6,49	2,78
0,05	8,24	3,45	11,1	1,79	13,3	1,21	6,12	3,14	7,26	2,27
0,055	8,64	3,10	11,7	1,60	13,9	1,08	6,42	2,86	7,62	2,07
0,06	9,02	2,80	12,2	1,43	14,6	0,97	6,70	2,63	7,96	1,90
0,065	9,39	2,53	12,7	1,29	15,2	0,87	6,97	2,43	8,28	1,75
0,07	9,75	2,30	13,2	1,17	15,8	0,78	7,24	2,25	8,59	1,62
0,08	10,4	1,91	14,1	0,96	16,9	0,64	7,74	1,93	9,19	1,40

Для наглядности результаты представлены в виде двух графиков (рис. 7.6 и 7.7), соответствующих разному диаметру ворса (20 и 50 мкм). Это связано со значительной разницей скоростей ворсинок.

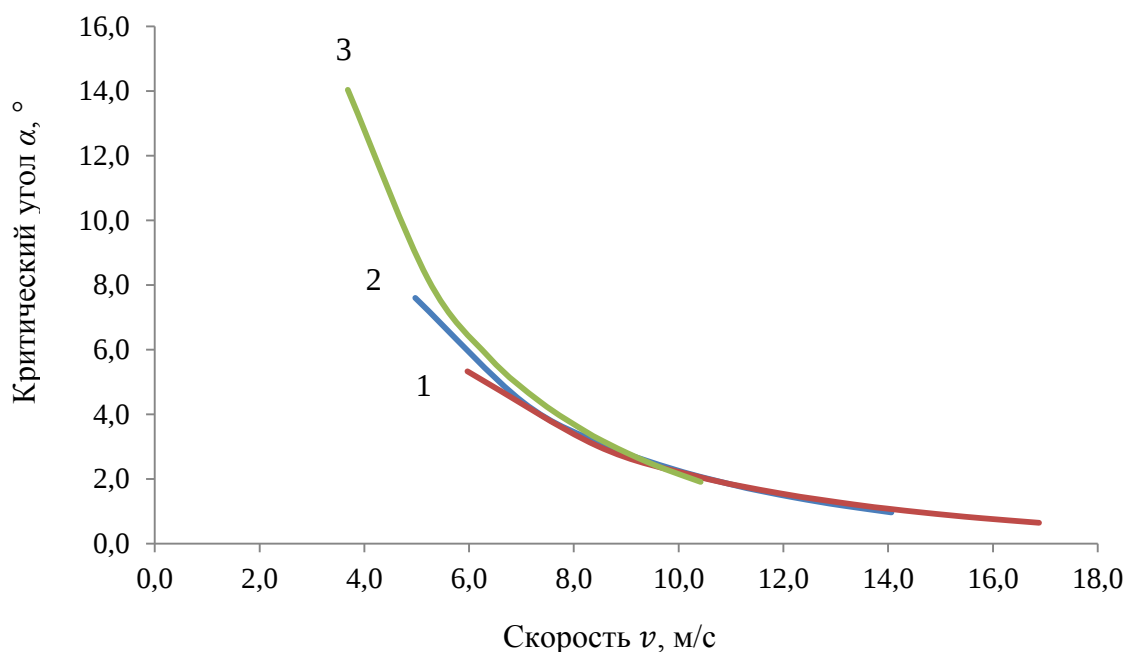


Рис. 7.6. Зависимость критического угла потери ориентации ворса разной длины от скорости движения ($d = 20$ мкм):
 $1 - l = 1,5$ мм; $2 - l = 1,0$ мм; $3 - l = 0,5$ мм

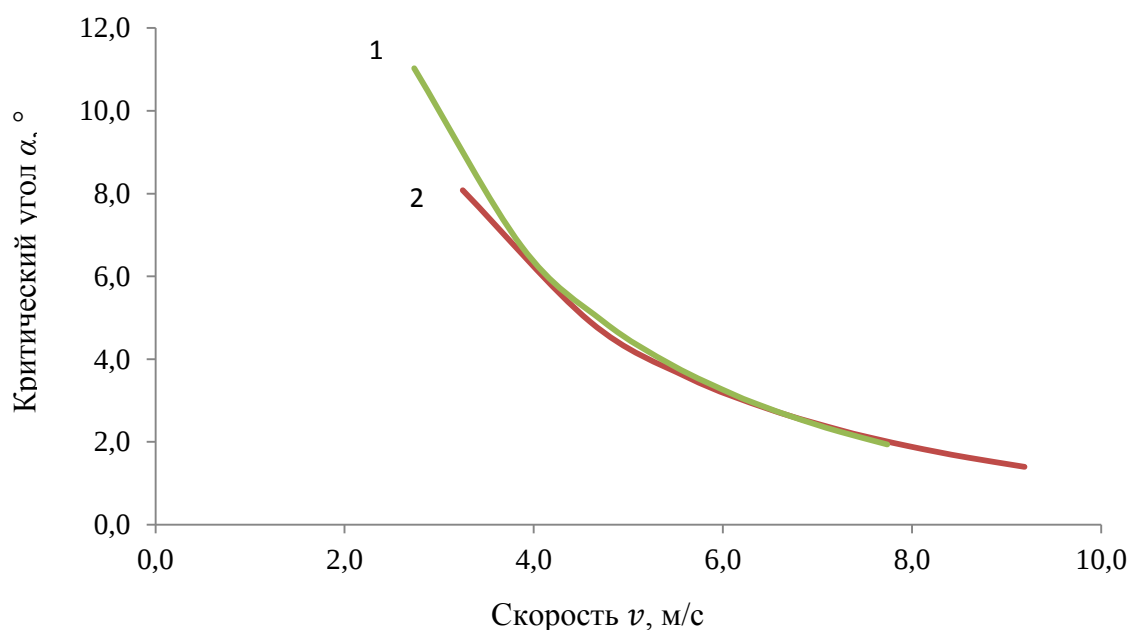


Рис. 7.7. Зависимость критического угла потери ориентации ворса разной длины от скорости движения ($d = 50$ мкм):
 $1 - l = 2,0$ мм; $2 - l = 3,0$ мм

У ворса длиной $l = 0,5$ мм критический угол α имеет большее значение (при меньших значениях угла ориентация восстанавливается, при больших – теряется необратимо), чем у ворса большей длины ($l = 1,0$ мм и $l = 1,5$ мм). Т. е. для потери ориентации короткой ворсинки при одинаковой скорости нужно ее отклонить на больший угол. Такая же тенденция наблюдается для ворса большей длины

($l = 2,0 - 3,0$ мм). Это может быть связано с тем, что сила аэродинамического сопротивления и момент M_2 быстро возрастают с увеличением скорости ворсинки.

7.4. Возникновение неустойчивого равновесия в процессе движения ворса между электродами

Условия возникновения неустойчивого равновесия ворсинок в процессе их движения рассмотрим исходя из соотношения моментов M_1 и M_2 в зависимости от расстояния, пройденного ворсинкой при ее движении между электродами. Изменение соотношения между моментами по мере роста скорости движения ворсинки покажет момент возникновения неустойчивой ориентации ворсинки. Для расчетов примем значение критического угла, когда ворсинка может потерять ориентацию, равным $\alpha \approx 2^\circ - 3^\circ$.

Расчет электростатического момента M_1 и аэродинамического момента M_2 проведен для ворса длиной $l = 0,5$ мм, диаметром $d = 20$ мкм, линейной плотностью $T = 0,33$ текс при напряженности $E = 4$ кВ/см и межэлектродном расстоянии $h = 0,08$ м. В табл. 7.5 представлены результаты для отклонения оси $\alpha = 2^\circ$. Величина максимального заряда $q_{\max} = 9,12 \cdot 10^{-13}$ Кл ($\beta = 1$). В табл. 7.6 аналогичные расчеты проведены для отклонения оси ворсинки $\alpha = 3^\circ$ при двух значениях напряженности.

Т а б л и ц а 7.5. Расчет соотношения моментов ($\alpha = 2^\circ$)

M_1 , Н·м	x , м	$v(x)$, м/с	F_c , Н	M_2 , Н·м	M_1/M_2
$4,58 \cdot 10^{-12}$	0,01	5,6	$5,2 \cdot 10^{-8}$	$9,62 \cdot 10^{-13}$	4,7
	0,02	7,9	$8,5 \cdot 10^{-8}$	$15,6 \cdot 10^{-13}$	2,9
	0,03	9,7	$11,4 \cdot 10^{-8}$	$21,1 \cdot 10^{-13}$	2,2
	0,04	11,2	$14,2 \cdot 10^{-8}$	$2,62 \cdot 10^{-12}$	1,8
	0,05	12,6	$16,9 \cdot 10^{-8}$	$3,11 \cdot 10^{-12}$	1,5
	0,055	13,2	$18,2 \cdot 10^{-8}$	$3,35 \cdot 10^{-12}$	1,4
	0,06	13,7	$19,5 \cdot 10^{-8}$	$3,59 \cdot 10^{-12}$	1,3
	0,065	14,3	$20,8 \cdot 10^{-8}$	$3,82 \cdot 10^{-12}$	1,2
	0,07	14,9	$22,0 \cdot 10^{-8}$	$4,05 \cdot 10^{-12}$	1,1
	0,08	15,9	$24,5 \cdot 10^{-8}$	$4,51 \cdot 10^{-12}$	1,0

Т а б л и ц а 7.6. Расчет соотношения моментов ($\alpha = 3^0$)

E , кВ/см	q , Кл $\beta = 1$	M_1 , Н·м	x , м	$v(x)$, м/с	F_c , Н	M_2 , Н·м	M_1/M_2
4	$9,12 \cdot 10^{-13}$	$6,87 \cdot 10^{-12}$	0,01	5,6	$5,2 \cdot 10^{-8}$	$1,82 \cdot 10^{-12}$	3,8
			0,02	7,9	$8,5 \cdot 10^{-8}$	$2,96 \cdot 10^{-12}$	2,3
			0,03	9,7	$11,4 \cdot 10^{-8}$	$3,99 \cdot 10^{-12}$	1,7
			0,04	11,2	$14,2 \cdot 10^{-8}$	$4,96 \cdot 10^{-12}$	1,4
			0,05	12,6	$16,9 \cdot 10^{-8}$	$5,89 \cdot 10^{-12}$	1,2
			0,055	13,2	$18,2 \cdot 10^{-8}$	$6,34 \cdot 10^{-12}$	1,1
			0,06	13,7	$19,5 \cdot 10^{-8}$	$6,79 \cdot 10^{-12}$	1,0
			0,065	14,3	$20,8 \cdot 10^{-8}$	$7,24 \cdot 10^{-12}$	0,95
			0,07	14,9	$22,0 \cdot 10^{-8}$	$7,68 \cdot 10^{-12}$	0,89
			0,08	15,9	$24,5 \cdot 10^{-8}$	$8,55 \cdot 10^{-12}$	0,8
5	$11,4 \cdot 10^{-13}$	$10,7 \cdot 10^{-12}$	0,01	7,29	$7,49 \cdot 10^{-8}$	$2,61 \cdot 10^{-12}$	4,09
			0,02	10,3	$12,4 \cdot 10^{-8}$	$4,34 \cdot 10^{-12}$	2,46
			0,03	12,6	$17,0 \cdot 10^{-8}$	$5,92 \cdot 10^{-12}$	1,81
			0,04	14,6	$21,3 \cdot 10^{-8}$	$7,42 \cdot 10^{-12}$	1,44
			0,05	16,3	$25,5 \cdot 10^{-8}$	$8,88 \cdot 10^{-12}$	1,2
			0,055	17,1	$27,5 \cdot 10^{-8}$	$9,59 \cdot 10^{-12}$	1,12
			0,06	17,9	$29,6 \cdot 10^{-8}$	$10,3 \cdot 10^{-12}$	1,03
			0,065	18,6	$31,6 \cdot 10^{-8}$	$11,0 \cdot 10^{-12}$	0,97
			0,07	19,3	$33,6 \cdot 10^{-8}$	$12,4 \cdot 10^{-12}$	0,91
			0,08	20,6	$37,5 \cdot 10^{-8}$	$13,1 \cdot 10^{-12}$	0,82

Расчеты, приведенные в табл. 7.5, показывают, что отклонение оси ворсинки, не превышающее 2^0 , не вызывает серьезной потери ориентации ворсинки на всем промежутке ее движения между электродами (преимущество имеет момент силы электростатического взаимодействия M_1). Однако уже при отклонении оси ворсинки на 3^0 (при напряженности 4 кВ/см) на расстоянии 6 см от электрода и при скорости 13,7 м/с начинает преобладать аэродинамический момент M_2 и ориентация ворсинки становится неустойчивой. Это можно наглядно представить в виде графиков: на первом (рис. 7.8) показано изменение моментов для одинакового ворса ($l = 0,5$ мм, $q_{\max} = 9,12 \cdot 10^{-13}$ Кл), но при разной напряженности поля, а на втором (рис. 7.10) показано изменение моментов в процессе движения для ворса, имеющего разный заряд ($q_1 = 9,12 \cdot 10^{-13}$ Кл, $q_2 = 5,47 \cdot 10^{-13}$ Кл) при одинаковой напряженности ($E = 4$ кВ/см).

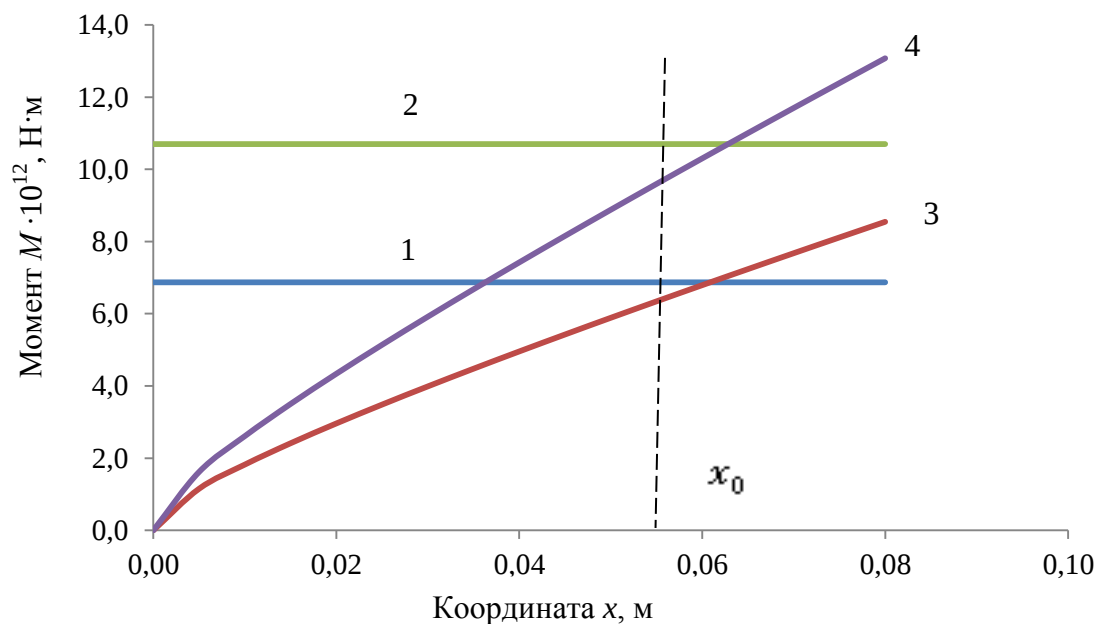


Рис. 7.8. Изменение моментов M_1 и M_2 от координаты ворсинки при ее движении между электродами:
 1 – M_1 при $E = 4$ кВ/см; 2 – M_1 при $E = 5$ кВ/см;
 3 – M_2 при $E = 4$ кВ/см; 4 – M_2 при $E = 5$ кВ/см

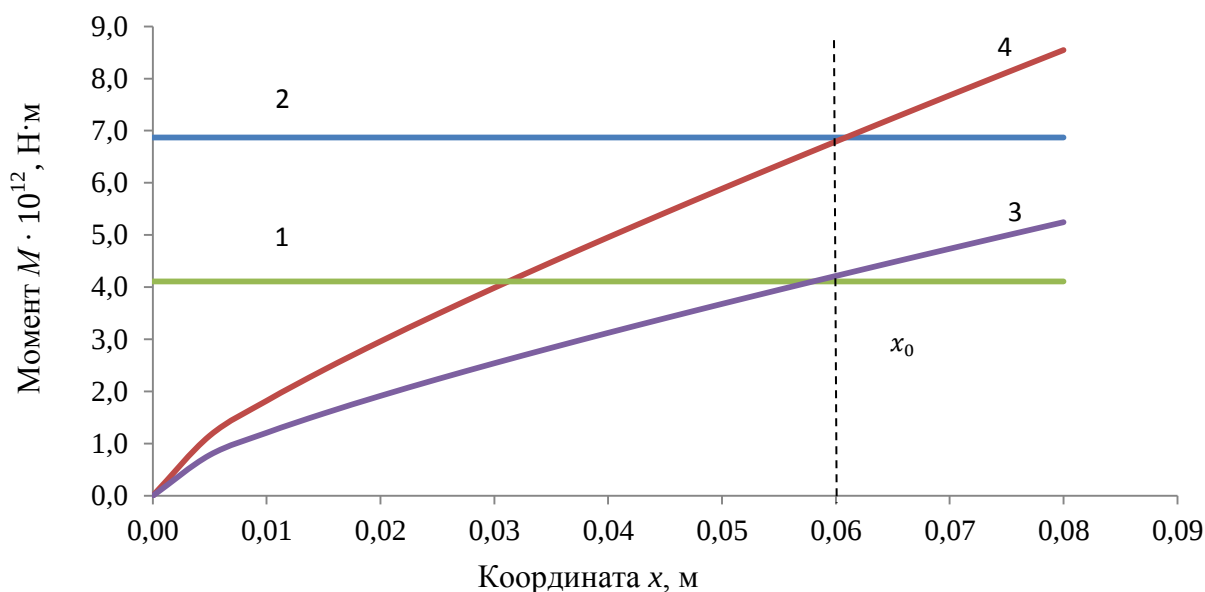


Рис. 7.9. Изменение моментов M_1 и M_2 от координаты ворсинки при ее движении между электродами:
 1 – M_1 при $q = 5,47 \cdot 10^{-13}$ Кл; 2 – M_1 при $q = 9,12 \cdot 10^{-13}$ Кл;
 3 – M_2 при $q = 5,47 \cdot 10^{-13}$ Кл; 4 – M_2 при $q = 9,12 \cdot 10^{-13}$ Кл

Из графиков видно, что пока скорость ворса мала, преимущество имеет момент силы электростатического взаимодействия M_1 (происходит улучшение ориентации ворсинки относительно вектора напряженности). При достижении некоторого значения скорости ворсинка попадает в область неустойчивой ориентации – точка x_0 ($M_1/M_2 = 1$). После этого момент силы аэродинамического

сопротивления M_2 уже при малом отклонении оси будет превышать момент силы электростатического взаимодействия M_1 . При отклонении оси ворсинки от направления вектора скорости на угол больше критического происходит резкое ухудшение ориентации и падение скорости.

Для взаимосвязи отношения моментов со скоростью на основе данных табл. 7.5 и 7.6 легко получить эмпирические степенные зависимости, которые удобно представить графически (рис. 7.10). Горизонтальная линия отмечает границу неустойчивой ориентации ворса. Ниже этой линии ворсинки вступают в зону неустойчивого равновесия по отношению к их ориентации.

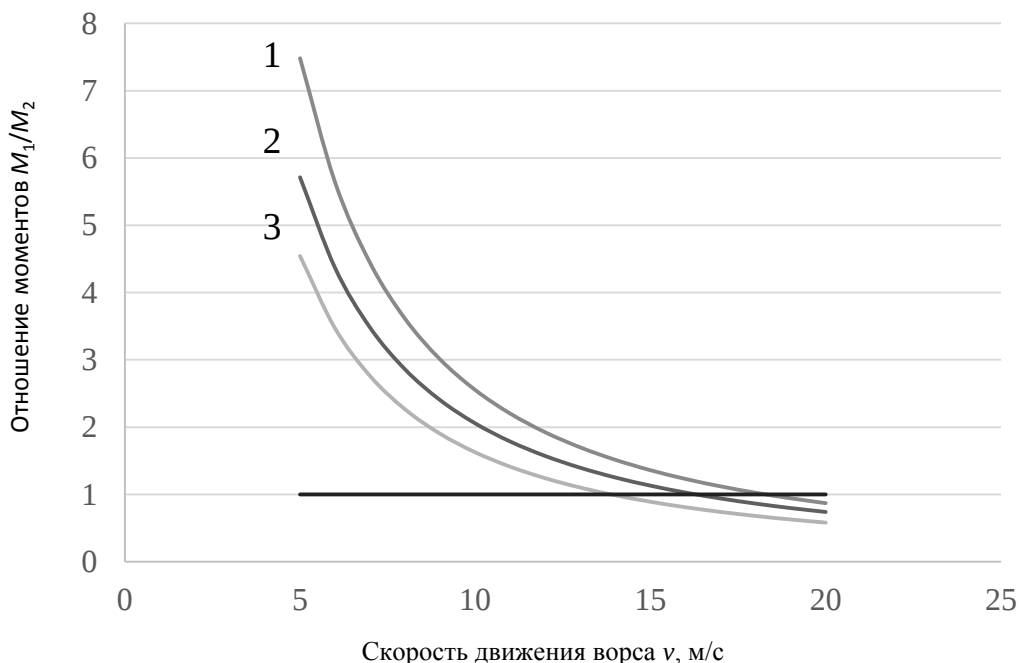


Рис. 7.10. Зависимость отношения моментов M_1/M_2 от скорости движения ворса:

1 – $\alpha = 2^\circ$, $E = 5$ кВ/см; 2 – $\alpha = 3^\circ$, $E = 4$ кВ/см; 3 – $\alpha = 2^\circ$, $E = 4$ кВ/см

Можно предположить, что наилучшая ориентация потока ворса в среднем будет наблюдаться, если координата x_0 совпадает с расстоянием между электродами, т. е. до возникновения неустойчивого равновесия. Интересно отметить, что координата x_0 , соответствующая равенству моментов, не зависит от напряженности и заряда ворса. В обоих случаях ее значение приблизительно равно $x \sim 0,06$ м.

7.5. Оценка координаты возникновения неустойчивого равновесия

Координату, при которой возникает неустойчивая ориентация ворсинок x_0 , можно оценить из условия равенства моментов $M_1 = M_2$, приравняв выражения (7.4) и (7.9):

$$\beta E^2 \sin \alpha l^3 \left(\frac{al^2}{5} + \frac{b}{3} \right) = 1,11l(d - 9,3 \cdot 10^{-6})(v + 0,1v^2) \sin \alpha \frac{l}{2} \delta. \quad (7.11)$$

Координата x_0 зависит от скорости, поэтому, зная выражение для скорости (7.10) из равенства (7.11), сначала определим v :

$$v + 0,1v^2 = \frac{\beta E^2 l \left(\frac{al^2}{5} + \frac{b}{3} \right)}{0,56\delta(d - 9,3 \cdot 10^{-6})}. \quad (7.12)$$

Правая часть уравнения не зависит от скорости, поэтому, заменив ее константой A , получим простое квадратное уравнение относительно скорости:

$$v + 0,1v^2 - A = 0. \quad (7.13)$$

Решение уравнения (7.13) будет иметь вид

$$v = -5 + \sqrt{25 + 10A}. \quad (7.14)$$

Таким образом, координата ворсинки x_0 при равенстве моментов M_1 и M_2 будет равна

$$x_0 = \frac{(-5 + \sqrt{25 + 10A})^2}{\left(\sqrt{\frac{2qE}{m}} - \frac{c\sqrt{h}}{m} \right)^2}. \quad (7.15)$$

В табл. 7.7 представлены значения координаты x_0 для разной длины ворса при равенстве моментов M_1 и M_2 . Расчет производился для ПА ворса длиной 0,5 и 1,0 мм диаметром $d = 20$ мкм, линейной плотности $T = 0,33$ текс; для ворса $l = 1,5$ мм диаметром $d = 27$ мкм, линейной плотности $T = 0,67$ текс, а также для ворса длиной 2,0 и 3,0 мм, диаметром $d = 50$ мкм, линейной плотности $T = 2,2$ текс. Межэлектродное расстояние выбрано $h = 0,08$ м, доля от максимального заряда ворса $\beta = 0,8$, при напряженности 3, 4, 5 и 6 кВ/см. Случайное отклонение оси ворсинки принимаем $\alpha = 3^0$.

Т а б л и ц а 7.7. Оценка координаты неустойчивого равновесия x_0

Линейная плотность T , текс	Длина l , мм	Напряженность E , кВ/см	Заряд q , Кл ($\beta = 0,8$)	$M_1 = M_2$, Н·м	Расстояние x_0 , см, при $M_1 = M_2$	$v(x_0)$, м/с
0,33	0,5	3	$5,48 \cdot 10^{-13}$	$3,06 \cdot 10^{-12}$	5,6	8,15
		4	$7,13 \cdot 10^{-13}$	$5,4 \cdot 10^{-12}$	5,9	12,0
		5	$9,12 \cdot 10^{-13}$	$8,5 \cdot 10^{-12}$	6,1	15,9
		6	$11,1 \cdot 10^{-13}$	$12,2 \cdot 10^{-12}$	6,3	19,8
	1,0	3	$1,74 \cdot 10^{-12}$	$19,6 \cdot 10^{-12}$	3,1	8,1
		4	$2,32 \cdot 10^{-12}$	$34,8 \cdot 10^{-12}$	3,3	11,8
		5	$2,9 \cdot 10^{-12}$	$54,4 \cdot 10^{-12}$	3,5	15,7
		6	$3,48 \cdot 10^{-12}$	$78,3 \cdot 10^{-12}$	3,7	19,6
0,67	1,5	3	$3,89 \cdot 10^{-12}$	$65,3 \cdot 10^{-12}$	3,1	7,1
		4	$5,19 \cdot 10^{-12}$	$116 \cdot 10^{-12}$	3,5	10,4
		5	$6,5 \cdot 10^{-12}$	$181 \cdot 10^{-12}$	3,7	13,9
		6	$7,78 \cdot 10^{-12}$	$261 \cdot 10^{-12}$	3,9	17,5
2,2	2	3	$7,26 \cdot 10^{-12}$	$159 \cdot 10^{-12}$	5,1	5,8
		4	$9,68 \cdot 10^{-12}$	$283 \cdot 10^{-12}$	5,8	8,7
		5	$12,1 \cdot 10^{-12}$	$442 \cdot 10^{-12}$	6,3	11,7
		6	$14,5 \cdot 10^{-12}$	$636 \cdot 10^{-12}$	6,7	14,8
	3	3	$14,5 \cdot 10^{-12}$	$483 \cdot 10^{-12}$	3,6	5,8
		4	$19,4 \cdot 10^{-12}$	$859 \cdot 10^{-12}$	4,1	8,7
		5	$24,2 \cdot 10^{-12}$	$134 \cdot 10^{-11}$	4,5	11,7
		6	$29,0 \cdot 10^{-12}$	$193 \cdot 10^{-11}$	4,8	14,7

7.6. Оценка оптимального расстояния между электродами для условий наилучшей ориентации

В разд. 7.4 сделана попытка оценить условия возникновения неустойчивой ориентации ворсинок в процессе движения между электродами и высказано предположение, что наилучшая ориентация будет наблюдаться, когда ворсинки достигают координаты $x \cong x_0$, в которой возникает равенство моментов M_1 и M_2 . Следовательно, можно предположить, что наилучшая ориентация ворса на поверхности материала реализуется, если координата внедрения ворсинки в клеевой слой (межэлектродное расстояние) совпадает с точкой наилучшей ориентации потока ворса ($x_0 = h$). В этом случае ворс не успеет войти в зону неустойчивой ориентации. Однако если мы просто изменим расстояние между электродами с 8 см (как было принято в разд. 7.4 и 7.5) на величину, указанную в табл. 7.7, то нужного результата не получим, поскольку одновременно изменится распределение объемного заряда между электродами.

Для решения задачи воспользуемся численным методом с использованием опции «Поиск решения» в программе *Excel*. В качестве критерия выбираем $(x_0 - h)^2 = \min$. При этом рассматриваем 2 варианта расчета:

1. При постоянной напряженности электростатического поля $E = \text{const}$ (3, 4, 5, 6 кВ/см), длине ворса $l = 0,5$ мм, при разных значениях заряда q (один режим флокирования, но ворс с разными электрофизическими свойствами – β).

2. При разной напряженности электростатического поля (от 3 до 6 кВ/см), длине ворса $l = 0,5$ мм и постоянном значении коэффициента зарядки ($k_{\max} = \text{const}$) (ворс с одинаковыми электрофизическими свойствами, но режимы флокирования разные).

В табл. 7.8 представлены рассчитанные значения расстояний h_0 (при условии $x_0 = h$) для четырех значений напряженности при различных значениях заряда (ворс с различным коэффициентом зарядки).

Т а б л и ц а 7.8. Оценка оптимального расстояния между электродами

β	$E = 3 \text{ кВ/см}$ $q_{\max} = 6,84 \cdot 10^{-13}$ Кл	$E = 4 \text{ кВ/см}$ $q_{\max} = 9,12 \cdot 10^{-13}$ Кл	$E = 5 \text{ кВ/см}$ $q_{\max} = 1,14 \cdot 10^{-12}$ Кл	$E = 6 \text{ кВ/см}$ $q_{\max} = 1,37 \cdot 10^{-12}$ Кл
	$x_0 = h, \text{ см}$	$x_0 = h, \text{ см}$	$x_0 = h, \text{ см}$	$x_0 = h, \text{ см}$
0,1	2,5	3,18	3,73	4,18
0,2	3,33	4,04	4,56	4,95
0,3	3,83	4,51	4,99	5,34
0,4	4,18	4,83	5,27	5,59
0,5	4,44	5,06	5,47	5,77
0,6	4,65	5,23	5,62	5,9
0,7	4,81	5,38	5,74	6,00
0,8	4,95	5,49	5,84	6,09
0,9	5,07	5,59	5,93	6,16
1	5,17	5,67	6,00	6,22

Скорость ворсинки в момент равенства моментов можно оценить из соотношения (7.12), из которого ясно, что влияние режима флокирования и электрофизических свойств ворса ограничивается параметром $\Upsilon = \beta E^2$.

Попробуем построить зависимость оптимального расстояния h_0 от указанного параметра для всего интервала изменения обоих входящих параметров. Диапазон изменения Υ будет от $\Upsilon_{\min} = 0,1 \cdot 3^2 = 0,9$ до $\Upsilon_{\max} = 1 \cdot 6^2 = 36$. Результаты представлены в виде графика на *рис. 7.11*.

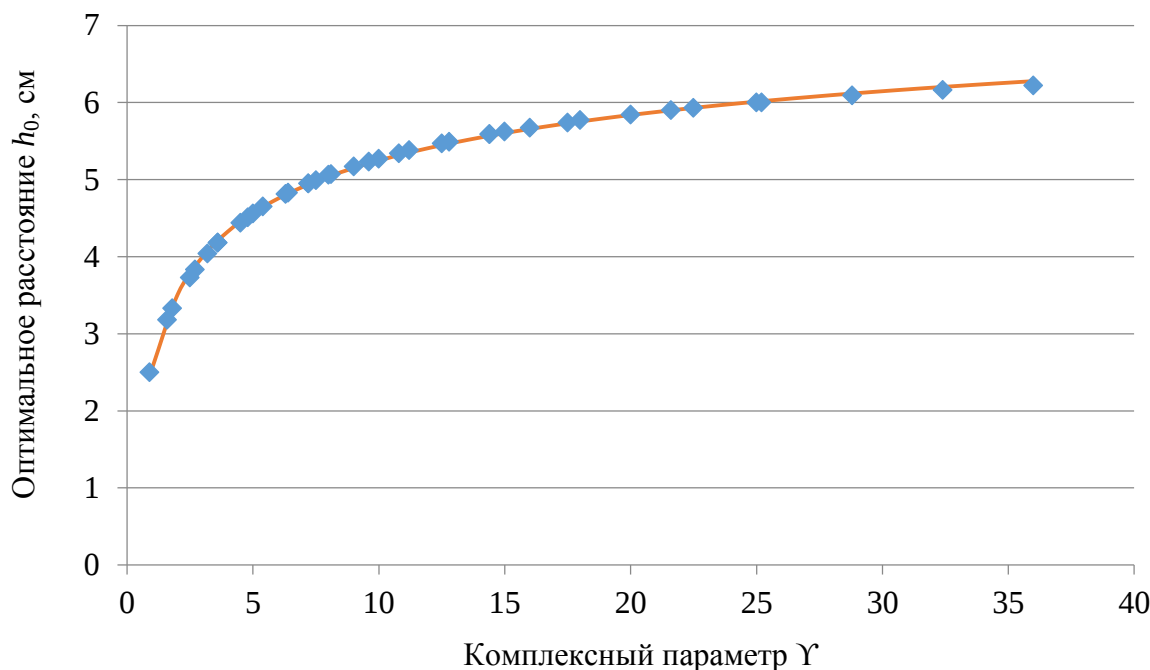


Рис. 7.11. Зависимость оптимального расстояния между электродами от комплексного параметра Υ

Представленные результаты расчетов (*табл. 7.8* и график на *рис. 7.11*) можно описать выражением следующего вида:

$$h_o = h_{\max} \left(1 - \left(\frac{\Upsilon_0}{\Upsilon} \right)^{0,205} \right), \quad (7.16)$$

где $h_{\max} = 9,71$ см, $\Upsilon_0 = 0,23$ кВ²/см² – эмпирические постоянные характерные для ворса указанных геометрических размеров.

Полученное эмпирическое соотношение имеет большое значение для практического применения: зная заряд ворса для выбранной напряженности электрического поля, легко рассчитать расстояние между электродами для обеспечения лучшей ориентации ворса, а значит и максимальной для этого ворса производительностью.

Алгоритм расчета оптимального расстояния между электродами флоатора будет выглядеть следующим образом (на примере ПА ворса длиной 0,5 мм и линейной плотностью 0,33 текс).

Пример

1. Измеряют заряд ворса: $q = 1,05 \cdot 10^{-12}$ Кл ($E = 5$ кВ/см).
2. Максимальный заряд ворса с такими характеристиками и при данной напряженности равен $q_{\max} = 1,16 \cdot 10^{-12}$ Кл. Значит данный ворс имеет значение $\beta = 1,05/1,16 = 0,905$.
3. Значение $Y = 0,905^2 = 22,6$.
4. Вычислим величину оптимального расстояния между электродами:
$$x_0 = 9,71 (1 - (0,23/22,6)^{0,205}) = 5,9 \text{ см.}$$

Таким образом, зная параметры ворса и, в первую очередь, коэффициент зарядки ворса и выбрав рабочую напряженность электрического поля, мы легко можем определить величину оптимального расстояния между электродами. Однако необходимо отдавать себе отчет, что мы получаем здесь оценочное, приближенное значение расстояния. На *рис. 7.12* представлены варианты зависимостей оптимального расстояния от напряженности для ворса с разными электрофизическими свойствами.

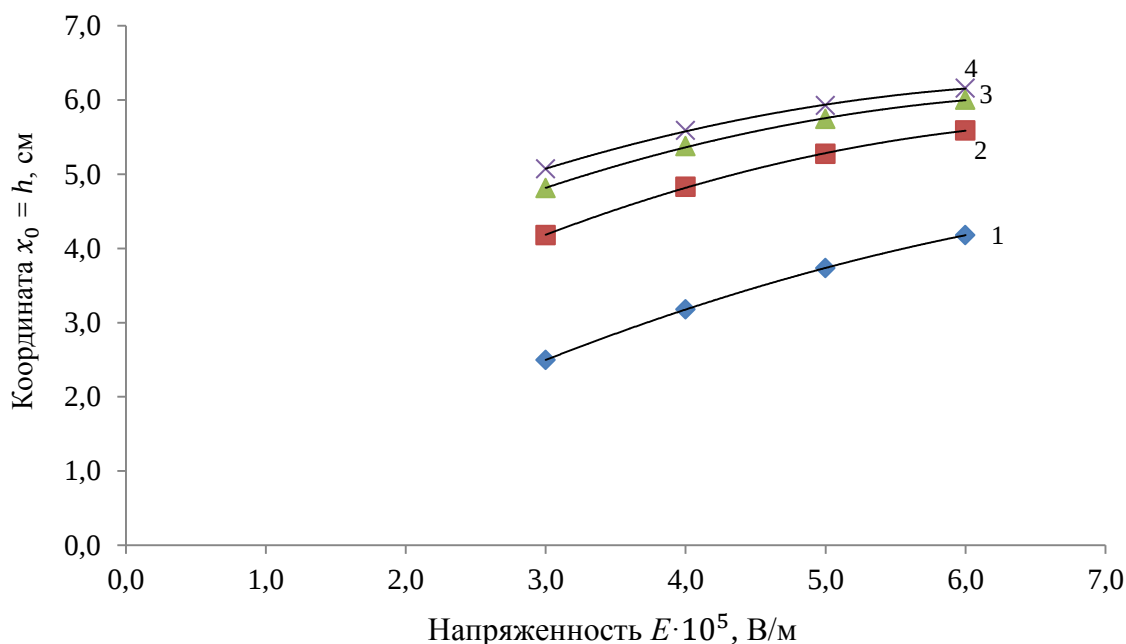


Рис. 7.12. Зависимость координаты $x_0 = h$ от напряженности электростатического поля:

$$1 - \beta = 0,1; 2 - \beta = 0,4; 3 - \beta = 0,7; 4 - \beta = 0,9$$

Следует учитывать еще один важный момент: плотность ворсового покрытия является не единственным критерием качества флокированного материала. Вторым, не менее важным критерием, является стойкость ворсового покрытия к истиранию. Это, безусловно, обеспечивается качеством клеевого состава, но, не в последнюю очередь, и глубиной проникновения ворса в клеевой слой. Для обеспечения необходимой глубины внедрения ворс должен иметь минимально необходимую кинетическую энергию. Это означает, что для оптимального расстояния существует ограничение и с другой стороны: при малом расстоянии ворсинка может не успеть приобрести достаточную кинетическую

энергию. По всей видимости при малом коэффициенте зарядки и малой напряженности обеспечить выполнение обеих требований невозможно – материал будет низкого качества по обоим критериям. Это необходимо проверить экспериментально.

7.7. Оценка оптимального расстояния между электродами на основе эксперимента

В предыдущем разделе было высказано предположение, что наилучшая ориентация ворса на поверхности материала достигается, если расстояние между электродами флокатора соответствует условиям возникновения неустойчивой ориентации ворсинок. Это предположение требуется обосновать экспериментально.

Эксперимент заключался в определении плотности ворсового покрытия n при изменении расстояния между электродами h от 4 до 10 см с интервалом в 1 см при напряжении от 16 до 40 кВ с сохранением постоянной напряженности электрического поля ($E = 4$ кВ/см). Время нанесения t было выбрано равным 15 с. В этом случае значение плотности ворсового покрытия n будет близко 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 результаты для плотности ворсового покрытия представлены в табл. 7.10.

На основе экспериментальных данных построены графики зависимости плотности ворса от расстояния между электродами (рис. 7.13, 7.14).

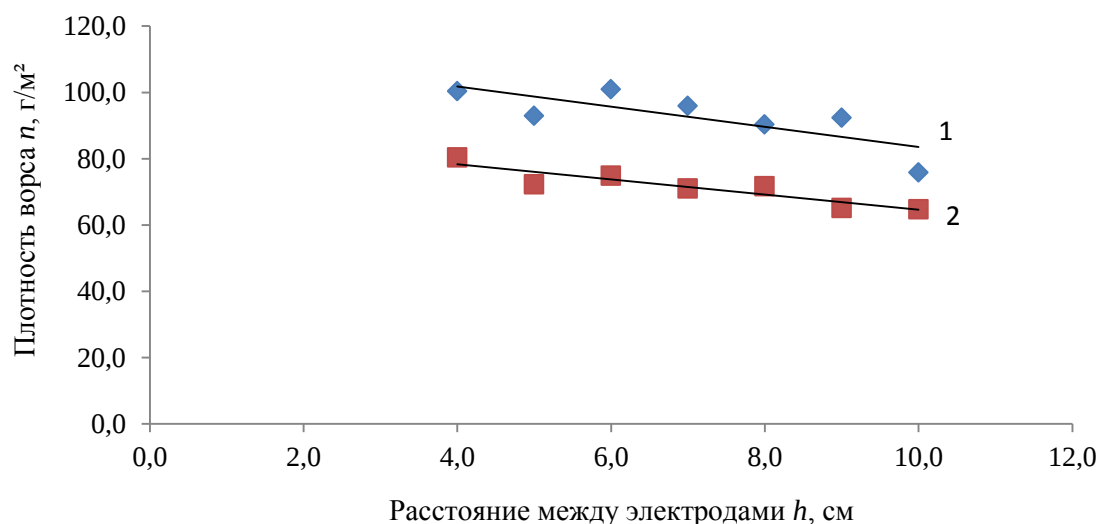


Рис. 7.13. Зависимость плотности ворса от расстояния между электродами для ПА ворса длиной $l = 0,5$ мм при напряженности $E = 4$ кВ/см:
1 – $R = 38$ МОм; 2 – $R = 0,15$ МОм

Т а б л и ц а 7.10. Плотность ворсового покрытия при различном расстоянии между электродами

Параметры ПА ворса и режимы нанесения	Расстояние между электродами h , см		4	5	6	7	8	9	10
	$l = 0,5$ мм; $E = 4$ кВ/см $R = 38$ МОМ		100,4 ± 5,0	92,9 ± 5,6	100,9 ± 5,1	96,0 ± 5,8	90,4 ± 4,5	92,4 ± 4,6	75,8 ± 3,8
	$l = 0,5$ мм; $E = 4$ кВ/см $R = 0,15$ МОМ		80,4 ± 4,0	72,3 ± 3,6	74,9 ± 3,8	71,1 ± 3,6	71,7 ± 3,6	65,2 ± 3,3	64,8 ± 3,2
	$l = 1,0$ мм; $E = 4$ кВ/см $R = 42$ МОМ		116,0 ± 5,8	125,0 ± 6,3	125,2 ± 6,3	108,5 ± 5,4	116,0 ± 5,8	107,3 ± 5,4	101,2 ± 5,1
	$l = 1,0$ мм; $E = 5$ кВ/см $R = 56$ МОМ		137,6 ± 6,9	141,0 ± 7,1	137,7 ± 6,9	135,6 ± 6,8	135,0 ± 6,8	134,1 ± 6,7	116,0 ± 5,8

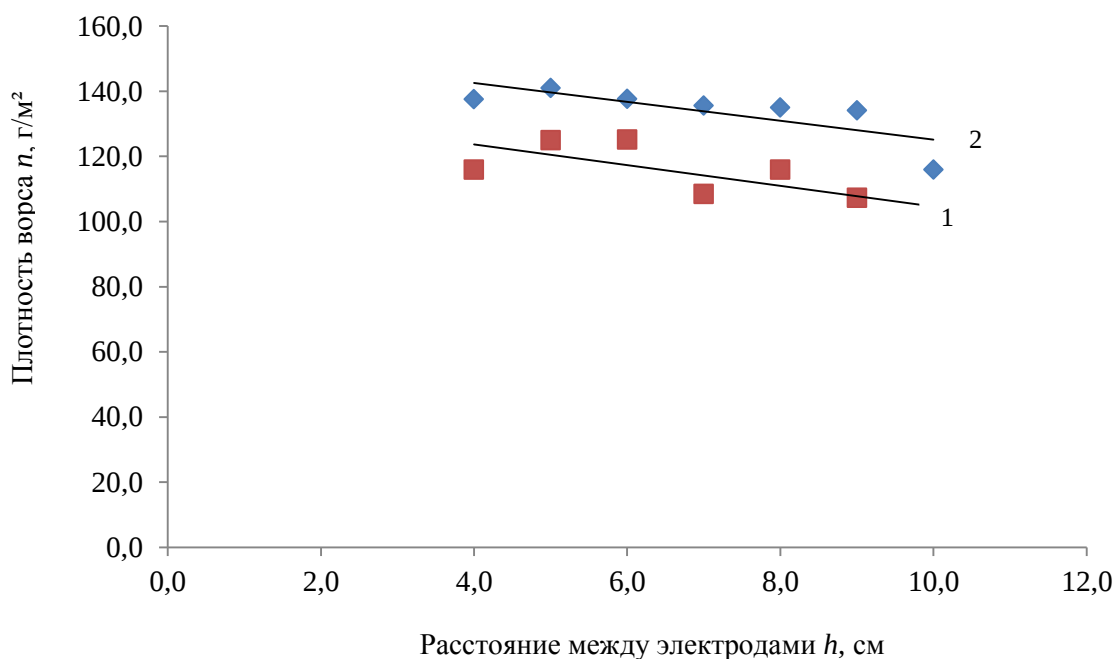


Рис. 7.14. Зависимость плотности ворса от расстояния между электродами для ПА ворса длиной $l = 1,0$ мм при разной напряженности:
 1 – $R = 42$ Мом, $E = 5$ кВ/см; 2 – $R = 56$ МОм, $E = 4$ кВ/см

Как мы видим, результаты эксперимента в целом подтверждают высказанные предположения о том, что ориентация ворса ухудшается (а плотность ворсового покрытия снижается) по мере возрастания расстояния между электродами. Это означает, что по критерию скорости формирования плотности ворсового покрытия следует выбирать малые расстояния между электродами. Однако при малом расстоянии между электродами скорость, а значит и кинетическая энергия ворсинки может оказаться не достаточной для достаточно прочного закрепления в клеевом слое. Скорость ворсинки возрастает по мере ее движения от одного электрода к другому (7.10). Поэтому, с точки зрения прочности закрепления ворса, расстояние между электродами должно быть достаточно значительным. Вероятно, можно считать, что прочность закрепления ворса взаимосвязана со стойкостью ворсового покрытия к истиранию. Прибор и методика ее оценки были описаны в разд. 2.4. Оценив зависимость стойкости к истиранию от расстояния, можно оценить оптимальное расстояние для выбранного критерия при использовании второго параметра в качестве ограничения. Это можно проиллюстрировать следующим образом: либо необходимо получить максимальную плотность ворсового покрытия при заданной продолжительности флокирования и стойкости к истиранию (число циклов истирания) не ниже требуемого, либо требуется получить максимальную стойкость к истиранию при плотности ворсового покрытия не меньше заданной. Еще один вариант оптимизации – это формирование комплексного критерия оптимизации из этих частных критериев.

Конкретные варианты оценки оптимального расстояния будут рассмотрены в разделе, посвященном именно оптимизации процесса флокирования для самых разных случаев.

8. СТРУКТУРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА И ОБЪЕМНОЙ ПЛОТНОСТИ ВОРСА В ЗОНЕ ФЛОКИРОВАНИЯ

Для более глубокого понимания процессов, происходящих при осаждении заряженных волокон в технологии электрофлокирования, была разработана физическая модель, изложенная в разд. 5, связывающая скорость осаждения волокон на поверхность материала со свойствами ворса и параметрами электрического поля.

Модель, полученная с использованием ряда базовых физических положений, описывает начальный этап процесса формирования ворсового покрытия. «Начальный этап» означает следующее: большинство ворсинок, подлетающих к поверхности материала, закрепляются в клеевом слое, т. е. происходит преимущественно однонаправленное движение ворса. Из этого вытекает, что основная часть ворсинок, находящихся между электродами, имеет заряд одного знака. Важным следствием теории является то, что определяющее влияние на процесс осаждения заряженного ворса оказывает объемный заряд этого ворса, который находится в данный момент между электродами флокатора. Поэтому вопрос о величине заряда, который находится в межэлектродном пространстве, а также о распределении плотности этого заряда, потенциала и напряженности электрического поля в объеме флокатора является определяющим для процесса осаждения ворса [19], [53], [54].

В дальнейшем, по мере возрастания поверхностной плотности ворсового покрытия, все больше подлетающих ворсинок «натыкается» на ранее закрепившиеся, перезаряжается, не долетев до поверхности клея, и возвращается обратно. Движение ворсинки между электродами может продолжаться до тех пор, пока она не «найдет» себе места на поверхности материала. Приблизительно можно считать, что на последнем этапе, когда плотность ворсового покрытия приближается к предельному значению, плотности тока, формируемых встречными потоками ворса, становятся равными. Это означает, что структура объемного заряда и поля между электродами меняется по мере роста плотности ворсового покрытия. Вначале между электродами присутствует ворс только одной полярности, а при нарастании встречного потока ворса количество ворсинок с зарядами разной полярности в объеме флокатора постепенно выравнивается и суммарный заряд становится равным нулю.

Сначала рассмотрим распределение объемного заряда, потенциала и напряженности электрического поля, а также распределение ворсинок по скоростям в объеме флокатора на первом этапе нанесения ворса.

8.1. Величина объемного заряда ворса между электродами

В первую очередь, представляет интерес вопрос о величине суммарного заряда, который в данный момент находится в межэлектродном пространстве. Важно при этом проанализировать влияние условий флокирования (напряжения и межэлектродного расстояния) на величину объемного заряда ворса. Сна-

чала определим суммарный заряд ворсинок Q_{Σ} , находящихся между электродами площадью 1 м^2 в каждый момент времени при максимальной плотности тока и однонаправленном движении ворсинок. Это не объемный, а поверхностный заряд, но они связаны между собой простым соотношением.

В работах [19], [53] получено соотношение для величины объемного заряда ворса

$$Q_{\Sigma} = j \cdot T, \quad (8.1)$$

где T – время движения ворсинок до противоположного электрода.

Оценка времени T была сделана выше в разд. 5.4 (5.38) в рамках упомянутой теории:

$$T = \frac{2\varepsilon_0}{j} \left(\frac{U_0}{h} - E_0 \right), \quad (8.2)$$

где U_0 – напряжение между электродами, В; h – расстояние между электродами, м.

Выражение для напряженности электрического поля E_0 известно (5.18). Тогда суммарный заряд ворса между электродами в этом случае будет равен

$$Q_{\Sigma} = \varepsilon_0 C \sqrt{\frac{2h}{km}}. \quad (8.3)$$

Данная величина, как было отмечено, является поверхностной плотностью заряда, так как это заряд между электродами, отнесенный к площади электродов, т. е. заряд между электродами площадью 1 м^2 . Объемный заряд, т. е. заряд, отнесенный к объему флокатора, равен

$$Q_0 = \varepsilon_0 C \sqrt{\frac{2}{kmh}}. \quad (8.4)$$

Полученный результат свидетельствует о том, что суммарный заряд ворса между электродами не зависит от напряженности электрического поля. Такая гипотеза была выдвинута в монографии [19], где предполагалось, что суммарный заряд ворса не зависит от напряженности и напряжения, подаваемого на электроды флокатора. Конечно, это выполняется, если реализуются условия зарядки ворса $q = kE_0$ и остальные исходные положения, использованные при разработке модели в разд. 5.

Отсутствие влияния напряженности или напряжения означает, что уменьшение напряжения при постоянном расстоянии между электродами ведет одновременно к снижению заряда ворса и увеличению количества ворсинок в объеме флокатора. При этом суммарный заряд всех ворсинок остается постоянным.

Возникает еще один вопрос, связанный с суммарным зарядом ворса: заряд возрастает при уменьшении коэффициента зарядки. Это может вызвать сомнения в адекватности развиваемой теории и требует объяснения, поскольку возникает парадоксальная ситуация: чем ниже качество ворса, тем больше заряд, находящийся между электродами.

Изучим вопрос о влиянии коэффициента зарядки ворса, фактически его качества, на характеристики процесса (j и T), определяющие величину заряда между электродами. К ним относятся: плотность тока и время движения ворса

между электродами. На основе этих характеристик была определена величина суммарного заряда (8.1). Расчет был проведен для ПА ворса длиной 0,5 мм, линейной плотностью 0,33 текс, при напряженности электрического поля 5 кВ/см и расстоянии между электродами 0,1 м. Для вычисления значений суммарного заряда Q_1 и Q_2 были использованы две формулы, позволяющих оценить плотность тока j_1 (5.11) и j_2 (5.20). Для расчета времени T и $P_{\max}$ использованы соотношения (8.1) и (8.2). Результаты расчетов для разных значений относительного заряда ворса сведены в *табл. 8.1*. Относительный заряд ворса взят как доля от максимального заряда для указанного ворса и напряженности поля: $q_{\max} = 1,16 \cdot 10^{-12}$ Кл.

Т а б л и ц а 8.1. Расчет суммарного заряда ворса между электродами

$q/q_{\max}$	Q_1 , мкКл	Q_2 , мкКл	j_2 , мкА	T , с	$P_{\max}$, Г/(м ² с)
0,04	5,79	7,17	68,32	0,104 9	525,56
0,13	3,34	3,26	96,78	0,033 7	175,19
0,22	2,59	2,48	108,11	0,023 0	105,11
0,30	2,19	2,09	114,72	0,018 2	75,08
0,39	1,93	1,85	119,22	0,015 5	58,40
0,48	1,74	1,67	122,54	0,013 6	47,78
0,56	1,60	1,54	125,13	0,012 3	40,43
0,65	1,49	1,44	127,22	0,011 3	35,04
0,74	1,40	1,35	128,96	0,010 5	30,92
0,82	1,33	1,28	130,44	0,009 8	27,66
0,91	1,26	1,22	131,71	0,009 2	25,03
1,00	1,20	1,16	132,87	0,008 7	22,75

Следует отметить, что расчет заряда Q_1 совпадает с вычислением по формуле (8.3). Для наглядности на *рис. 8.1* представлены зависимости объемного заряда между электродами Q_1 и Q_2 от величины заряда ворса для двух вариантов расчета плотности тока при напряженности поля 5 кВ/см.

Как мы видим из графика (*рис. 8.1*), наблюдается, казалось бы, парадоксальная ситуация, которая ставит под сомнение адекватность предлагаемой модели: чем «хуже» ворс (меньше заряд при одинаковой напряженности), тем больше величина суммарного заряда ворса, находящегося между электродами. Чтобы прояснить ситуацию, посмотрим на графики (*рис. 8.2* и *8.3*). Из них отчетливо видно, что плотность тока от движения заряженного ворса различается примерно в 2 раза, в то время как время перемещения ворса между электродами в 12 раз. Т. е. скорость движения ворсинок снизилась значительно сильнее, чем величина плотности тока. Следовательно, в объеме флокатора скопилось примерно в 12 раз больше ворсинок, хотя их плотность тока уменьшилась лишь в 2 раза. Для практического прояснения ситуации можно взглянуть на последнюю графу *табл. 8.1*. При малых значениях заряда скорость поступления ворса должна быть огромной, чего не может быть из-за ограничения в виде сетки подающего бункера.

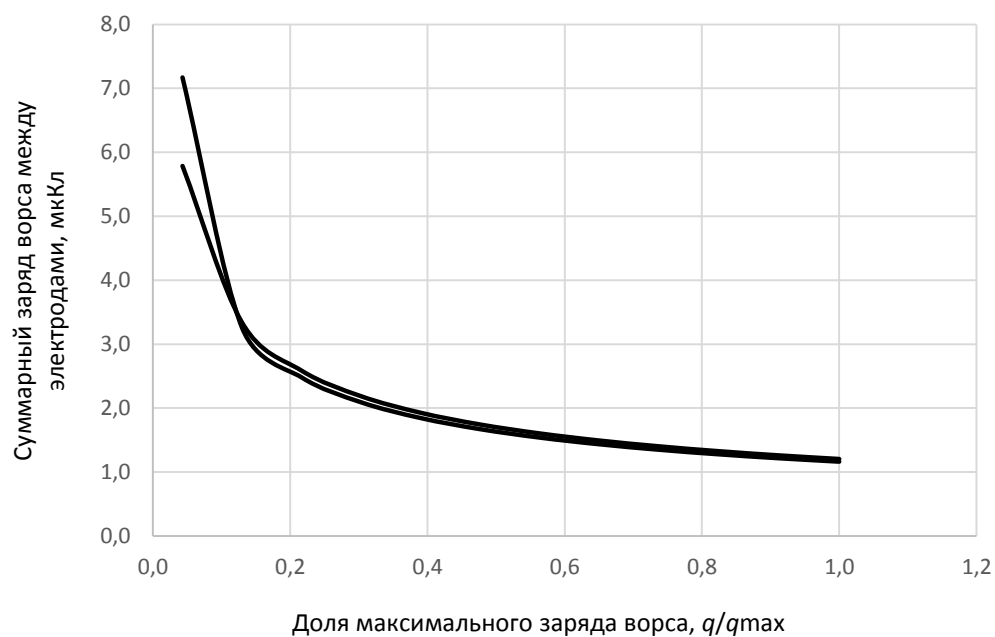


Рис. 8.1. Влияние относительного заряда ворса на величину суммарного заряда ворса между электродами

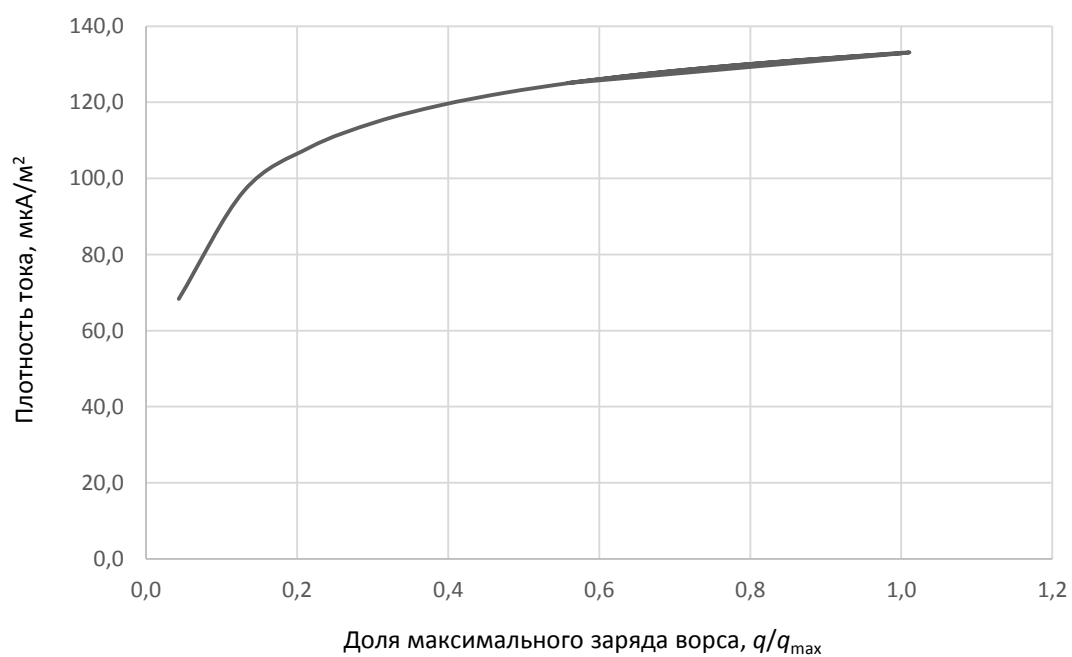


Рис. 8.2. Влияние относительного заряда ворса на величину плотности тока, создаваемую заряженным ворсом между электродами

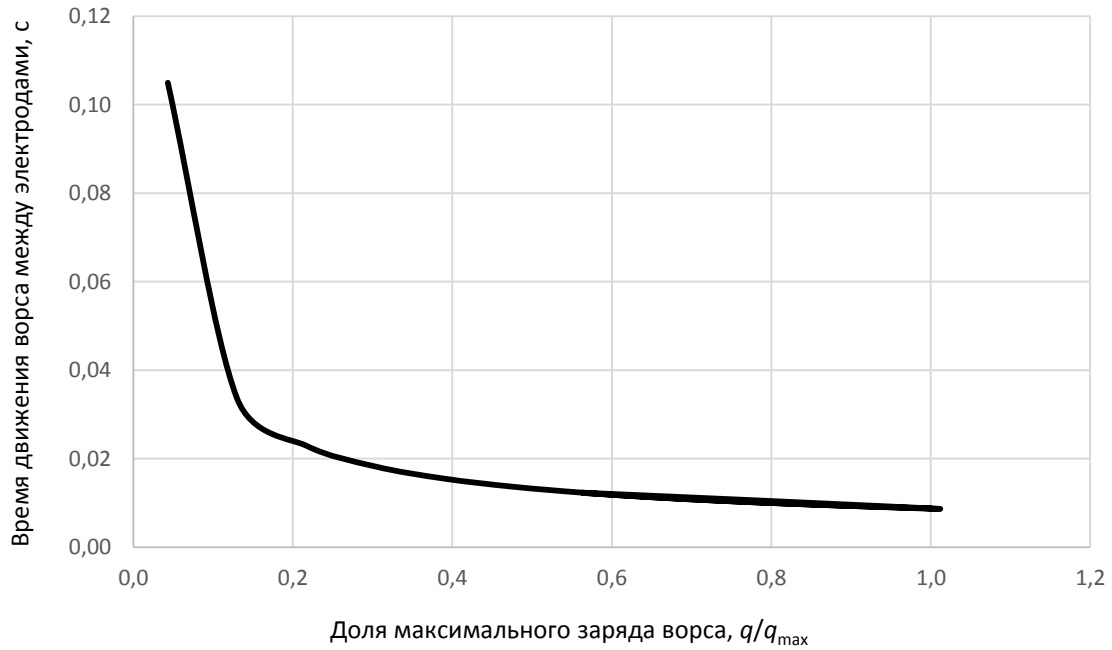


Рис. 8.3. Влияние относительного заряда ворса на величину

Теперь можно рассмотреть еще один интересный вопрос. Речь идет о количестве заряженных ворсинок, одновременно находящихся в объеме флокатора площадью 1 м^2 . Эту величину можно получить, разделив суммарный заряд (8.3) на средний заряд одной ворсинки q :

$$N = \frac{\varepsilon_0 C}{k E_0} \sqrt{\frac{2h}{km}} = \frac{2\varepsilon_0}{k} \frac{1}{\frac{E}{C} \sqrt{\frac{2km}{h}} - 1}, \quad (8.5)$$

где $E = U_0/h$ – напряженность однородного электрического поля без ворса, В/м.

Зная массу одной ворсинки m , можно определить и массу ворса, одновременно находящегося между электродами при этих условиях.

$$M = mN = \frac{\varepsilon_0 C}{k E_0} \sqrt{\frac{2mh}{k}} = \frac{2\varepsilon_0 m}{k} \frac{1}{\frac{E}{C} \sqrt{\frac{2km}{h}} - 1}. \quad (8.6)$$

Аналогично можно получить соотношения для вычисления числа ворсинок и массы ворса в единице объема на основе соотношения (8.4). Запишем эти соотношения в виде

$$N = Q_0/q, \quad q = k E_0, \quad E_0 = \frac{U}{h} - C \sqrt{\frac{h}{2km}}. \quad M = mN. \quad (8.7)$$

Для наглядности были проведены расчеты объемного заряда, количества и массы ворсинок в объеме флокатора для ПА ворса разных геометрических размеров при напряженности электрического поля $E = 5 \text{ кВ/см}$. Исходные данные для расчетов сведены в *табл. 8.2*.

Т а б л и ц а 8.2. Исходные данные для расчета количества ворса в зоне флокирования

T, текс	l, мм	d, мкм	C, кг/с	m, кг
0,33	0,5	19,2	$5,49 \cdot 10^{-9}$	$1,65 \cdot 10^{-10}$
0,33	1	19,2	$1,10 \cdot 10^{-8}$	$3,30 \cdot 10^{-10}$
0,67	2	27,4	$4,02 \cdot 10^{-8}$	$1,34 \cdot 10^{-9}$
2,2	3	49,6	$1,34 \cdot 10^{-7}$	$6,60 \cdot 10^{-9}$

Результаты расчета указанных характеристик процесса флокирования представлены в *табл. 8.3*.

Т а б л и ц а 8.3. Объемный заряд и количество ворса в зоне флокирования

Параметры ворса	Коэффициент зарядки	E_0 , кВ/см	$q10^{13}$, Кл	$P_{\max}$, г/(м ² с)	Q_0 , мкКл/м ³	N , млн шт./м ³	M , г/м ³
$l = 0,5$ мм; $T = 0,33$ текс; $d = 19,2$ мкм	$k = k_{\max} = 2,31 \cdot 10^{-18}$	4,37	10,1	21,05	11,14	11,03	1,82
	$k = 0,2 \cdot k_{\max}$	3,59	1,65	105,71	24,96	151,16	24,94
$l = 1,0$ мм; $T = 0,33$ текс; $d = 19,2$ мкм	$k = k_{\max} = 7,45 \cdot 10^{-18}$	4,50	33,6	13,05	8,77	2,61	0,86
	$k = 0,2 \cdot k_{\max}$	3,89	5,80	65,27	19,61	33,82	11,16
$l = 2,0$ мм; $T = 0,67$ текс; $d = 27,4$ мкм	$k = k_{\max} = 26,8 \cdot 10^{-18}$	4,53	121	13,27	8,39	0,69	0,93
	$k = 0,2 \cdot k_{\max}$	3,94	21,1	66,35	18,77	8,89	11,91
$l = 3,0$ мм; $T = 2,2$ текс; $d = 49,6$ мкм	$k = k_{\max} = 64,2 \cdot 10^{-18}$	4,54	291	18,50	8,16	0,28	1,85
	$k = 0,2 \cdot k_{\max}$	3,97	51,0	92,50	18,25	3,58	23,63

Следует отметить, что на количество ворса, одновременно находящегося между электродами, влияет коэффициент зарядки ворса: ворс, имеющий меньший заряд, в большем количестве может находиться между электродами. В то же время количество и масса ворса, находящегося одновременно в объеме флокатора, снижается с ростом напряженности. Однако следует помнить об ограничении на скорость поступления ворса, вносимом сеткой подающего бункера. Например, 25 г ворса в 1 м³ одновременно вряд ли могут находиться.

Таким образом, мы можем регулировать количество ворса, находящегося в объеме флокатора, но рост скорости поступления ворса сопряжен с уменьшением заряда ворсинок и, как следствие, ведет к ухудшению ориентации и снижению скорости ворсинок, т. е. уменьшению их глубины проникновения в клеевой слой.

Распределение объемного заряда ворса в зоне флокирования

Теперь возникает вопрос о распределении этого заряда в межэлектродном пространстве, т. е. о функции распределения объемного заряда ворса в зоне флокирования. Это распределение является очень важным для физической модели процесса, а провести непосредственные измерения плотности заряда в зоне флокирования не представляется возможным по целому ряду причин. Одной из таких причин являются сильнейшие искажения, вносимые любым датчиком в структуру поля, и распределение зарядов в зоне флокирования. Вследствие это-

го вопрос будет рассмотрен теоретически. Конечно, надо отдавать себе отчет в том, что в реальности мы имеем дело не с непрерывным распределением заряда, а с дискретным, т. е. с заряженными частицами (ворсинками), но их размер столь мал по сравнению с размерами флокатора, а количество в единице объема, как мы видели выше, столь велико, что вполне можно говорить об объемном заряде, имеющем непрерывное распределение между электродами.

Чтобы получить распределение объемного заряда в виде соответствующей функции, воспользуемся одним из исходных положений, принятых при создании модели. Это базовое соотношение (5.3), связывающее плотность тока, распределение ворсинок по скоростям и распределение плотности заряда: $\mathbf{j} = \rho(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{v}(\mathbf{x})$.

Другое необходимое соотношение – это функция распределения ворсинок по скоростям, соответствующая максимальной скорости подачи ворса (5.9). Оно так же, как и первое, достаточно хорошо обосновано.

$$v = \sqrt{\frac{2jqx}{\varepsilon_0 C}}.$$

Используя эти выражения совместно, можно записать функцию распределения плотности заряда между электродами:

$$\rho(x) = \sqrt{\frac{\varepsilon_0 C j}{2q}} \frac{1}{\sqrt{x}}. \quad (8.8)$$

Для случая максимальной скорости подачи ворса $j/q = \varepsilon_0 C/(km)$ это выражение можно записать в более простом виде:

$$\rho(x) = \frac{\varepsilon_0 C}{\sqrt{2km}} \frac{1}{\sqrt{x}}. \quad (8.9)$$

Получен интересный результат. От условий нанесения (напряжение, расстояние между электродами, напряженность поля) оказывается не зависит не только суммарный заряд ворса, но и распределение плотности заряда во флокаторе. Оно зависит только от геометрических и электрофизических параметров ворса. Это можно объяснить тем, что заряд ворсинок q пропорционален плотности тока и, следовательно, с ростом напряженности растет линейно. Это означает, что с возрастанием напряженности растет величина среднего заряда и скорость движения ворсинок, но уменьшается число носителей заряда.

Распределение зарядов между электродами соответствует сделанным ранее предположениям, т. е. плотность заряда максимальна около подающего электрода, где скорость ворсинок наименьшая, и снижается по мере приближения к противоположному электроду, когда скорость возрастает. Здесь может возникнуть непонимание, как в реальности плотность заряда может стремиться к бесконечности. Это кажущееся противоречие связано с тем, что при создании модели использовано уравнение Пуассона для непрерывного распределения заряда. В реальности заряды дискретны, хотя их количество в единице объема весьма велико, поэтому использование указанного приближения вполне оправдано. Кроме того, надо помнить, что, хотя плотность заряда при приближении к электроду стремится к бесконечности, сам заряд, как интеграл плотности, конечен и этот заряд распределен на конечном количестве ворсинок.

На рис. 8.4 показано распределение плотности объемного заряда между электродами для ПА ворса длиной 0,5 и 1,0 мм и с коэффициентами зарядки максимальными (табл. 8.3) и $0,4k_{\max}$.

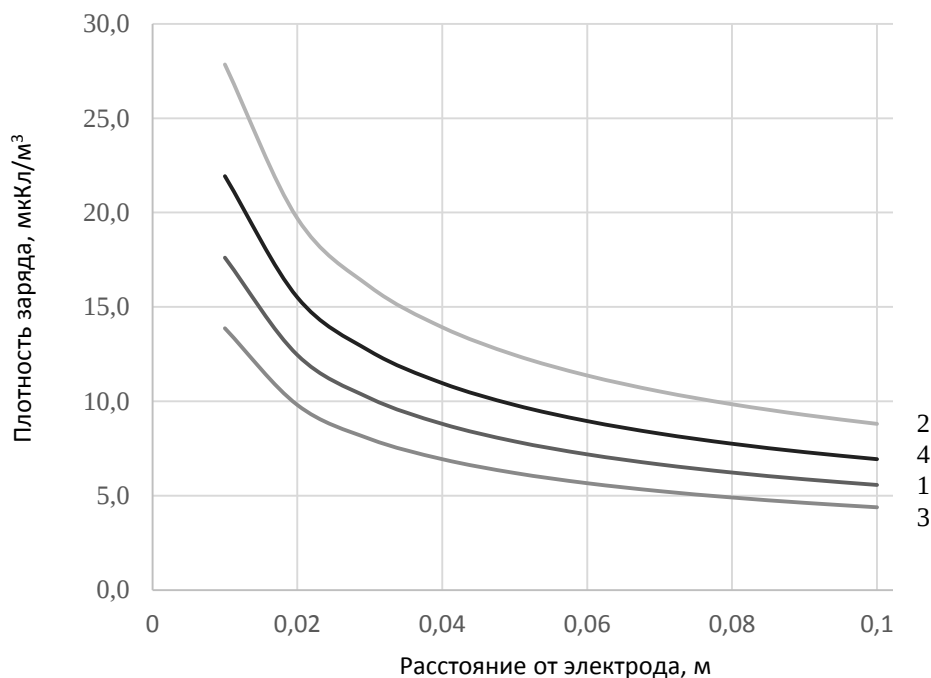


Рис. 8.4. Распределение плотности заряда между электродами флокатора для 2-х видов ПА ворса:

1 – $l = 0,5$ мм, $k = k_{\max}$; 2 – $l = 0,5$ мм, $k = 0,4k_{\max}$;
 3 – $l = 1,0$ мм, $k = k_{\max}$; 4 – $l = 1,0$ мм, $k = 0,4k_{\max}$

Как мы наблюдаем на графике, наибольшая величина плотности заряда на всем интервале соответствует ворсу с наименьшей длиной и коэффициентом зарядки. Т. е. снижение заряда ворса ведет к нарастанию объемной плотности количества ворсинок, причем скорость роста количества ворсинок превышает скорость снижения заряда: заряд ворсинок снижается, а его объемная плотность растет.

8.2. Структура электрического поля в объеме флокатора

В данном разделе мы оценим влияние заряженного ворса, находящегося между электродами флокатора, на распределение потенциала путем сравнения с распределением потенциала без ворса.

В межэлектродном пространстве потенциал изменяется таким образом, что на границах зоны (на электродах) он принимает значения, задаваемые источником высокого напряжения. Обычно один электрод заземлен, т. е. его потенциал равен нулю, а потенциал второго электрода задан источником высокого напряжения. Если между электродами заряженные частицы отсутствуют (ворса нет), то величина потенциала изменяется линейно. Заряженные частицы, имеющиеся в объеме флокатора, искажают электрическое поле так, что гранич-

ные значения потенциала остаются прежними, а его распределение становится нелинейным. Вид этого распределения и предполагается здесь определить.

Распределение потенциала в зоне флокирования рассмотрим на основе соотношения (5.10), полученного в разд. 5.

$$U(x) = \frac{j\tau}{\varepsilon_0 C} x + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2jC}{\varepsilon_0 q}} x^{3/2}.$$

Подставляя в это соотношение значение максимальной плотности тока (5.16), можно получить распределение потенциала в более удобной для анализа форме:

$$U(x) = E_0 x + \frac{2C}{3} \sqrt{\frac{2}{km}} x^{3/2}. \quad (8.10)$$

Используя значение напряженности E_0 (5.18), можно получить окончательное соотношение, описывающее распределение потенциала между электродами и включающее лишь параметры ворса и условия флокирования:

$$U(x) = x \left[E - \frac{2C}{3} \sqrt{\frac{2}{km}} (\sqrt{h} - \sqrt{x}) \right]. \quad (8.11)$$

Для наглядности, это распределение потенциала показано в виде графика (рис. 8.5) для ПА ворса с характеристиками, указанными в табл. 8.3 и 8.4. Условия флокирования были выбраны следующими: $h = 10$ см, $U_0 = 50$ кВ. Одновременно на графике показано распределение потенциала при отсутствии между электродами заряженного ворса.

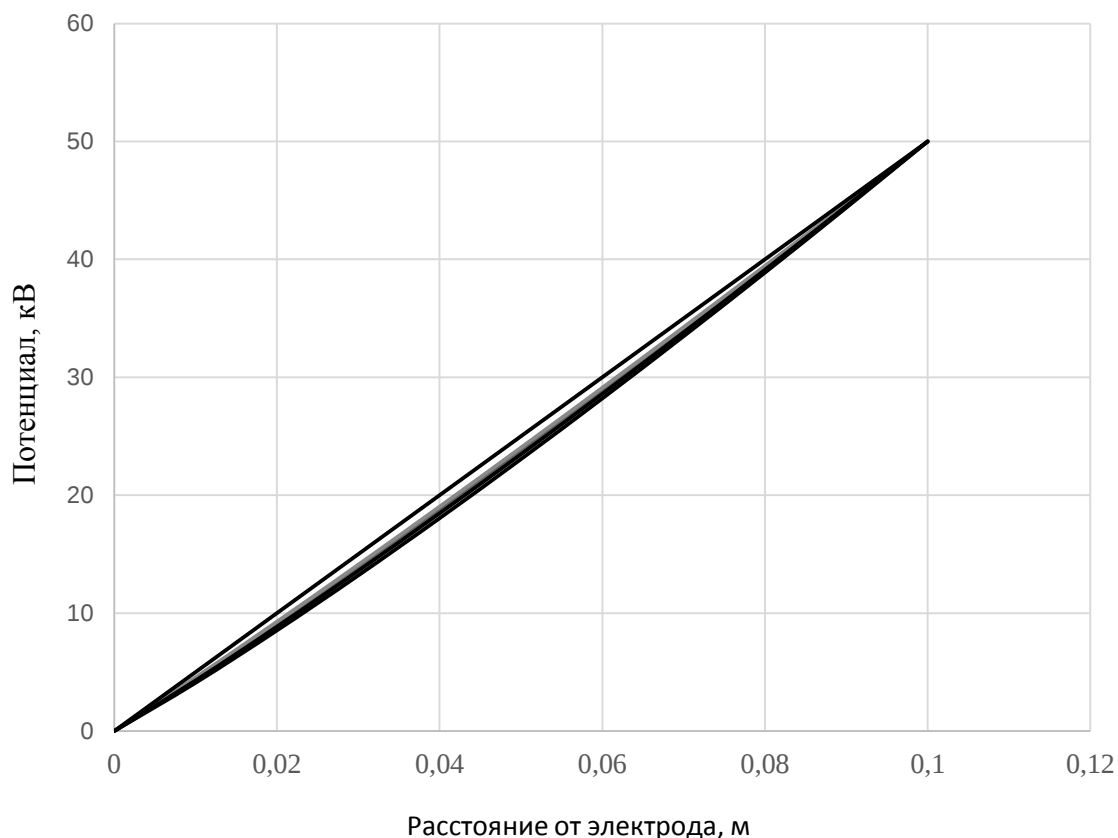


Рис. 8.5. Распределение потенциала между электродами при наличии и отсутствии заряженного ворса

Таким образом, можно констатировать, что наибольшее отклонение потенциала наблюдается посередине между электродами и величина отклонения для указанных параметров ворса не превышает 2 кВ, т. е. менее 10 %.

Следующим этапом изучения влияния объемного заряда на структуру электрического поля во флокаторе будет анализ распределения напряженности электрического поля в зоне флокирования. Как и в предыдущем случае, для потенциала удобнее всего сравнить зависимости напряженности от координаты при наличии и отсутствии заряженного ворса между электродами. В однородном поле между плоскими параллельными электродами при отсутствии объемного заряда напряженность поля постоянна и равна $E = U_0/h$, т. е. отношению напряжения на электродах к расстоянию между ними. Необходимо определить, какие искажения внесет объемный заряд с заданным распределением в структуру данного поля. Для получения функции распределения напряженности в зоне флокирования воспользуемся выражением (8.10). Вычислив градиент потенциала, запишем абсолютное значение напряженности поля между электродами:

$$E(x) = E_0 + C \sqrt{\frac{2x}{mk}}. \quad (8.12)$$

Теперь, воспользовавшись формулой для напряженности E_0 около заряжающего электрода (5.18), мы получим полное выражение для расчета распределения напряженности между электродами флокатора:

$$E(x) = \frac{U_0}{h} - C \sqrt{\frac{h}{2km}} \left(1 - 2 \sqrt{\frac{x}{h}}\right). \quad (8.13)$$

Полученную зависимость проверим на соответствие принятому исходному положению (5.18) и (5.19), а именно, теореме Гаусса. Для этого запишем напряженность на границах:

$$E(x=0) = \frac{U_0}{h} - C \sqrt{\frac{h}{2km}}, \quad E(x=h) = \frac{U_0}{h} + C \sqrt{\frac{h}{2km}}. \quad (8.14)$$

Эти соотношения являются еще одним косвенным подтверждением теории: величины отклонения от напряженности однородного поля около противоположных электродов равны по величине и противоположны по знаку. Расчет зависимостей, представленных на графике (рис. 8.6), сделан для напряжения 50 кВ при расстоянии между электродами 10 см для полиамидного ворса длиной 0,5 и 1 мм, линейной плотностью 0,33 текс, с разными коэффициентами зарядки.

Для наглядности на графике показано и распределение напряженности при отсутствии объемного заряда в объеме флокатора – горизонтальная линия.

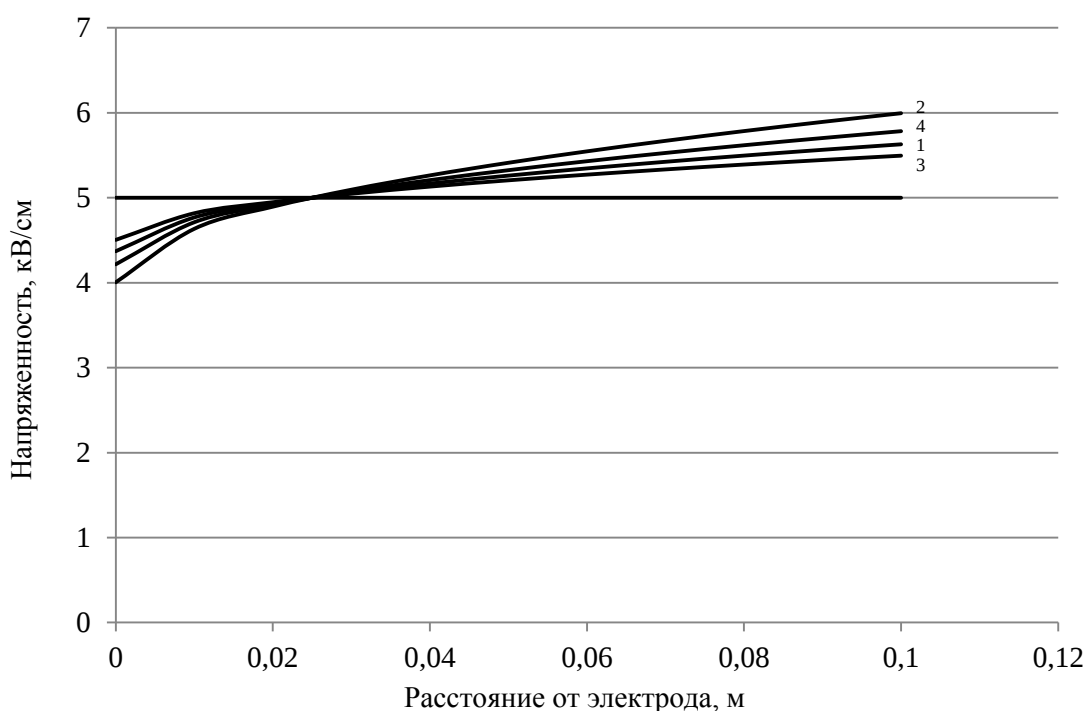


Рис. 8.6. Распределение напряженности между электродами флокатора:
 1 – $l = 0,5$ мм, $k = k_{\max}$; 2 – $l = 0,5$ мм, $k = 0,4k_{\max}$;
 3 – $l = 1,0$ мм, $k = k_{\max}$; 4 – $l = 1,0$ мм, $k = 0,4k_{\max}$

8.3. Распределение ворсинок по скоростям между электродами флокатора

Следующим этапом описания процессов, происходящих при осаждении заряженного ворса в технологии флокирования, будет анализ распределения ворсинок по скоростям в межэлектродном пространстве. В отличие от предложенной ранее модели движения отдельной ворсинки (1.3), мы будем рассматривать поток заряженного ворса. Отчасти, начало рассмотрения этого вопроса было сделано в разд. 5 и получено соотношение (5.9) для скорости потока заряженного ворса. Каждый слой ворса, соответствующий определенной координате x , имеет свою скорость. Поэтому все ворсинки, находящиеся на одинаковом расстоянии от электрода, имеют одну и ту же скорость. В этом смысле речь идет о распределении ворса по скоростям. Конечно, это приближение, поскольку здесь предполагается, что все ворсинки имеют одинаковые геометрические размеры и одинаковый заряд, а скорость подачи ворса постоянна во времени.

Разработанная модель относится к движению **потока** заряженных ворсинок, т. е. учитывает влияния объемного заряда между электродами на значение приобретаемой скорости ворса. Анализ процесса аналогичен воздействию объемного заряда на характеристики поля и величину заряда ворса.

Зависимость скорости ворсинок от расстояния до электрода (5.9) уже была представлена выше. Если использовать связь плотности тока с зарядом ворса $j/q = \epsilon_0 C/(km)$, можно записать выражение для скорости в ином виде:

$$v(x) = q \sqrt{\frac{2x}{km}} = kE_0 \sqrt{\frac{2x}{km}}.$$

Воспользовавшись соотношением (5.18) для напряженности E_0 , получим окончательное выражение для расчетов и построения графиков

$$v(x) = \left(\frac{U_0}{h} - C \sqrt{\frac{h}{2km}} \right) \sqrt{\frac{2kx}{m}}. \quad (8.15)$$

Графики, представленные на *рис. 8.7*, соответствуют условиям нанесения и характеристикам ворса, принятым в предыдущем разделе ($U = 60$ кВ, $h = 12$ см, ворс ПА $l = 1$ мм, линейной плотностью 0,33 текс).

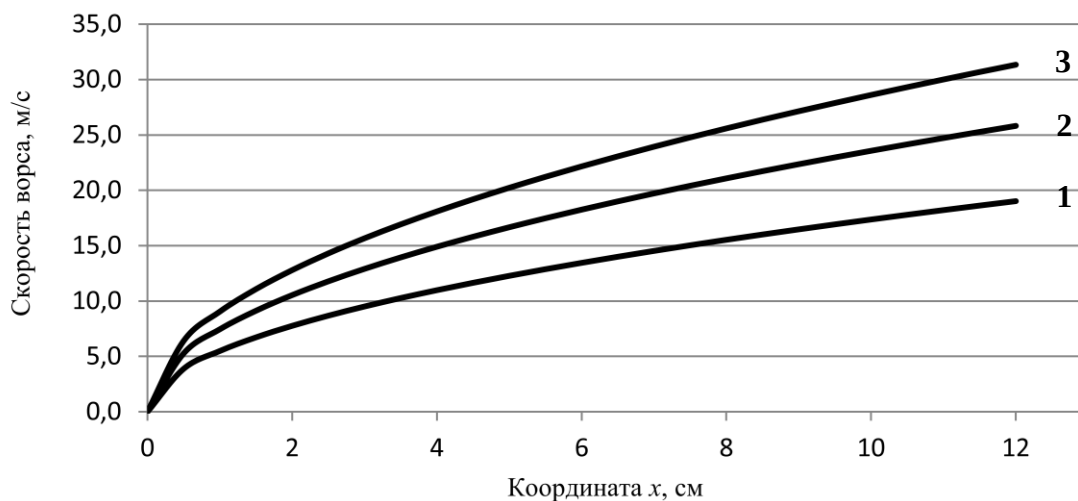


Рис. 8.7. Распределение скорости ворса при однонаправленном движении между электродами:
 1 – $k = 3 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В; 2 – $k = 5 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В; 3 – $k = 7 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В

Полученные зависимости вполне соответствуют развиваемой теории. Как и предполагалось, рост коэффициента зарядки приводит к возрастанию ускорения и, в конечном счете, скорости движения ворса. Необходимо отметить, проявившееся здесь ограничение модели – величина скорости, рассчитанная на ее основе, вероятно, превышает реальные значения. Это не меняет принципиальный характер взаимосвязей параметров процесса и связано с тем, что при оценке силы аэродинамического сопротивления учитывалась только линейная взаимосвязь со скоростью ворсинки.

8.4. Распределение плотности объемного заряда ворса в зоне флокирования

Выше было рассмотрено распределение плотности заряда между электродами для начального этапа флокирования при максимальной скорости подачи ворса.

По мере роста поверхностной плотности ворсового покрытия возрастает встречный поток ворса, имеющего заряд противоположного знака. При дости-

жении максимальной плотности ворсового покрытия на материале практически весь поток ворса перезаряжается и возвращается обратно. В этом случае можно приближенно считать, что плотности тока обеих потоков равны по модулю и противоположны по направлению. Соответственно одинакова и структура распределения зарядов в межэлектродном пространстве. По аналогии с (8.9) можно записать симметричное распределение плотности заряда для ворса с зарядами обоих знаков при встречном движении ворса:

$$\rho(x) = \frac{\varepsilon_0 C}{\sqrt{2km}} \left(\frac{1}{\sqrt{x}} - \frac{1}{\sqrt{h-x}} \right). \quad (8.16)$$

На рис. 8.8 показаны оба распределения плотности заряда. Все расчеты проведены для следующих условий флокирования и параметров ворса: расстояние между электродами $h = 12$ см; разность потенциалов $U_0 = 60$ кВ; напряженность электрического поля $E = 5$ кВ/см; средняя длина ворсинок $l = 1$ мм; линейная плотность ворса $T = 0,33$ текс; коэффициент зарядки ворса $k = 1 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В; диаметр ворса $d = 20$ мкм; средняя масса одной ворсинки $m = 3,3 \cdot 10^{-7}$ г.

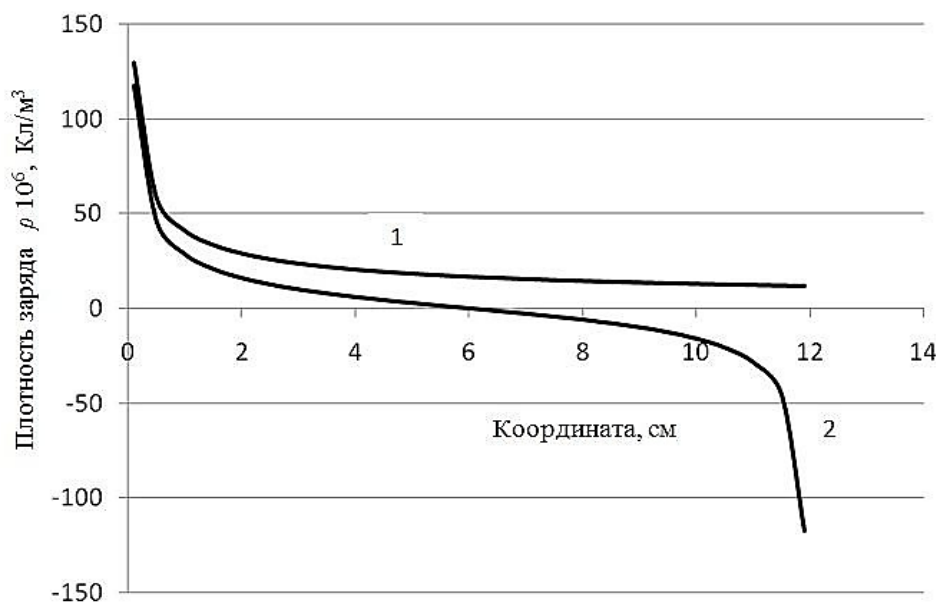


Рис. 8.8. Распределение плотности заряда на начальном и конечном этапах движения потока ворса:

1 – однонаправленное движение (начальный этап); 2 – встречное движение (конечный этап)

Как было отмечено, при встречном движении ворса с зарядами противоположных знаков распределение является симметричным. В процессе флокирования, по мере роста плотности ворсового покрытия, первое распределение постепенно переходит во второе.

Распределение плотности зарядов между электродами (8.16) соответствует сделанным предположениям. Плотность заряда стремится к бесконечности около поверхности электрода, где скорость ворсинок нулевая, и снижается по мере приближения к противоположному электроду. При встречном движении сингулярность наблюдается около разных электродов для зарядов разных знаков.

Противоречие разъяснено в подразд. 8.3 и связано с тем, что при создании модели использовано уравнение Пуассона для непрерывного распределения заряда. В реальности количество зарядов в единице объема весьма велико, но конечно, поэтому применение указанного приближения вполне оправдано. Кроме того, надо помнить, что, хотя плотность заряда при приближении к электроду стремится к бесконечности, сам заряд, как интеграл плотности, конечен и этот заряд распределен на конечном количестве ворсинок.

8.5. Распределение напряженности и потенциала электрического поля в объеме флокатора при встречном движении ворса

Для начального этапа флокирования, т. е. при однонаправленном движении ворсинок с зарядом одного знака, в работе [53] было получено следующее распределение напряженности электрического поля в объеме флокатора:

$$E(x) = \frac{U_0}{h} - C \sqrt{\frac{h}{2km}} \left(1 - 2 \sqrt{\frac{x}{h}} \right). \quad (8.17)$$

Полученная зависимость удовлетворяет принятому исходному положению 3, а именно, теореме Гаусса. Запишем величину напряженности у противоположных электродов:

$$E(x=0) = \frac{U_0}{h} - C \sqrt{\frac{h}{2km}}, \quad E(x=h) = \frac{U_0}{h} + C \sqrt{\frac{h}{2km}}. \quad (8.18)$$

Эти значения напряженности соответствуют полученным ранее соотношениям (5.18) и (5.19). Как и предполагалось, величины отклонения от напряженности однородного поля около противоположных электродов равны по величине и противоположны по знаку.

Для получения аналогичного соотношения, описывающего распределение напряженности на конечном этапе процесса флокирования, можно воспользоваться зависимостью плотности заряда (8.16) от координаты x . Тогда уравнение Пуассона для такого распределения плотности заряда можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{C}{\sqrt{2km}} \left(\frac{1}{\sqrt{h-x}} - \frac{1}{\sqrt{x}} \right). \quad (8.19)$$

Интегрируя это выражение, легко получить распределение напряженности между электродами флокатора при встречном движении разноименно заряженного ворса, т. е. для конечного этапа процесса флокирования. При этом, как и на начальном этапе, необходимо учесть граничные условия. Поскольку суммарный заряд ворса между электродами в данном случае равен нулю (одинаковое количество положительно и отрицательно заряженных ворсинок), то и напряженность около поверхности электродов должна быть равна напряженности однородного поля.

$$E(x=0) = E(x=h) = U/h. \quad (8.20)$$

Выполнение граничных условий обеспечивается выбором постоянной интегрирования. Окончательное распределение напряженности на конечном этапе имеет вид

$$E(x) = \frac{U_0}{h} - C \sqrt{\frac{2h}{km}} \left(1 - \sqrt{\frac{x}{h}} - \sqrt{1 - \frac{x}{h}} \right). \quad (8.21)$$

Представленное решение четко соответствует указанным граничным условиям. На *рис. 8.9* для сравнения показаны графики распределения напряженности на начальном и конечном этапах флокирования.

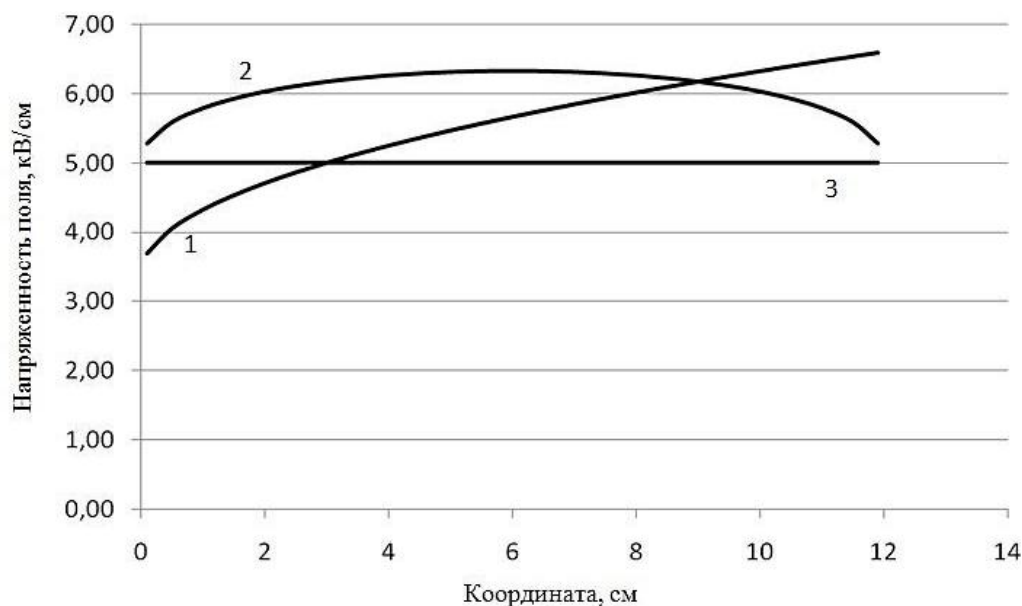


Рис. 8.9. Распределение напряженности электрического поля на начальном и конечном этапах движения потока ворса:

1 – однонаправленное движение ворса (начальный момент); 2 – встречное движение ворса (конечный этап); 3 – отсутствие ворса в объеме

Распределение потенциала между электродами

Распределение потенциала электрического поля для первого этапа флокирования также представлено выше (8.11). Вид этого распределения имеет вид

$$U(x) = x \left[E - \frac{2C}{3} \sqrt{\frac{2}{km}} (\sqrt{h} - \sqrt{x}) \right].$$

Зная распределение напряженности между электродами (8.21), можно получить и распределение потенциала при встречном движении заряженного ворса. При этом следует учесть и граничные условия для распределения потенциала, которые в данном случае очевидны. Функциональный вид этой зависимости выглядит следующим образом:

$$U(x) = x \left(\frac{U_0}{h} + \frac{4C}{3} \sqrt{\frac{2h}{km}} \right) - \frac{2C}{3} \sqrt{\frac{2}{km}} [h^{3/2} + x^{3/2} - (h - x)^{3/2}]. \quad (8.22)$$

Графически эта функция представлена на *рис. 8.10*. Здесь же показано распределение потенциала при однонаправленном движении ворса.

Из графика следует интересный и важный вывод: распределение потенциала сначала сильно изменяется от линейного (3) до нелинейного (1), а затем возвращается (при встречном симметричном движении потоков ворса) фактически к исходному (3).

К сожалению, рассчитать скорость подачи ворса на последнем этапе флокирования не представляется возможным. Ограничение на величину скорости подачи, обусловленное наличием объемного заряда, в этом случае не действует, поскольку суммарный заряд ворса в объеме флокатора равен нулю, а иных ограничений мы не имеем. Однако имеющиеся граничные распределения (начальное и конечное) плотности заряда и характеристик электрического поля позволяют сделать некоторые выводы.

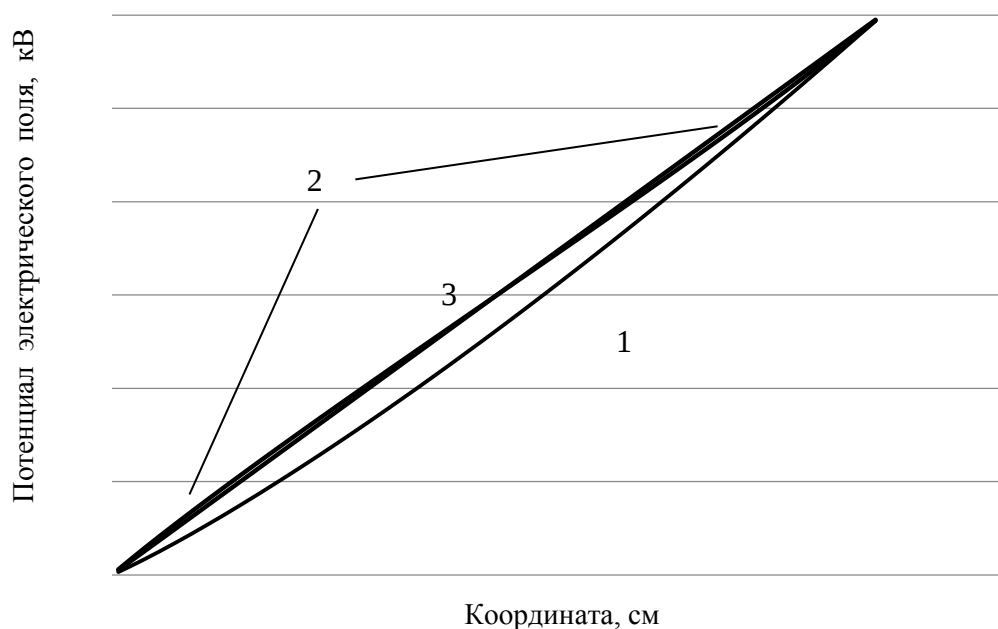


Рис. 8.10. Распределение потенциала электрического поля на начальном и конечном этапах движения потока ворса:

1 — однонаправленное движение ворса (начальный этап); 2 — встречное движение ворса (конечный этап); 3 — отсутствие ворса

Таким образом, разработанная теория осаждения заряженного ворса в технологии флокирования позволяет без дополнительных предположений анализировать структуру поля, величину объемного заряда и распределение ворсинок по скоростям, что важно для понимания процесса и выбора технологических режимов.

Рассмотренные теоретические построения, казалось бы, далекие от практических реалий, на самом деле связаны с технологией самым непосредственным образом. Скорость ворса в момент его внедрения в клеевой слой существенно влияет на прочность его закрепления и стойкость материала к истиранию. Напряженность поля около поверхности заряжающего электрода определяет заряд ворса.

9. НЕОДНОРОДНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ В ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОФЛОКИРОВАНИЯ

В предыдущих разделах речь шла об электрических полях, которые можно назвать квази-однородными. Поле между электродами флокатора при отсутствии заряженного ворса можно считать практически однородным, если межэлектродное расстояние много меньше длины и ширины электродов. В процессе флокирования картина меняется: напряженность поля не одинакова при смещении в направлении, перпендикулярном плоскости электродов. Это происходит из-за наличия между электродами объемного заряда ворса.

Теперь мы рассмотрим электрические поля, применяемые в технологии электрофлокирования, которые являются неоднородными и при отсутствии ворса. Такие поля возникают при флокировании различных объемных объектов, или их создают специально для решения определенного круга задач, например, для сокращения вылета ворса из зоны флокирования или для формирования многоцветных ворсовых узоров.

9.1. Неоднородное электрическое поле параллельных проводников и его применение в технологии флокирования

Задача описания неоднородного электрического поля параллельных цилиндрических проводников между электродами возникает при разработке технологии нанесения ворса на нити, предварительно покрытые клеевым составом. Это необходимо для анализа условий зарядки и процесса движения ворса.

Для того чтобы изучить особенности процесса получения флокированных нитей, необходимо, в первую очередь, научиться рассчитывать параметры электрического поля, в частности напряженность, на поверхности электродов и поверхности нитей. Решение этой задачи описано в монографии [19].

9.1.1. Поле одного цилиндрического проводника между плоскими электродами

Рассмотрим сначала случай расположения одной нити между двумя плоскими электродами (*рис. 9.1*). Для удобства вычислений будем считать, что электроды заземлены, а нить имеет потенциал U_0 . На полученном результате это не скажется.

Для нахождения комплексного потенциала такого электрического поля был использован метод конформного отображения [19]. Сначала необходимо отобразить полосу между плоскостями на одну из канонических областей, а именно на верхнюю полуплоскость. Для этого можно воспользоваться функцией $w = \exp(\pi z/2h)$. При этом заряженная нить из точки $(0, b)$ перейдет в точку $w_0 = \exp(i\pi b/2h)$.

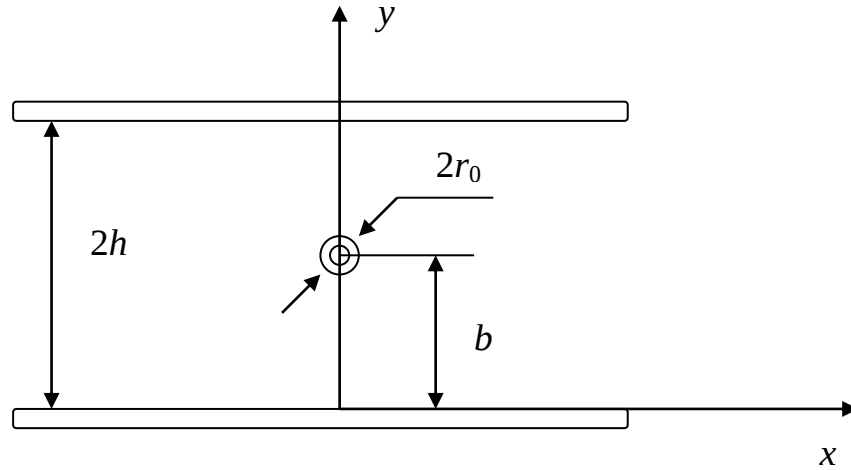


Рис. 9.1. Расположение флюируемой нити между электродами

Комплексный потенциал такого поля будет выглядеть следующим образом:

$$w = \frac{iq}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{e^{\frac{\pi}{2h}z} - e^{-i\frac{\pi}{2h}b}}{e^{\frac{\pi}{2h}z} - e^{i\frac{\pi}{2h}b}} + C, \quad (9.1)$$

где $z = x + iy$ – координата комплексной плоскости, в которой вычисляют потенциал; q – заряд, приходящийся на единицу длины нити; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная.

Постоянную C можно определить из того условия, что поверхность электродов имеет нулевой потенциал. Это даёт

$$C = \frac{iq}{2\pi\epsilon_0} \ln(-e^{i\frac{\pi}{2h}b}).$$

Тогда имеем

$$W = \frac{iq}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{sh\frac{\pi}{4h}(z+ib)}{-sh\frac{\pi}{4h}(z-ib)}. \quad (9.2)$$

Полученный комплексный потенциал можно записать в развернутом виде, т. е.

$$W(x, y) = U(x, y) + iV(x, y), \quad (9.3)$$

где $V(x, y) = C_1$ описывает эквипотенциальные поверхности;

$U(x, y) = C_2$ описывает силовые линии данного поля.

Произведя тождественные преобразования и приняв в дальнейших вычислениях $h = b$ (нить расположена посередине между электродами), получим формулу для комплексного потенциала в развернутом виде:

$$W(x, y) = -\frac{q}{2\pi\epsilon_0} \operatorname{arctg}\left(-\frac{sh\frac{\pi}{2h}x}{\cos\frac{\pi}{2h}y}\right) + \frac{iq}{4\pi\epsilon_0} \ln \left| \frac{ch\frac{\pi}{2h}x + \sin\frac{\pi}{2h}y}{ch\frac{\pi}{2h}x - \sin\frac{\pi}{2h}y} \right|. \quad (9.4)$$

Т. е. потенциал электрического поля записывается в виде

$$\phi(x, y) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \ln \left| \frac{ch \frac{\pi}{2h} x + \sin \frac{\pi}{2h} y}{ch \frac{\pi}{2h} x - \sin \frac{\pi}{2h} y} \right|. \quad (9.5)$$

Или, учтя, что при $x = 0$ и $y = b/2 - r_0$, $\phi(x, y) = U_0$, т. е. потенциалу заряженной нити, можно перейти от заряда q к потенциалу U_0 .

$$\phi(x, y) = \frac{U_0}{2 \ln\left(\frac{4h}{\pi r_0}\right)} \ln \left| \frac{ch \frac{\pi}{2h} x + \sin \frac{\pi}{2h} y}{ch \frac{\pi}{2h} x - \sin \frac{\pi}{2h} y} \right|. \quad (9.6)$$

Поскольку, как известно из [109],

$$\vec{E}(x, y) = -\text{grad}\phi(x, y),$$

то можно перейти к напряженности электрического поля:

$$E_x(x, y) = -\frac{\partial \phi(x, y)}{\partial x} = \frac{\pi U_0}{2h \ln\left(\frac{4h}{\pi r_0}\right)} \frac{sh \frac{\pi}{2h} x \sin \frac{\pi}{2h} y}{ch^2 \frac{\pi}{2h} x - \sin^2 \frac{\pi}{2h} y}, \quad (9.7)$$

$$E_y(x, y) = -\frac{\partial \phi(x, y)}{\partial y} = -\frac{\pi U_0}{2h \ln\left(\frac{4h}{\pi r_0}\right)} \frac{ch \frac{\pi}{2h} x \cdot \cos \frac{\pi}{2h} y}{ch^2 \frac{\pi}{2h} x - \sin^2 \frac{\pi}{2h} y}. \quad (9.8)$$

На рис. 9.2 и 9.3 представлены графики распределения составляющих напряженности электрического поля E_y и E_x соответственно на разных уровнях y , рассчитанные по вышеприведенным формулам.

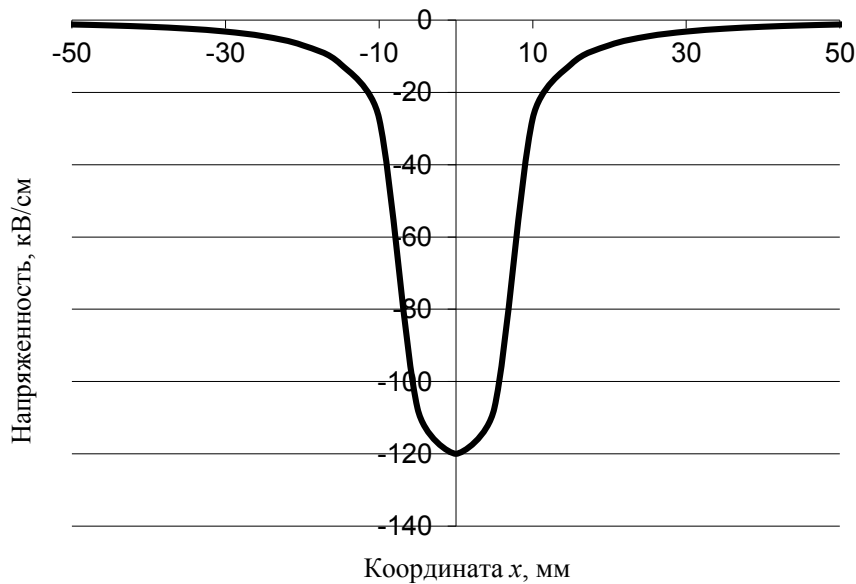


Рис. 9.2. Распределение составляющей напряженности E_y в зоне флокирования:
 $y = 79,5$ мм; $2h = 160$ мм; $U_0 = 32$ кВ; $b = 80$ мм; $r_0 = 0,25$ мм

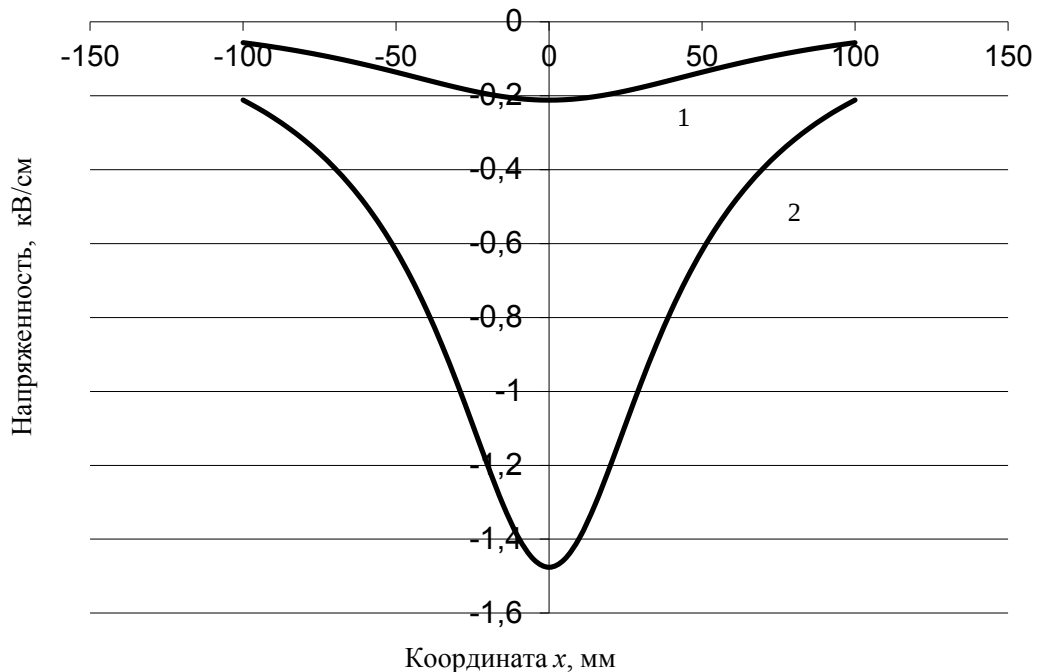


Рис. 9.3. Распределение составляющей напряженности E_y на различной высоте y :
 1 – $y = 70$ мм; 2 – $y = 40$ мм

Как видно из приведенных графиков, электрическое поле одной нити, расположенной между электродами, является сильно неоднородным. Например, чтобы получить в таком поле вертикальную составляющую напряженности, равной хотя бы 2 кВ/см при диаметре нити 1 мм и высоте над электродом 75 мм, необходим потенциал высокого напряжения 50 кВ. Однако при таком напряжении напряженность электрического поля на поверхности флокируемой нити значительно превышает напряженность начала коронного разряда с неё, а при этом флокирование нити невозможно [7], [19].

Если напряжение установить максимальным, при котором ещё не возникает коронный разряд, то напряженность электрического поля даже непосредственно под нитью будет иметь величину для указанного случая менее 1 кВ/см.

Такой напряженности, к сожалению, недостаточно для осуществления процесса флокирования. Всё это говорит о том, что проведение исследований процесса флокирования в подобных полях, по-видимому, имеет смысл вести с несколькими параллельными проводниками. Подробнее вопрос о влиянии коронного разряда на процесс флокирования нитей будет рассмотрен в одном из следующих разделов.

Здесь также интересно отметить, что, казалось бы, оптимальная геометрия формы электрода и расположения нити для нанесения ворса, а именно, когда нить проходит вдоль оси цилиндрического электрода, находящегося под потенциалом высокого напряжения, на самом деле полностью исключает возможность наносить ворс на нить.

В этом случае напряженность электрического поля внутри цилиндрической полости описывается следующим выражением:

$$E = \frac{U_0}{r \ln R/r_0},$$

где R – внутренний радиус цилиндрического электрода; r_0 – радиус нити с клеевым слоем; r – текущий радиус; U_0 – разность потенциалов между нитью и цилиндром.

Отсюда легко видеть, что при такой форме электрода напряженность электрического поля на цилиндрической поверхности радиуса R весьма мала, в то время как на поверхности нити она значительно превосходит порог возникновения коронного разряда. Так, например, если $R = 10$ см, $r_0 = 0,05$ см и $U_0 = 20$ кВ, то $E(r = R) = 0,38$ кВ/см, т. е. гораздо меньше, чем требуется для зарядки и отрыва ворса от электрода, а напряженность электрического поля на поверхности нити будет $E(r = r_0) = 75,5$ кВ/см, что превосходит величину напряженности начала коронного разряда.

Таким образом, ворс на поверхности электрода не перезаряжается из-за низкой напряженности, а на поверхности нити уже возникает коронный разряд и флокирование невозможно. Все изложенное объясняет тот факт, что на практике флокирование отдельной нити практически невозможно.

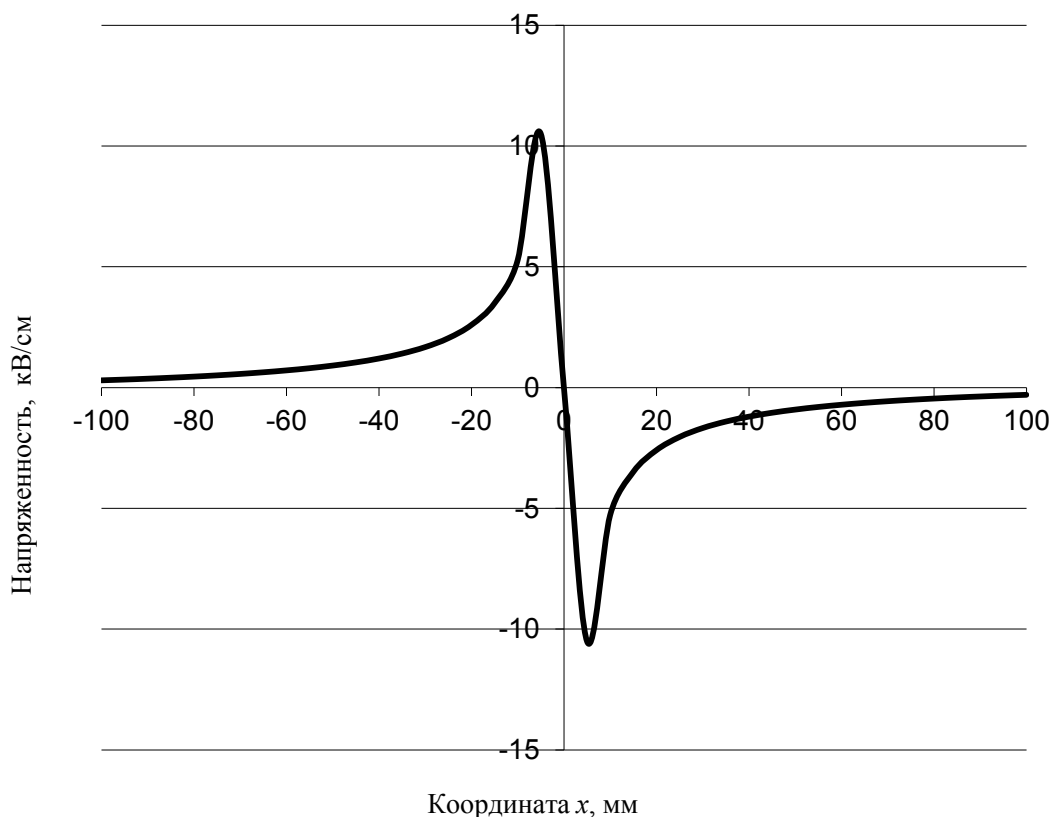


Рис. 9.4. Составляющая напряженности E_x в поле цилиндрического проводника:
 $y = 79,5$ мм; $2h = 160$ мм; $U_0 = 32$ кВ; $b = 80$ мм; $r_0 = 0,25$ мм

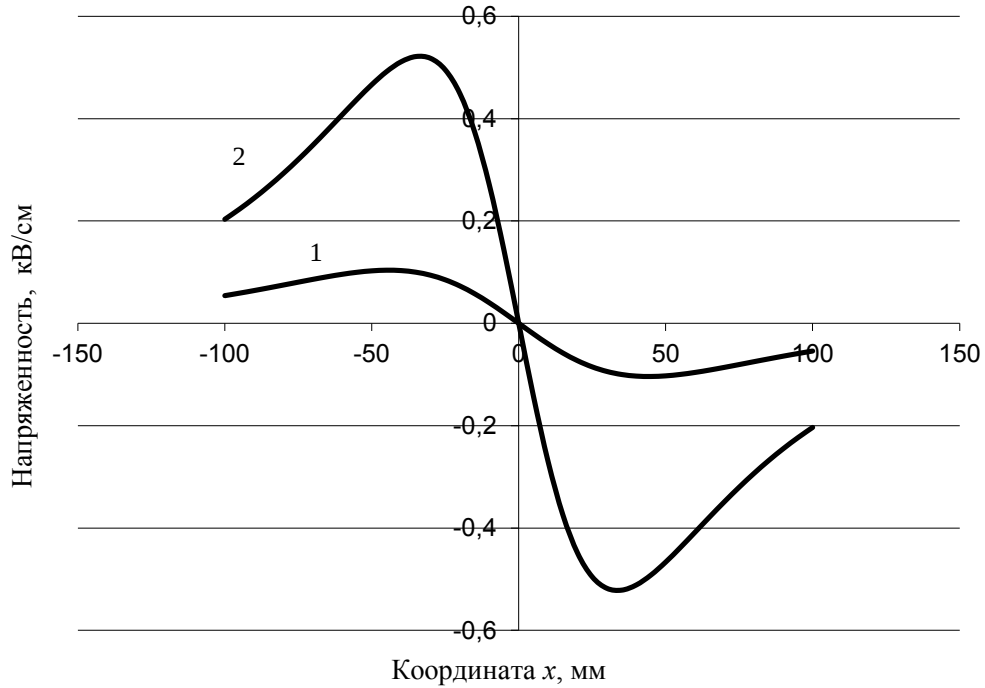


Рис. 9.5. Составляющая напряженности E_x от координаты на различной высоте y : 1 – $y = 70$ мм; 2 – $y = 40$ мм

9.1.2. Анализ электрического поля ряда параллельных проводников между заряженными плоскими электродами

Аналогично тому, как было рассмотрено поле одной нити, рассмотрим случай ряда параллельных нитей между плоскими электродами. Остановимся подробнее на системе из бесконечного ряда параллельных нитей, расположенных между плоскими бесконечными электродами (рис. 9.6). Эта схема имеет практическое значение не только для технологии получения флокированной пряжи, но и для технологии создания ворсовых узоров.

Используя вновь метод конформных отображений и перейдя затем из комплексной плоскости к вещественной функции потенциала, имеем

$$\phi(x, y) = \frac{U_0}{2(\frac{\pi h}{d} - \ln \frac{2\pi r_0}{d})} \ln \left(ch \frac{2\pi y}{d} - \cos \frac{2\pi x}{d} \right). \quad (9.9)$$

Здесь следует отметить, что, вообще говоря, приведенное выражение является приближенным, однако оно с хорошей степенью точности описывает данное электрическое поле. Теперь можно записать обе составляющие напряженности электрического поля для этой системы электродов:

$$E_x = - \frac{\pi U_0}{d(\frac{\pi h}{d} - \ln \frac{2\pi r_0}{d})} \frac{\sin \frac{2\pi x}{d}}{ch \frac{2\pi y}{d} - \cos \frac{2\pi x}{d}}, \quad (9.10)$$

$$E_y = - \frac{\pi U_0}{d(\frac{\pi h}{d} - \ln \frac{2\pi r_0}{d})} \frac{sh \frac{2\pi y}{d}}{ch \frac{2\pi y}{d} - \cos \frac{2\pi x}{d}}. \quad (9.11)$$

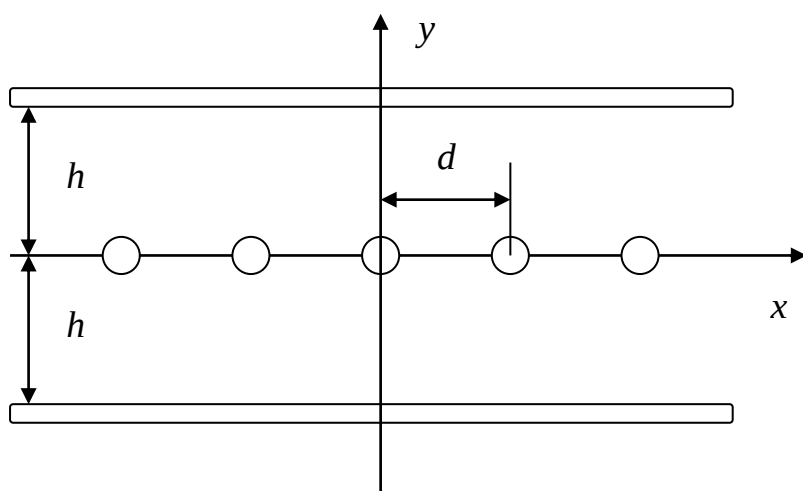


Рис. 9.6. Схема расположения ряда нитей между электродами

На основании полученных формул были построены графики распределения составляющих напряженности электрического поля (рис. 9.7–9.9) для расстояния между проводниками $d = 15$ мм. На первом графике представлено распределение y -составляющей напряженности вдоль оси x на расстоянии 0,5 мм от ряда нитей. Следующий график представляет ту же составляющую напряженности, но на расстояниях y , равных 10 и 40 мм от плоскости нитей.

Далее, на графиках представлены x -составляющие напряженности, построенные для тех же условий.

Таким образом, как подтверждают расчёты, при выполнении условия $h > d$ электрическое поле, создаваемое рядом параллельных нитей, находящихся в одной плоскости, в большей части объёма флокатора весьма близко к однородному полю. Уже на расстоянии 10 мм от плоскости нитей отличие от однородного поля, т. е. амплитуда колебаний напряженности от напряженности около поверхности плоского электрода ($y = h$), не превышает 3 %.

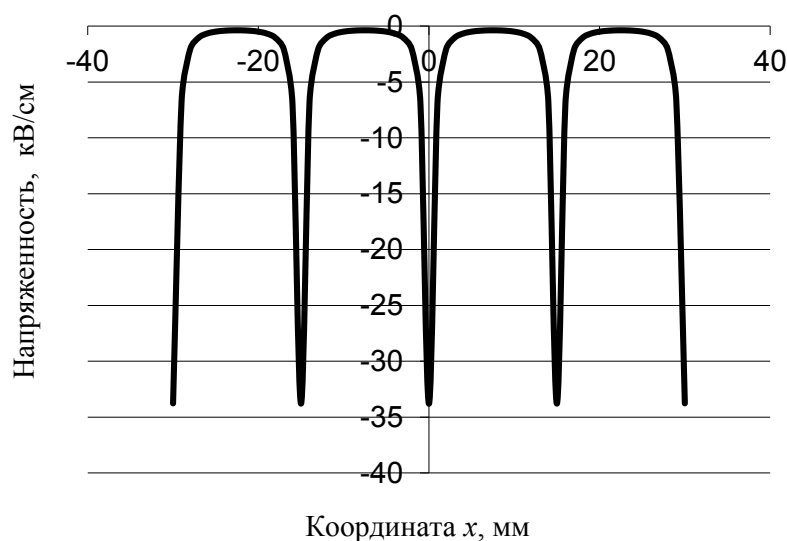


Рис. 9.7. Распределение составляющей напряженности E_y в зоне флокирования:
 $y = 0,5$ мм; $h = 80$ мм; $U_0 = 32$ кВ; $d = 15$ мм; $r_0 = 0,25$ мм

Полученные выражения имеют важное значение для анализа процессов и их оптимизации в двух различных технологиях. В технологии производства флокированных нитей – для выбора оптимального соотношения высоты полотна нитей, расстояния между ними и подаваемого напряжения. Указанные параметры следует выбирать такими, чтобы напряженность на поверхности нижнего электрода была наибольшей при условии отсутствия коронного разряда с нитей. Подробнее это будет рассмотрено в следующем разделе.

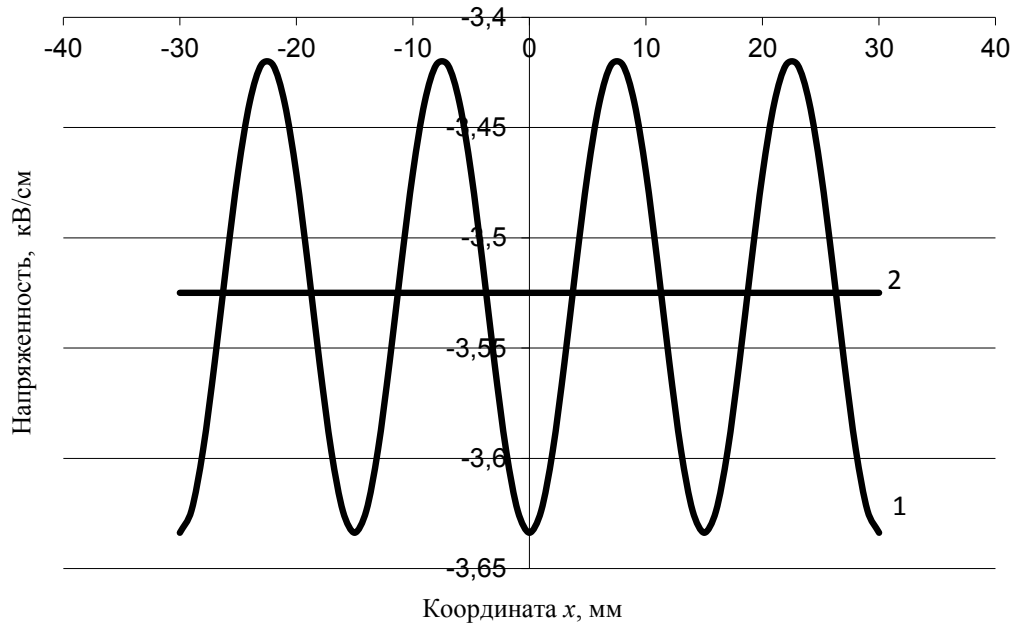


Рис. 9.8. Распределение напряженности E_y в поле параллельных проводников:
 $1 - y = 10$ мм; $2 - y = 40$ мм

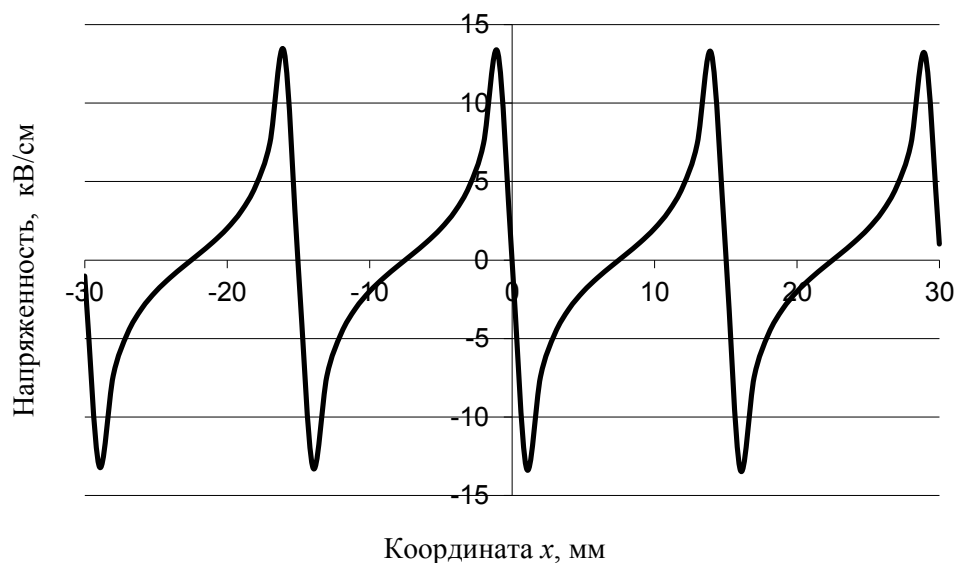


Рис. 9.9. Распределение составляющей напряженности E_x в поле параллельных проводников:
 $y = 0,5$ мм; $h = 80$ мм; $U_0 = 32$ кВ; $d = 15$ мм; $r_0 = 0,25$ мм

Полученное описание поля также дает возможность построить численную модель движения ворса в подобном поле для технологии получения ворсовых узоров, использующей неоднородное электрическое поле.

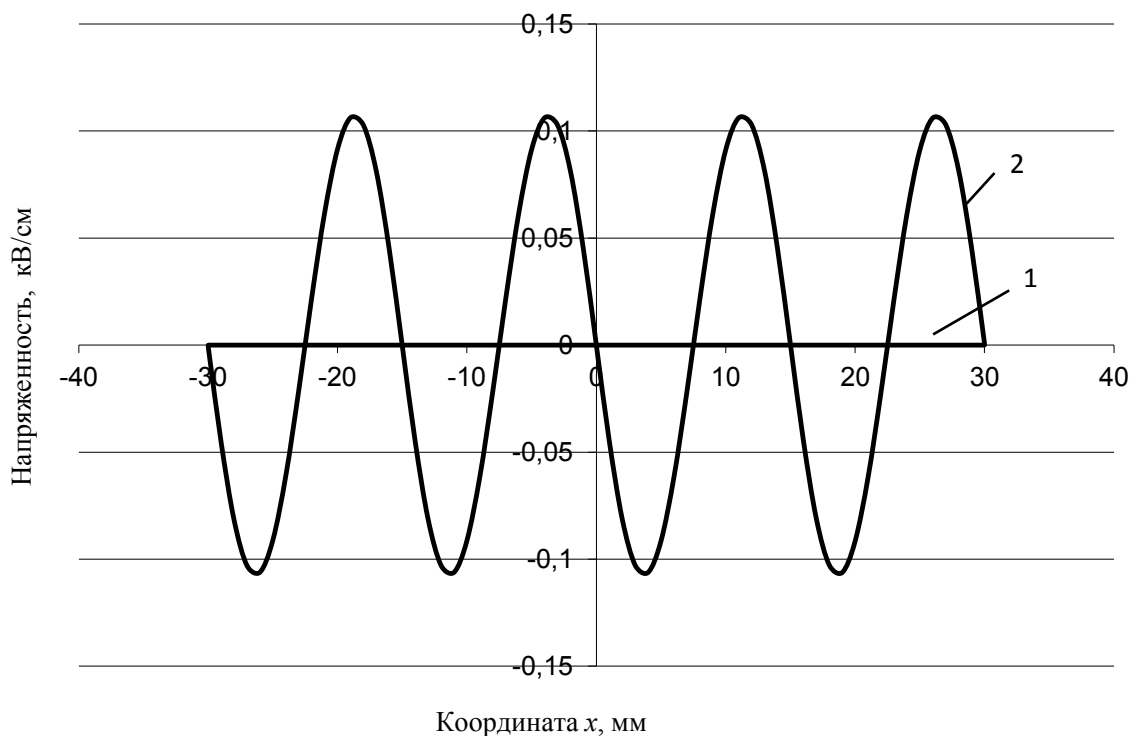


Рис. 9.10. Распределение составляющей напряженности E_x в поле параллельных проводников:
 $1 - y = 10$ мм; $2 - y = 40$ мм

Такая численная модель будет важна для анализа процесса и оценки влияния основных технологических параметров.

9.2. Применение неоднородного электрического поля для сокращения вылета ворса из зоны флокирования

Анализируя вопрос о применении неоднородных полей в технологии флокирования, нельзя не упомянуть об экономии ворса путем сокращения его вылета из межэлектродного пространства. Ворс – это наиболее дорогостоящий сырьевой компонент флокированных материалов. Поэтому для обеспечения эффективности процесса необходимо обратить внимание на возможность сокращения его потерь. Речь здесь идет, конечно, не о прямых потерях из-за вылета ворса из зоны флокирования, а о том, что при многократной перезагрузке ворса в подающий бункер его свойства постепенно ухудшаются. Удачным способом решения этой задачи можно считать применение неоднородных электрических полей.

Неоднородные электрические поля в электронно-ионной технологии, а также и в технологии электрофлокирования используются достаточно широко. Было исследовано как поведение мелкодисперсного порошка в неоднородном

поле, так и длинных волокон [1], [6], [7]. Что касается волокон промежуточных размеров, относящихся к области технологии электрофлокирования, то их поведение было описано в работах [9]–[12], [17], [19].

Было показано, что в неоднородном поле простейшей конфигурации, образованном двумя плоскими электродами, расположенными под некоторым углом, длинные и короткие волокна ведут себя по-разному. Короткий ворс, движущийся между электродами, одновременно смещается в направлении снижения напряженности электрического поля [19], [14], [55]–[57], а длинный – в сторону возрастания [1], [7]. Длинное или короткое волокно определяется отношением длины волокна к радиусу кривизны силовых линий. Не вдаваясь здесь в подробности механизма этого явления, описанного в работах [1], [7], [56]–[58], покажем возможность его использования для сокращения потерь ворса при электрофлокировании [111].

Дело в том, что при флокировании как плоских материалов, так и нитей между плоскими параллельными электродами ворс из зоны нанесения неизбежно вылетает в разные стороны. Такой ворс обычно собирают в специальный бункер, расположенный под нижним электродом. Несмотря на это значительный вылет ворса из зоны флокирования сопряжен с его существенными потерями, а кроме этого многократное использование ворса приводит к ухудшению его электрофизических параметров. Одним из возможных путей сокращения потерь ворса является применение неоднородного электрического поля.

Наиболее простым и дешевым способом сокращения вылета ворса является установка на флокаторе дополнительных электродов по периметру.

Для оценки потерь ворса при флокировании была использована методика, основанная на применении «клетки Фарадея». Лабораторный стенд, созданный для измерения количества ворса, вылетевшего из зоны нанесения, показан на *рис. 9.11*. Сверху расположен бункер 1, подающий ворс 2 сквозь сетчатое дно 3, к которому подключено высокое напряжение от источника 4. К бункеру присоединены под определенным углом к плоскости сетчатого дна дополнительные электроды 5. Нижний (заземленный) электрод изготовлен двойным: сверху сетчатый электрод 6, под ним – сплошной электрод 7, на котором расположены измерительные ячейки 8.

Оценка количества вылетающего ворса проводилась следующим образом. Ворс, поступающий сверху сквозь сетку 3 в зону флокирования, движется под действием электрических сил к нижнему электроду. При попадании на заземленную сетку 6 нижнего электрода часть ворса, перезарядившись, возвращается к верхнему электроду 3, на который подано высокое напряжение от источника 4. Другая часть ворса проходит сквозь ячейки сетки 6 и достигает нижнего сплошного электрода 7, где и отдаёт свой заряд. При этом поскольку электроды 6 и 7 заземлены, то электрическое поле между ними практически отсутствует и попавший между ними ворс остается на электроде. Этот процесс важен для нас ввиду того, что он позволяет имитировать условия флокирования и оценивать количество ворса, покидающего зону нанесения. Дело в том, что в процессе флокирования плоских материалов условия близки к описанным выше: часть ворса внедряется в слой связующего на материале (ворс, проходящий сквозь

сетку 6), другая часть ворса (не внедрившаяся) перезаряжается и возвращается к верхнему электроду.

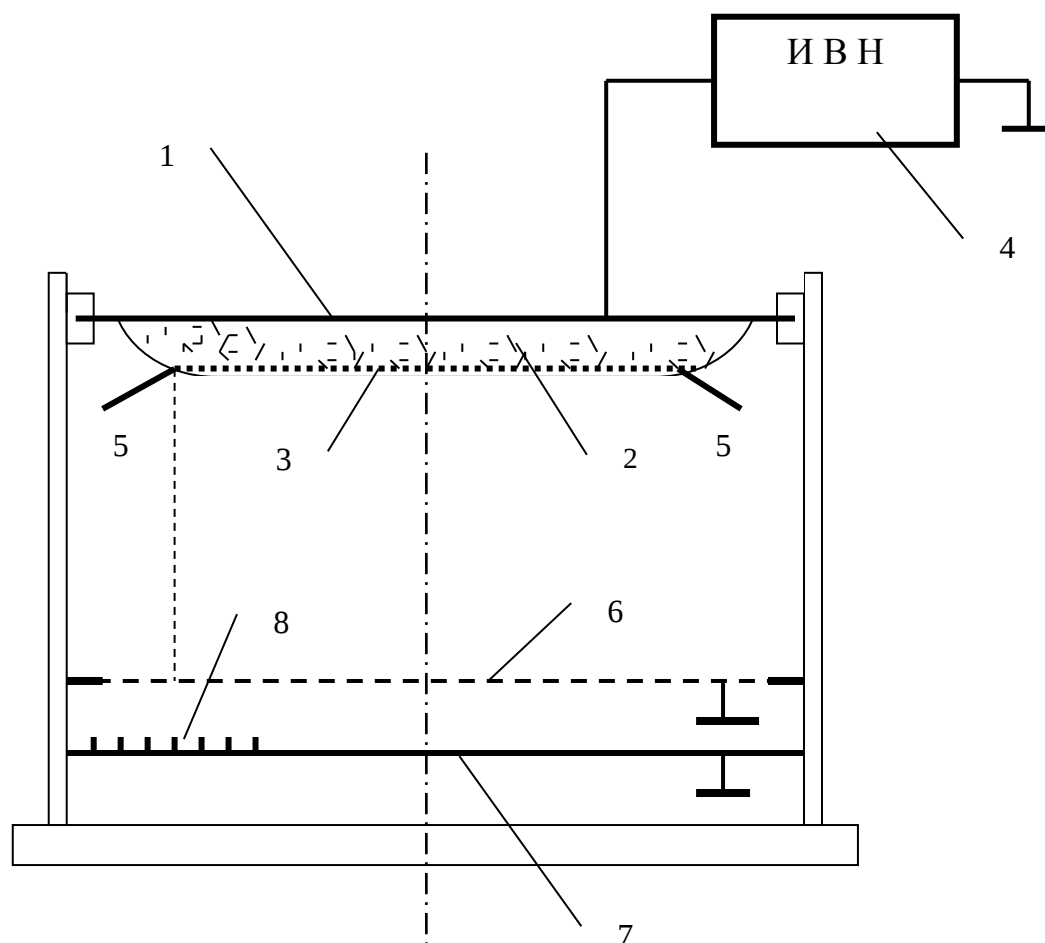


Рис. 9.11. Схема измерительного стенда для контроля вылета ворса в процессе нанесения

Подача ворса сквозь сетчатое дно 3 подающего бункера 1 осуществляется посредством его вибрации. Прозрачность сетки подающего бункера (отношение площади отверстий сетки к её полной площади) составляла примерно 50 %. Измерительные ячейки 8 были расположены с таким расчетом, чтобы три из них находились непосредственно под подающей сеткой 3, а четыре ячейки – за зоной подачи ворса. Все ячейки были предварительно пронумерованы и взвешены. Подачу ворса осуществляли в течении 10 с, после чего путем взвешивания определяли количество ворса в ячейках.

Для создания в зоне нанесения неоднородного поля нужной конфигурации к верхнему электроду 3 были присоединены две металлические пластины 5 в качестве дополнительных электродов, наклон которых к плоскости электрода (угол α) можно изменять от 0 до 90° . Ширина этих электродов составляла 4 см, и они располагались вдоль всей длины бункера 1. Расстояние между электродами 3 и 6 было постоянным и равнялось 110 мм. Исследования были проведены для полиамидного ворса двух различных длин (0,5 и 3 мм) при напряжениях

56 и 72 кВ. Результаты исследований для удобства анализа представлены в виде графиков (рис. 9.12–9.14).

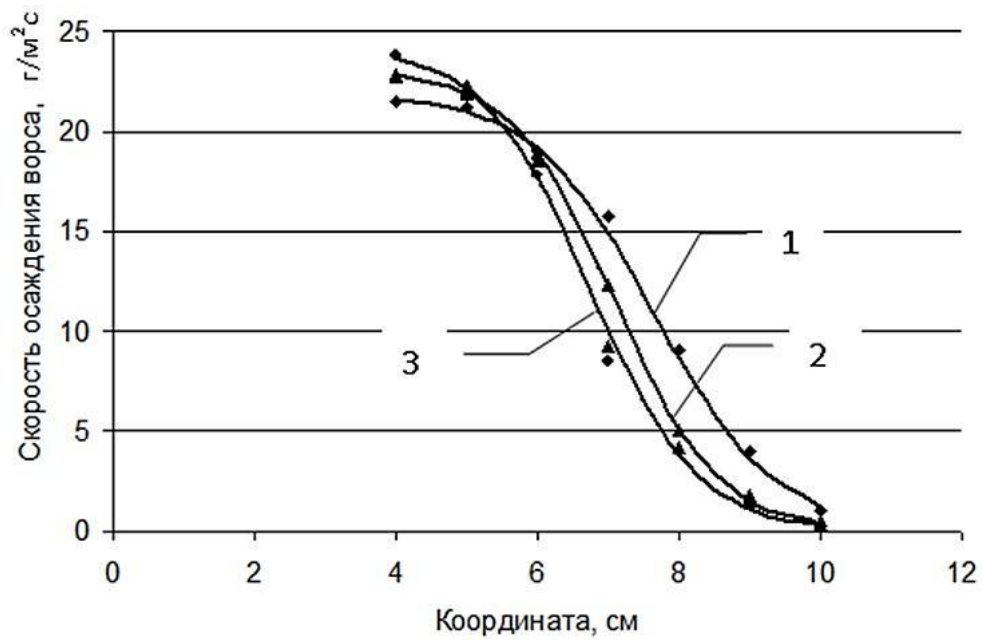


Рис. 9.12. Влияние угла наклона дополнительных электродов на рассеивание ворса ($l = 0,5$ мм, $U = 56$ кВ):
 $1 - \alpha = 0^\circ$; $2 - \alpha = 14^\circ$; $3 - \alpha = 35^\circ$

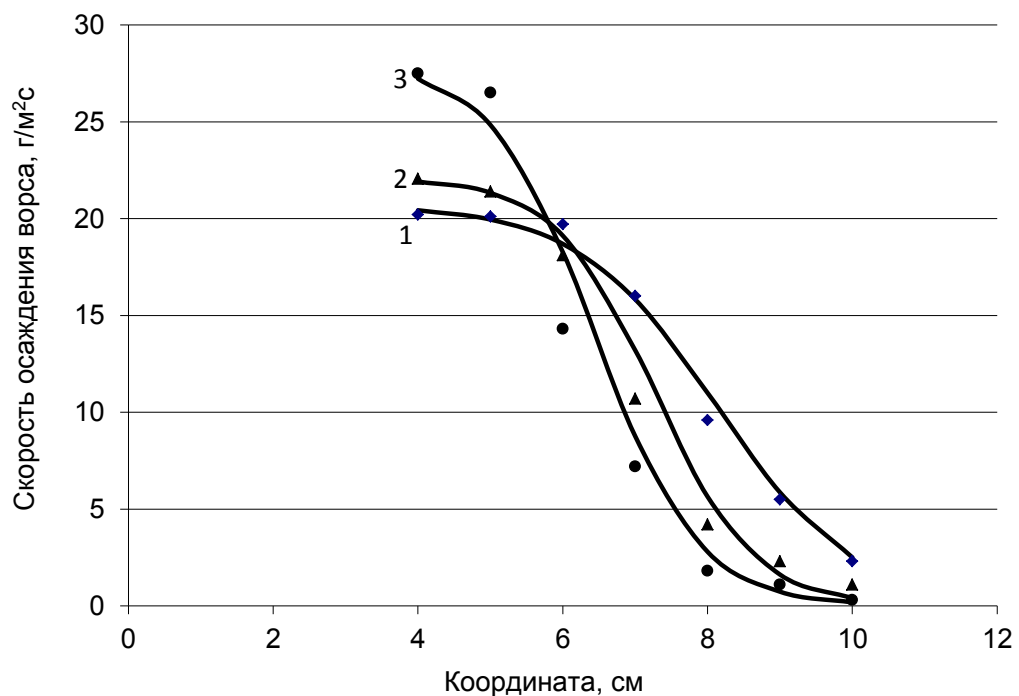


Рис. 9.13. Влияние угла наклона дополнительных электродов на рассеивание ворса ($l = 0,5$ мм, $U = 72$ кВ):
 $1 - \alpha = 0^\circ$; $2 - \alpha = 14^\circ$; $3 - \alpha = 21^\circ$

На графиках показаны зависимости скорости заполнения измерительных ячеек от их расстояния до оси флокатора при различном напряжении, наклоне дополнительных электродов для полиамидного ворса двух различных длин.

На основании представленных графических зависимостей можно судить о рассеивании ворса из зоны флокирования. Так, например, без дополнительных электродов (угол наклона – 0^0) увеличение напряженности электрического поля, при котором ведется флокирование, с одной стороны, ведет к повышению скорости нанесения ворса и улучшению качества материала за счет возрастания плотности ворса, а, с другой стороны, приводит к некоторому росту рассеивания ворса. Применение дополнительных электродов позволяет во всех случаях существенно сократить потери ворса из-за его вылета из зоны нанесения.

Полученные результаты свидетельствуют, что с ростом напряжения и возрастания неоднородности поля (увеличения угла наклона дополнительных электродов) наблюдается тенденция к всё большей локализации ворса в зоне флокирования. На основе полученных экспериментальных результатов можно, хотя бы приближенно, оценить скорость рассеивания ворса, например, для флокатора длиной 1 м в обе стороны при флокировании рулонного материала.

Для полиамидного ворса длиной 0,5 мм при рабочем напряжении флокирования $U = 72$ кВ количество ворса, покидающего зону нанесения, составило более 0,65 г/с при отсутствии дополнительных электродов (угол наклона – 0^0). За час работы флокатора это будет уже 2,35 кг, а за смену – 18,8 кг. Конечно, как уже говорилось выше, эти потери не являются безвозвратными, однако многократное использование ворса ухудшает его электрофизические показатели, что не желательно по целому ряду причин.

Если оценить теперь количество ворса, покидающего зону флокирования при использовании дополнительных электродов под углом наклона 21^0 и при том же рабочем напряжении, скорость рассеивания ворса составит лишь 0,16 г/с, т. е. 0,58 кг/ч, что примерно в 4 раза ниже, чем без электродов.

Таким образом, установка такого простого устройства, как дополнительные электроды, позволяет весьма существенно сократить вылет ворса из зоны нанесения с 2,35 до 0,58 кг/ч для ворса длиной 0,5 мм, использованного в эксперименте. Конечно, надо отдавать себе отчет, что количественные характеристики для другого ворса, даже такой же длины, будут иными, но сам факт – сокращение вылета ворса – сохраняется.

Еще более поразительный эффект был получен от использования дополнительных электродов с полиамидным ворсом длиной 3 мм. Как видно из графика (рис. 9.14), вылет ворса в этом случае сокращается почти до нуля. В то же время без дополнительных электродов скорость рассеивания ворса составила 0,545 г/с или около 2 кг/ч.

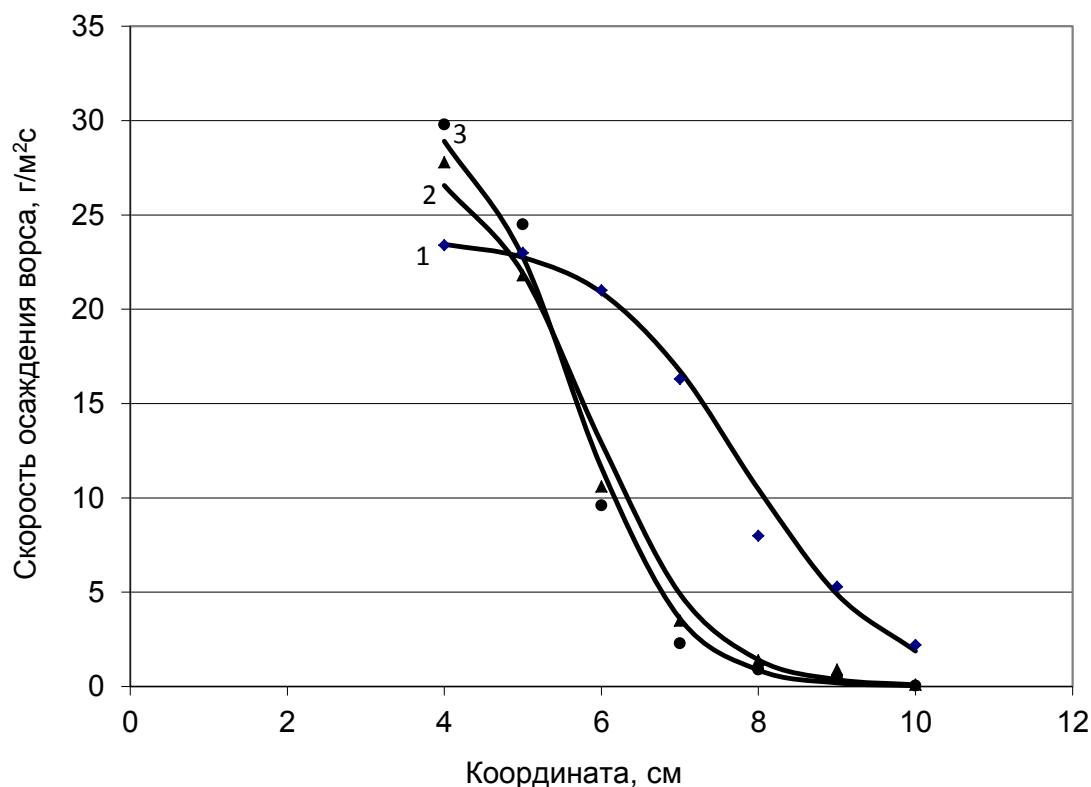


Рис. 9.14. Влияние угла наклона дополнительных электродов на рассеивание ворса ($l = 3,0$ мм, $U = 56$ кВ):
 $1 - \alpha = 0^\circ$; $2 - \alpha = 14^\circ$; $3 - \alpha = 21^\circ$

Все изложенное подтверждает высокую эффективность применения предложенных устройств особенно с учетом их простоты и дешевизны.

Таким образом, предлагаемые способы повышения эффективности процесса флокирования не требуют сложных и дорогих устройств и в то же время представляются достаточно удачными для повышения скорости выпуска рулонных флокированных материалов при одновременном сокращении вылета ворса из зоны нанесения.

9.3. Применение неоднородного электрического поля для формирования многоцветных ворсовых узоров

В работах [92], [96] была показана интересная возможность создания ворсовых узоров на основе использования неоднородного электрического поля. В отличие от способа получения ворсовых рисунков с помощью специальных ограничивающих сетчатых шаблонов для нанесения ворса, т. е. способа печати ворсом [93]–[95], который можно считать традиционным, упомянутый способ проще и дешевле в реализации. Этот способ отличается тем важным моментом, что из одного бункера подают смесь двух ворсов разного цвета и с разными электрофизическими свойствами [92]. Идея способа весьма интересна, но представляется не вполне технологичной. Это связано с использованием смеси двух ворсов, свойства которых постепенно выравниваются, и эффект исчезает. Во-

вторых, возможности метода ограничены только двумя цветами и сравнительно простыми узорами. Возможность использования только двух цветов связано с тем, что их электрическое сопротивление должно существенно отличаться, но при этом соответствовать требованиям для технологии электрофлорирования. Образцы, полученные с применением такого варианта технологии, будут представлены в последнем разделе.

Данный раздел посвящен разработке технологии получения многоцветных ворсовых узоров путем последовательного нанесения ворса разного цвета в неоднородном электрическом поле [105], [112], [115]. Указанный способ непосредственно использует специфику движения ворса в неоднородном поле.

9.3.1. Обоснование возможности создания ворсовых узоров в неоднородном электрическом поле

Применение последовательного нанесения ворсов в неоднородном электрическом поле дало возможность разработать технологию [102]–[105], [112], [115], обладающую гораздо большим спектром возможностей. Сюда, в первую очередь, относится возможность управления структурой получаемого узора путем выбора параметров электрического поля. Для изучения характера влияния различных параметров поля на динамику изменения плотности ворсового покрытия на поверхности основы можно использовать математическое описание неоднородного электрического поля (9.10), (9.11), приведенное в подразд. 9.1.2. Несмотря на сравнительную простоту поля параллельных проводников, характер влияния его параметров должен быть таким же, как и у полей более сложной конфигурации. Выводы, сделанные на основе таких расчетов, можно проверить на основе эксперимента. Для анализа процесса движения ворса в неоднородном поле необходимо проводить численные расчеты. Это связано с тем, что в каждой следующей точке на траектории ворсинки изменяются как параметры ее движения (координата, скорость и ускорение), так и характеристики электрического поля в данной точке пространства (составляющие напряженности электрического поля).

На ворсинку при движении в таком неоднородном электрическом поле действуют следующие силы: сила электростатического взаимодействия, вес ворсинки и сила аэродинамического сопротивления.

Составляющие силы электростатического взаимодействия легко вычислить, зная составляющие напряженности электрического поля (9.10) и (9.11), а составляющие силы аэродинамического сопротивления – на основе выражения (1.2). При этом необходимо учитывать, что коэффициенты аэродинамического сопротивления вдоль волокна и поперек его оси различны, причем скорость движения в поперечном направлении значительно ниже и, следовательно, можно учитывать только линейную зависимость от скорости ворсинки.

Исходя из напряженности поля и заряда ворсинки можно определить силу электростатического взаимодействия, действующую на ворсинку и далее, учтя аэродинамическое сопротивление и вес, вычислить составляющие ускорения ворсинки в произвольной точке (x, y) : a_x и a_y .

С таким ускорением и начальной скоростью, имеющей составляющие v_{x0} , v_{y0} ворсинка через промежуток времени Δt перемещается к следующей точке поля, где составляющие ее скорости (v_x , v_y) равны

$$v_{x,i} = v_{x,i-1} + a_{x,i}\Delta t, \quad v_{y,i} = v_{y,i-1} + a_{y,i}\Delta t. \quad (9.12)$$

Исходя из скорости, ускорения и координаты ворсинки в предыдущей точке, можно вычислить координаты этой ворсинки в следующей точке через промежуток времени Δt :

$$x_i = x_{i-1} + v_{x,i-1}\Delta t + \frac{a_{x,i-1}\Delta t^2}{2}, \quad y_i = y_{i-1} + v_{y,i-1}\Delta t + \frac{a_{y,i-1}\Delta t^2}{2}. \quad (9.13)$$

Используя эти кинематические соотношения совместно с описанием неоднородного поля (6.10), (6.11), можно, задавая координаты вылета ворсинки и проводя последовательные вычисления вплоть до момента достижения ворсинкой нижнего электрода, определить координаты ее «приземления». Такой вычислительный процесс позволяет моделировать теоретическое распределение поверхностной плотности ворса на поверхности основы [7]. Таким образом, используя программу, действующую в соответствии с данным алгоритмом, можно исследовать распределение плотности ворсинок на поверхности образца от времени, а также оценивать влияние на это распределение основных параметров процесса (напряжение, межэлектродное расстояние, параметры промежуточного электрода) и заряда ворсинок.

Разработанная программа, вычисляющая координату закрепления ворсинки в клеевом слое в зависимости от координаты вылета ворсинки из бункера (x), параметров ворса (l , d , m) и параметров процесса флокирования (U_0 , h , d , r_0) и учитывающая распределение составляющих напряженности электрического поля (9.10), (9.11), позволяет проводить численный эксперимент. Расчет для каждой ворсинки был проведен последовательными шагами через заданные промежутки времени.

В расчетах принималось, что по одной ворсинке вылетает из бункера через каждые 0,5 мм сетки верхнего электрода на интервале между проводниками промежуточного электрода ($d = 35$ мм). Период, за который все эти вылетевшие ворсинки достигают нижнего электрода, назван одним циклом. В реальном процессе флокирования значительное число ворсинок вылетает из бункера одновременно, поэтому в расчете время флокирования сопоставлялось с количеством указанных циклов.

Для наглядного отображения распределения ворса в интервале между проекциями проводников промежуточного электрода на гистограмме (рис. 9.15) показано расчетное распределение ворса в первоначальный момент (за 1 цикл) и результаты оценки плотности ворсового покрытия образца, полученного за 2 с флокирования, методом оптического пропускания.

Параметры процесса были выбраны следующие:

$U_0 = 35$ кВ; $h = 7$ см; $d = 35$ мм; $r_0 = 1,5$ мм; $l = 1$ мм; $T = 0,33$ текс.

Полученный расчетным путем характер распределения ворса качественно вполне соответствует реальному распределению на основе.

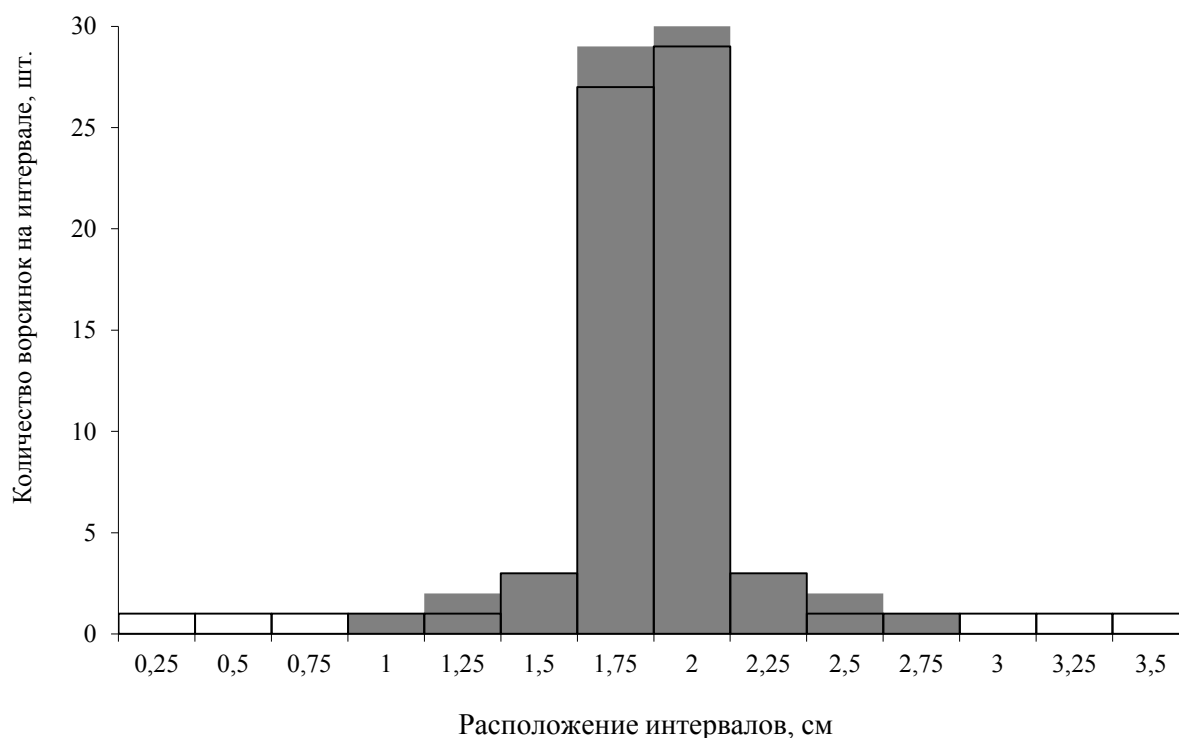


Рис. 9.15. Распределение ворсинок на нижнем электроде в начальный момент времени:
 ■ – расчет; □ – эксперимент

На основе описанной выше модели движения ворса в неоднородном электрическом поле было рассчитано распределение его плотности на нижнем электроде. Для этого были проведены 50 циклов расчетов, что соответствует вылету 100 ворсинок на 1 мм ширины интервала между проводниками промежуточного электрода. Это вполне достаточная статистика для расчета распределения плотности ворса. Кроме того, в расчетах было учтено, что в реальном процессе плотность ворса не может расти беспредельно, всегда существует значение предельной плотности $n_{\max}$, к которому плотность стремится, но не достигает.

При проведении расчетов было принято, что увеличение числа ворсинок на каждом миллиметре ширины прекращается при достижении определенного значения. Это ведет к тому, что на каком-то этапе рост плотности в области тах прекращается (в реальности – резко замедляется), а на удалении от тах продолжается (рис. 9.16). Следовательно, будет происходить увеличение ширины ворсовой полосы. Это четко видно при проведении экспериментальных исследований.

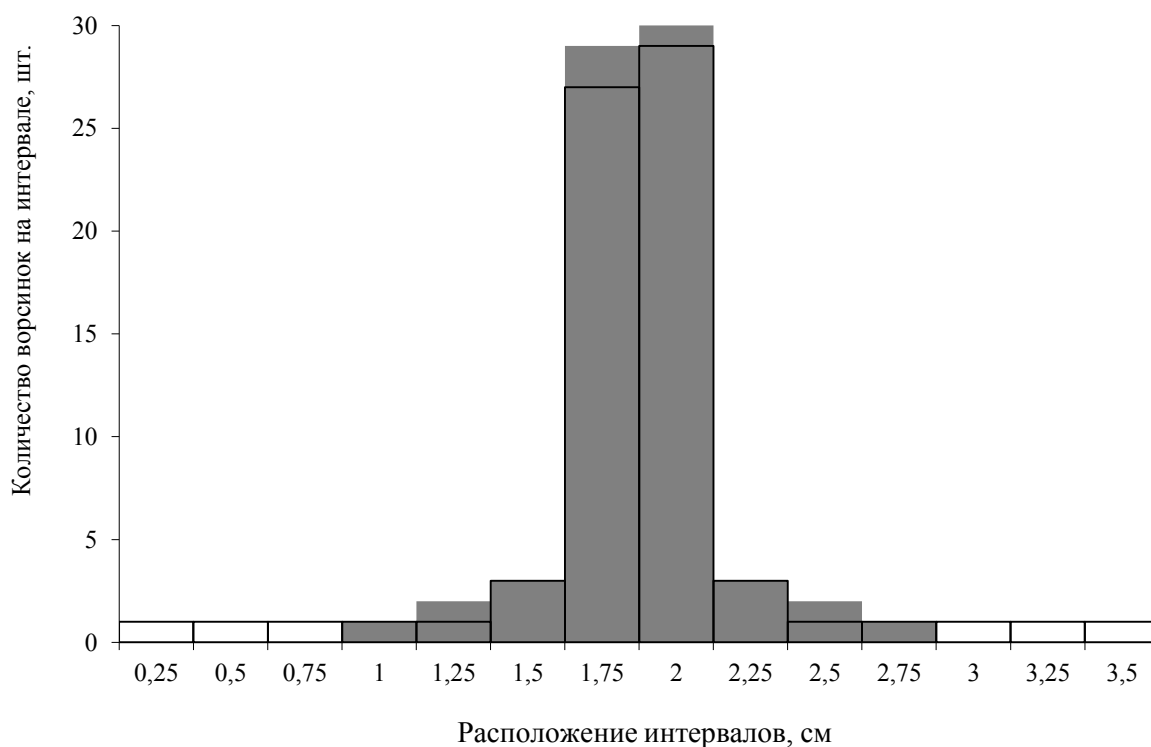


Рис. 9.16. Расчетное распределение ворса на нижнем электроде:

■ – 35 циклов; ■ – 25 циклов; ■ – 5 циклов; □ – 1 цикл

Экспериментальные значения плотности ворсового покрытия получали на образцах после флокирования в течение 6 с. Измерение плотности было проведено через каждые 2,5 мм с помощью оптоэлектронного прибора измеряющего оптическое пропускание ворсового покрытия по методике [84], [85].

Анализ полученных гистограмм показал достаточно хорошее совпадение расчетных результатов с данными эксперимента. Возможное расхождение результатов эксперимента с расчетами можно объяснить, во-первых, отсутствием учета повторных перезарядок ворса при расчете и, во-вторых, не идеальностью условий флокирования.

10. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ВОРСА НА ПЛОСКИЕ ТЕКСТИЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Оптимизация процесса флокирования, как и оптимизация любого технологического процесса, предполагает наличие математических моделей, описывающих этот процесс, выбор критерия оптимизации, управляемых переменных и ограничений задачи. Выбор критерия оптимизации зависит от предполагаемой области применения материала, т. е. его назначения и требований, предъявляемых к материалу, в зависимости от условий его эксплуатации, а также общих требований к эксплуатации технологической линии.

Вероятно, самым распространенным и используемым критерием оптимизации можно считать производительность технологического процесса. В технологии электрофлокирования понятие производительности связано с продолжительностью нанесения ворса t_0 , которая обеспечивает получение заданной плотности ворсового покрытия n_0 . При производстве флокированных материалов регламентируется величина плотности ворсового покрытия и его стойкость к истиранию. Поэтому задачу оптимизации в данном случае можно сформулировать следующим образом: выбрать режим нанесения ворса, имеющего известные геометрические и электрофизические свойства, обеспечивающий минимальное время формирования заданной плотности ворсового покрытия при напряжении на электродах не более $U_{\max}$ (определяется характеристиками источника высокого напряжения) и напряженности электрического поля не более $E_{\max}$ (определяется условиями возникновения электрических разрядов между электродами).

Величина продолжительности флокирования вычисляется достаточно просто на основе соотношений:

$$t_0 = -\frac{n_{\max}}{P} \ln \left(1 - \frac{n_0}{n_{\max}} \right) = -\tau \ln \left(1 - \frac{n_0}{n_{\max}} \right). \quad (10.1)$$

Зная продолжительность флокирования и длину зоны нанесения, легко определить необходимую скорость движения рулонного материала. Длительность нанесения ворса связана с технологическими режимами процесса (напряжением, расстоянием между электродами, скоростью поступления ворса к материалу) и со свойствами ворса (длина и диаметр, линейная плотность, заряд, электрическое сопротивление или электропроводность). Все упомянутые факторы являются, в той или иной мере, управляемыми переменными. Некоторые из факторов можно изменять легко, а некоторые фактически невозможно. Такой параметр, как заряд ворса, зависит как от условий нанесения (напряженность электрического поля), так и свойств ворса (электрическая проводимость).

Ограничения задачи могут быть связаны с возможностями источника высокого напряжения и камеры флокирования. Так, например, максимальное значение напряжения для источников высокого напряжения, применяемых в этой технологии, обычно не превышает 100 кВ, а напряженность электрического поля между электродами не превышает 8 кВ/см из-за опасности электрических пробоев.

В качестве модели можно использовать описание процесса изменения плотности ворсового покрытия при осаждении ворса от продолжительности его нанесения, которое, как мы видели ранее, можно описать с использованием несколько различающегося набора переменных:

$$n(t) = n_{\max}(1 - e^{-Pt/n_{\max}}), \quad n(t) = n_{\max}(1 - e^{-t/\tau}), \quad (10.2)$$

где P – скорость поступления ворса, $1/(\text{мм}^2\text{с})$ или $\text{г}/(\text{м}^2\text{с})$;

$n_{\max}$ – предельная плотность ворсового покрытия, $1/\text{мм}^2$ или $\text{г}/\text{м}^2$;

τ – постоянная времени, с.

Выражение позволяет вычислить либо плотность ворсового покрытия при заданной продолжительности осаждения ворса, т. е. характеристику получаемого материала, либо время достижения заданной плотности ворсового покрытия (10.1), т. е. производительность процесса.

Входящие в выражение (10.1) параметры следует определить подробнее. *Скорость подачи, т. е. скорость поступления ворса*, может быть определена либо как количество ворсинок, поступающее к поверхности материала площадью 1 м^2 , который расположен перпендикулярно направлению движения ворсинок, за 1 с (p , $1/\text{м}^2\text{с}$), либо как массу ворса, поступающую к поверхности материала площадью 1 м^2 , который расположен перпендикулярно направлению движения ворсинок, за 1 с (P , $\text{кг}/\text{м}^2\text{с}$).

Предельную или максимальную плотность ворсового покрытия определяют как плотность, получаемую при неограниченной длительности нанесения. Т. е. с увеличением времени флокирования плотность ворсового покрытия асимптотически приближается к некоторой предельной величине, которая была обозначена как $n_{\max}$.

Полнота такого описания процесса выражением (10.2) достаточно обоснованно подвергалась сомнению, но, несмотря на простоту и, возможно, неполноту, оно показывает ключевое значение указанных величин для процесса флокирования (рис. 10.1, 10.2).

На рис. 10.1 для наглядности показан вид зависимости плотности ворсового покрытия, получаемой на поверхности материала, от продолжительности нанесения при различной скорости подачи ворса. Вывод здесь достаточно тривиален – возрастание скорости подачи ворса ведет к сокращению времени достижения требуемой плотности ворсового покрытия.

Второй график (рис. 10.2) представляется более интересным, поскольку показывает, что увеличения производительности можно достичь и путем улучшения ориентации ворса, т. е. величины максимальной плотности ворсового покрытия на поверхности основы.

Два представленных графика демонстрируют, что влиять на скорость осаждения ворса путем выбора условий нанесения или свойств ворса можно лишь через посредство двух указанных параметров: чем лучше ориентация ворса (предельная плотность ворсового покрытия) и выше скорость поступления ворса к флокируемой поверхности, тем выше будет производительность. С точки зрения режима флокирования для достижения максимальной производи-

тельности необходимо обеспечить максимальную напряженность электрического поля (при отсутствии электрических разрядов между электродами). Можно рассмотреть и другую комбинацию параметров, например, предельную плотность ворсового покрытия и постоянную времени. Принципиально это ситуацию не меняет. Однако не все так просто.

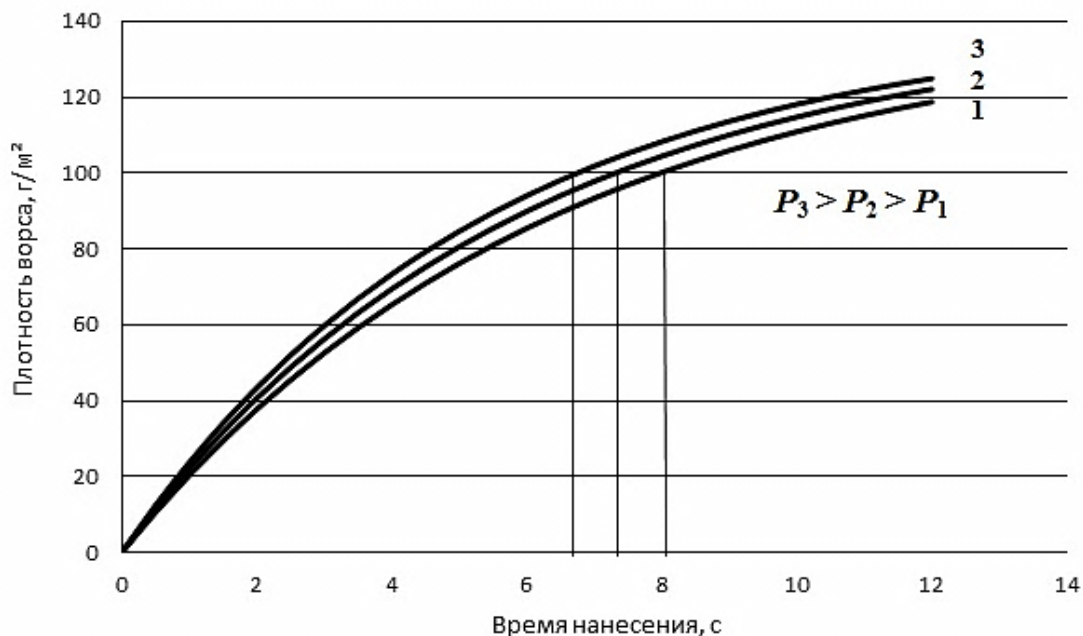


Рис. 10.1. Зависимость плотности ворсового покрытия от длительности нанесения при различной скорости подачи ворса

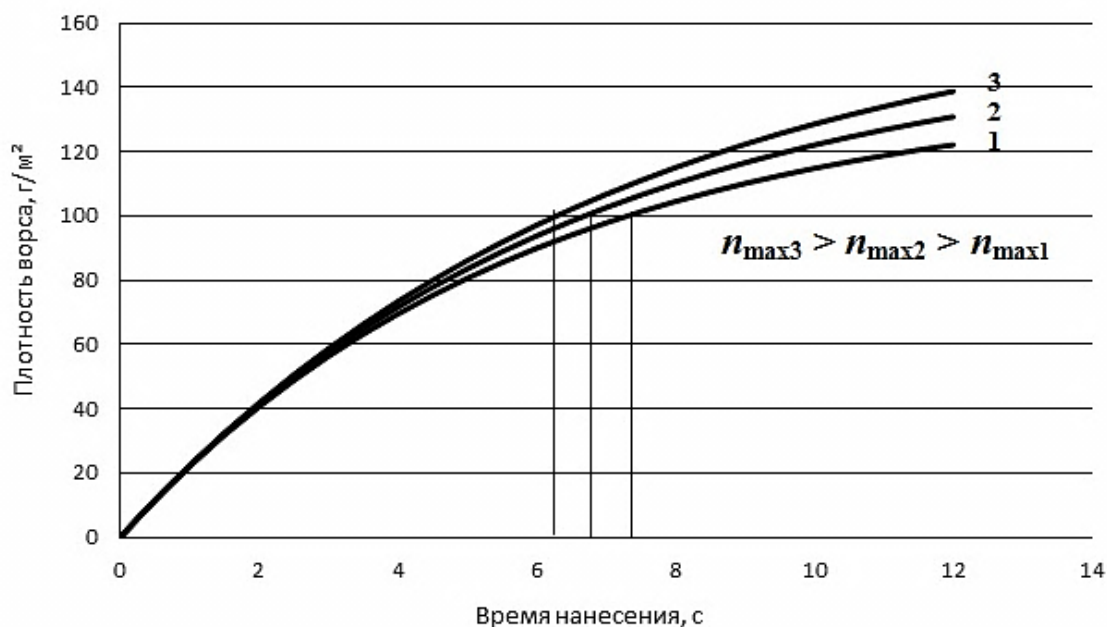


Рис. 10.2. Плотность ворсового покрытия от длительности нанесения при разной максимальной плотности ворсового покрытия

Вопрос заключается в том, насколько и как можно управлять скоростью поступления ворса к поверхности материала или постоянной времени и предельной плотностью ворсового покрытия?

Мы будем рассматривать максимальную величину скорости поступления ворса. «Максимальная» в данном случае означает, что для ворса с известными характеристиками (геометрические размеры, электрическое сопротивление, коэффициент зарядки) и при заданных условиях флокирования скорость поступления ворса можно уменьшить, но не увеличить больше максимального значения. Т. е. мы не будем учитывать ограничения, накладываемые конструкцией подающего бункера, например, размером ячеек сетки. Оценка максимальной скорости подачи ворса на основе соотношения (5.21) носит приближенный характер. Соотношение (5.13) носит более общий характер. Поэтому на его основе проанализируем возможные пути влияния на скорость поступления ворса. Будем считать материал и геометрические характеристики ворса неизменными: выбираем полиамидное волокно линейной плотностью 0,33 текс, $l = 1$ мм, $d = 20$ мкм, $m = 3,3 \cdot 10^{-10}$ кг. Так как изменяемыми параметрами могут быть напряженность E , расстояние между электродами h и коэффициент зарядки ворса k , изучим степень влияния этих факторов последовательно.

10.1. Влияние условий нанесения ворса на параметры технологического процесса

1. Влияние напряженности электрического поля

Примем расстояние между электродами равным $h = 0,1$ м, максимальное значение коэффициента зарядки для ворса длиной 1 мм $k_{\max} = 7,45 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В (табл. 4.3). Используем реальный диапазон изменения напряженности (от 3 до 6 кВ/см). Результаты расчетов представлены в табл. 10.1. В первой графе – значения напряженности, во второй – вычислено значение напряженности около заряжающего электрода (5.18), в 3-й графе – величина заряда ворса, соответствующая $k_{\max}$, в 4-й графе – значение максимальной скорости подачи ворса (5.13). Оценка максимальной скорости подачи из соотношения (5.21) дает постоянное значение $P_{\max} = 14,1$ г/(м²·с).

Т а б л и ц а 10.1. Влияние напряженности

E , кВ/см	E_0 , кВ/см	q , Кл	P , г/(м ² ·с)
1	2	3	4
3,0	2,46	$1,84 \cdot 10^{-12}$	13,22
3,5	2,96	$2,21 \cdot 10^{-12}$	13,35
4,0	3,46	$2,58 \cdot 10^{-12}$	13,45
4,5	3,96	$2,95 \cdot 10^{-12}$	13,53
5,0	4,46	$3,33 \cdot 10^{-12}$	13,59
5,5	4,96	$3,70 \cdot 10^{-12}$	13,64
6,0	5,46	$4,07 \cdot 10^{-12}$	13,68

Здесь важно обратить внимание на то, что вид зависимости в области малых значений напряженности может быть не достоверным, поскольку соотношение (5.13) получено для условия $qE \gg mg$. При напряженности $E < 2$ кВ/см оно может выполняться не всегда: при малых значениях коэффициента зарядки

вес волокна может превышать силу электростатического взаимодействия ворсинки с электрическим полем.

Мы наблюдаем, что значение максимальной скорости поступления ворса практически не зависит от напряженности в рабочем диапазоне (от 3 до 6 кВ/см).

2. Влияние расстояния между электродами h

Чтобы изучить влияние расстояния между электродами, будем считать, что напряженность поля остается постоянной ($E = 4$ кВ/см). Т. е. при изменении расстояния синхронно изменяется напряжение.

Диапазон изменения расстояния был принят от 5 до 12 см.

Расчетная таблица будет выглядеть следующим образом (табл. 10.2): 1-я графа – значения расстояния; 2-я графа – это величина напряженности (5.18) около заряжающего электрода; 3-я графа – заряд ворса; в 4-й графе – максимальная скорость поступления ворса (5.13).

Т а б л и ц а 10.2. Влияние расстояния между электродами

h , см	E_0 , кВ/см	q , Кл	P , г/(м ² с)
1	2	3	4
5	3,62	$2,70 \cdot 10^{-12}$	13,65
6	3,59	$2,67 \cdot 10^{-12}$	13,60
7	3,55	$2,65 \cdot 10^{-12}$	13,56
8	3,52	$2,62 \cdot 10^{-12}$	13,52
9	3,49	$2,60 \cdot 10^{-12}$	13,49
10	3,46	$2,58 \cdot 10^{-12}$	13,45
11	3,44	$2,56 \cdot 10^{-12}$	13,42
12	3,41	$2,54 \cdot 10^{-12}$	13,38

Вновь мы наблюдаем очень слабое влияние. Изменение расстояния на 140 % приводит к изменению скорости подачи на 2 %.

Т. е. мы можем искусственно снизить скорость поступления ворса (например, изменяя размер ячейки сетки), но не можем увеличить.

3. Влияние коэффициента зарядки

Фактически это означает исследование влияния качества ворса. Это можно сделать, изменяя коэффициент зарядки от 0 до $k_{\max}$. Коэффициент, равный 0, соответствует необработанному ворсу, который не заряжается в электрическом поле. Здесь удобно использовать коэффициент, изменяющийся в диапазоне от 0 до 1. Он определяет долю от максимального значения коэффициента зарядки ($7,45 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В) или заряда. Все остальные параметры, касающиеся ворса и режима флокирования, те же, что и раньше. Результаты расчетов для этого случая представлены в табл. 10.3.

На рис. 10.3 показана зависимость скорости поступления ворса (5.13) от величины коэффициента зарядки ворса при напряженности $E = 4$ кВ/см. Здесь мы видим значительное снижение скорости поступления ворса при росте коэффициента зарядки, что и наблюдается на практике.

Таким образом, наиболее сильное влияние на эту характеристику оказывает коэффициент зарядки ворса, т. е. электрофизические параметры ворса.

Т а б л и ц а 10.3. Влияние коэффициента зарядки

$k/k_{\max}$	E_0 , кВ/см	q , Кл	P , г/(м ² ·с)
0,1	2,31	$1,72 \cdot 10^{-13}$	118,23
0,2	2,80	$4,18 \cdot 10^{-13}$	62,77
0,3	3,02	$6,75 \cdot 10^{-13}$	42,87
0,4	3,15	$9,40 \cdot 10^{-13}$	32,60
0,5	3,24	$1,21 \cdot 10^{-12}$	26,32
0,6	3,31	$1,48 \cdot 10^{-12}$	22,08
0,7	3,36	$1,75 \cdot 10^{-12}$	19,02
0,8	3,40	$2,03 \cdot 10^{-12}$	16,71
0,9	3,44	$2,30 \cdot 10^{-12}$	14,90
1,0	3,46	$2,58 \cdot 10^{-12}$	13,45

На рис. 10.3 для наглядности эта зависимость представлена в виде графика.

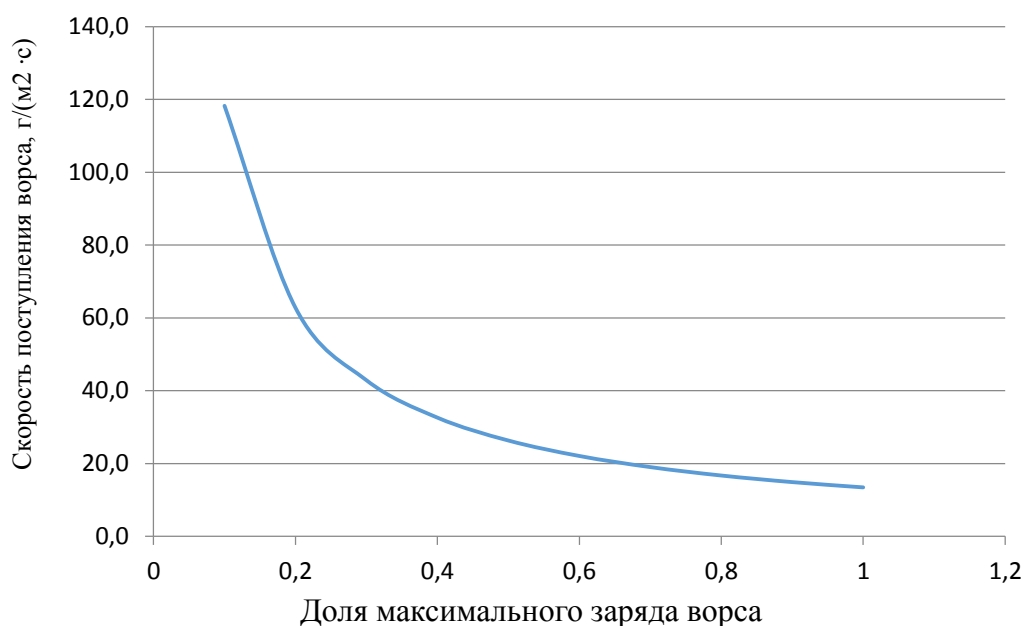


Рис. 10.3. Влияние коэффициента зарядки на скорость поступления ворса ($E = 4$ кВ/см)

Как мы видим на графике, для плохо заряжающегося ворса (малый коэффициент зарядки) легко можно обеспечить высокую скорость его поступления P к поверхности материала. Однако, как мы увидим ниже, здесь имеется и существенный отрицательный момент: малый коэффициент зарядки ведет к плохой ориентации ворса на поверхности и, как следствие, к низкой предельной плотности ворсового покрытия $n_{\max}$. А это может снижать производительность. Кроме того, малый заряд ведет к малой скорости ворсинки (5.37), малой кинетической энергии и, следовательно, к малой глубине внедрения в клеевой слой и низкой прочности закрепления.

Второй параметр, определяющий производительность процесса, – это предельная плотность ворсового покрытия. Как было показано выше, этот параметр зависит от напряженности электрического поля. При прочих равных условиях, чем выше напряженность, тем больше $n_{\max}$. Физически это понятно: чем выше напряженность электрического поля, тем лучше ворс с распределенным по его длине зарядом ориентируется вдоль силовых линий. Однако ориентация ворса в электрическом поле связана также со свойствами ворса. В первую очередь, это относится к коэффициенту зарядки ворса, который, в свою очередь, связан с его электропроводностью.

10.2. Влияние заряда ворса на производительность процесса флокирования

Как было показано выше и, например, в работе [19] скорость подачи ворса при флокировании P можно увеличивать лишь до определенного предела, который приближенно оценивается из следующего соотношения (5.21):

$$P_{\max} = \frac{\varepsilon_0 C}{k}, \quad (10.3)$$

где $C = 1,11 l (d - 9,3 \cdot 10^{-6})$ – коэффициент пропорциональности для силы аэродинамического сопротивления [9, с. 15] движению ворсинки $F_c = C \cdot v$, l – длина ворсинки, м; d – диаметр ворсинки, м; v – скорость ворсинки, м/с; k – коэффициент зарядки ворса (коэффициент пропорциональности между напряженностью и средним зарядом ворса), Кл·м/В.

Дальнейшее увеличение скорости подачи ворса невозможно из-за структуры объемного заряда в межэлектродном пространстве.

Для подтверждения реальности этого вывода, полученного из теоретических построений, были проведены исследования, результаты которых приведены в табл. 10.4. Для четырех видов ворса одинаковой природы и геометрических размеров (ПА, $l = 0,5$ мм, $T = 0,33$ текс) показаны значения максимальной скорости подачи ворса $P_{\max, \text{э}}$ и максимальной плотности ворсового покрытия $n_{\max}$, определенные из экспериментальной зависимости плотности ворсового покрытия от длительности нанесения ворса [25]. В этой же таблице представлены результаты измерения среднего заряда ворса q и коэффициента зарядки k [2]. Все измерения проведены для одной напряженности $E = 6$ кВ/см. Кроме того, в таблице представлена измеренная величина скорости подачи для каждого ворса при отсутствии напряжения на электродах флокатора. Это показывает влияние объемного заряда: при включении напряжения ворс заряжается, и скорость подачи резко снижается.

Полученные результаты показывают, что оценочные значения максимальной скорости подачи ворса $P_{\max}$, полученные на основе измерения заряда и определения коэффициента зарядки ворса (5.21), совпадают с результатами, определенными непосредственно в процессе флокирования $P_{\max, \text{э}}$, и, самое главное, максимальная скорость подачи ворса ограничена этой величиной.

Все это убедительно свидетельствует о том, что максимальное значение скорости подачи ворса увеличить механически нельзя. Она зависит только от геометрических и электрофизических параметров ворса. При достижении максимальной скорости подачи ворса увеличить производительность, т. е. снизить продолжительность флокирования можно путем увеличения максимальной плотности ворсового покрытия, т. е. улучшая ориентацию ворса на поверхности материала. Это достигается повышением напряженности электрического поля в зоне флокирования насколько это возможно или использованием более качественного ворса (высокий коэффициент зарядки). На пути увеличения напряженности также существует ограничение, связанное с возникновением электрических пробоев между электродами. Поэтому обычно не используют напряженность поля выше 6 кВ/см.

Т а б л и ц а 10.4. Технологические характеристики процесса и свойства ворса

Номер ворса	Прямые измерения			Измерение заряда		
	P_0 , г/(м ² с)	$P_{\max,э}$, г/(м ² с)	$n_{\max}$, г/м ²	q , Кл	k , Кл·м/В	$P_{\max}$, г/(м ² с)
1	150	28,8±3,6	98,1±3,8	$(1,12 \pm 0,17) \cdot 10^{-12}$	$1,87 \cdot 10^{-18}$	28,1±4,3
2	122	33,7±5,6	93,5±3,2	$(8,1 \pm 0,5) \cdot 10^{-13}$	$1,34 \cdot 10^{-18}$	39,1±2,4
3	198	37,2±1,7	76,8±0,9	$(8,6 \pm 1,0) \cdot 10^{-13}$	$1,43 \cdot 10^{-18}$	36,8±4,5
4	278	38,6±0,6	86,2±5,1	$(8,4 \pm 2,7) \cdot 10^{-13}$	$1,40 \cdot 10^{-18}$	37,5±12,1

Таким образом, оптимальные условия флокирования для достижения максимальной производительности можно сформулировать следующим образом: необходимо создать условия, обеспечивающие приобретение ворсом максимального заряда для наилучшей ориентации ворса. Это достигается созданием максимальной для данных условий напряженности электрического поля, а скорость подачи следует установить максимальной для данного ворса (5.21).

10.3. Оценка оптимального заряда ворса для минимизации продолжительности флокирования

Попробуем теоретически обосновать наличие оптимального значения заряда или коэффициента зарядки ворса. В качестве критерия оптимизации выберем минимум интервала времени t_0 , необходимого для формирования ворсового покрытия заданной поверхностной плотности n_0 .

Рассмотрим возможность влияния на производительность через электрофизические характеристики используемого ворса. Из всех измеряемых характеристик ворса на факторы, определяющие производительность, наибольшее влияние

оказывает коэффициент зарядки k . Он фактически определяет величину заряда ворса при известной напряженности. С увеличением этого параметра скорость подачи ворса снижается (5.21), т. е. производительность должна уменьшаться.

В то же время между коэффициентом зарядки и ориентацией ворса очевидно должна наблюдаться четкая корреляция. С ростом напряженности улучшается ориентация и возрастает $n_{\max}$. Одновременно с этим растет заряд ворса. Рост заряда ведет и к более сильному разделению заряда по длине ворсинки. Такое распределение плотности заряда по отношению к ориентации ворсинки действует аналогично дипольному моменту и, следовательно, также должно улучшать ориентацию ворса в электрическом поле. Взаимосвязь предельной плотности с напряженностью электрического поля выглядит следующим образом:

$$n_{\max} = n_0 + aE, \quad (10.4)$$

где n_0 – плотность ворсового покрытия при отсутствии электрического поля, г/м²; a – коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств ворса, г/(В·м).

Минимальное значение предельной поверхностной плотности ворсового покрытия $n_{\max}$ не равно нулю (n_0). Даже если электрического поля нет и ворс не ориентирован, он покрывает поверхность материала с клеевым слоем. Когда же поле есть, но ворс не обработан и, как следствие, не заряжается, все-таки существует поляризация ворсинок, а значит, их ориентация, по-видимому, будет даже несколько лучше, чем при отсутствии поля.

Представленная зависимость (10.4) достаточно очевидна, и она неоднократно подтверждена экспериментально. Однако если учесть взаимосвязь заряда ворса с напряженностью $q = kE$ и тот факт, что величина «дипольного момента» ворсинки, влияющего на ее ориентацию, должна быть связана с величиной заряда, то соотношение (10.4) можно переписать с учетом коэффициента зарядки ворса k при заданном значении напряженности E :

$$n_{\max} = n_0 + b \cdot k \cdot E, \quad (10.5)$$

где b – новый коэффициент пропорциональности, г/(м²Кл).

Величина n_0 , характеризующая плотность ворсового покрытия, формируемого без напряжения на электродах, не зависит от электрофизических характеристик ворса, а связана только с его размерами и плотностью. При оценке максимального значения этой поверхностной плотности можно исходить из наибольшего количества ворсинок, которые могут разместиться на плоскости горизонтально. Т. е. можно приближенно записать

$$n_0 = \frac{T10^{-3}}{d} = 5\sqrt{10\pi\rho T}, \quad (10.6)$$

где d – диаметр ворсинки, м; ρ – плотность материала ворса, г/см³; T – линейная плотность волокна, текс.

Эта оценка начальной плотности сугубо приближенная. Реальная плотность ворсового покрытия для ворса без химической обработки, вероятно, будет выше из-за поляризации волокна в электрическом поле.

Таким образом, мы знаем, что с ростом коэффициента зарядки k максимальная скорость подачи снижается, а предельная плотность ворсового покрытия растет. Значит, существует оптимальное значение коэффициента, который обеспечивает наименьшую продолжительность процесса нанесения ворса.

Теперь, с использованием представленных соотношений, мы можем оценить упомянутое время t_0 в зависимости от заряда ворса (коэффициента зарядки). Рассчитать этот интервал можно из соотношения (10.1)

$$t_0 = \frac{n_{\max}}{P} \ln \left(1 - \frac{n_T}{n_{\max}} \right), \quad (10.7)$$

где n_T – требуемая плотность ворсового покрытия.

С учетом эмпирического соотношения (10.5) соотношение (10.1) можно записать в следующем виде:

$$t_0 = - \frac{(n_0 + a \cdot k \cdot E)k}{\varepsilon_0 C} \ln \left(1 - \frac{n_T}{n_0 + a \cdot k \cdot E} \right). \quad (10.8)$$

Теперь можно определить коэффициент зарядки ворса, обеспечивающий минимальную длительность процесса для получения требуемой плотности ворсового покрытия при заданной напряженности электрического поля. На *рис. 10.4* показан пример функций для длительности нанесения от доли максимального заряда для ворса длиной 1 мм, линейной плотности 0,33 текс, для требуемой плотности ворсового покрова 80 г/м² при трех значениях напряженности.

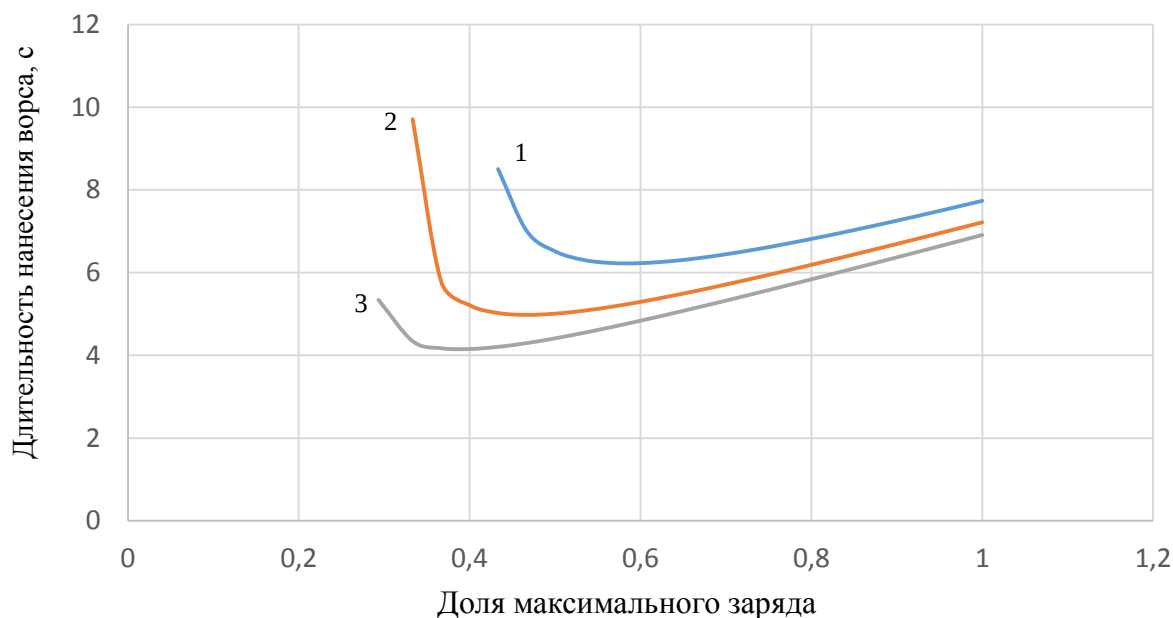


Рис. 10.4. Зависимость длительности флокирования от доли максимального заряда ворса:

1 – $E = 4$ кВ/см; $q_{\max} = 2,98 \cdot 10^{-12}$ Кл; 2 – $E = 5$ кВ/см; $q_{\max} = 3,72 \cdot 10^{-12}$ Кл;
3 – $E = 6$ кВ/см; $q_{\max} = 4,47 \cdot 10^{-12}$ Кл

На графике мы наблюдаем наличие минимальной продолжительности флокирования при определенном значении заряда или коэффициента зарядки

ворса. Наличие минимума длительности (т. е. максимума производительности) обосновано при самом общем подходе к описанию процесса. Это в перспективе теоретически дает возможность выбора ворса с нужными характеристиками.

Покажем пример выбора оптимального значения коэффициента зарядки ворса. Для ворса с характеристиками, приведенными выше, максимальное значение коэффициента зарядки равно $k_{\max} = 7,45 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В. Соотношение (10.5) имеет следующий приближенный вид с численными значениями эмпирических коэффициентов:

$$n_{\max} = 20 + 5 \cdot 10^{13} \cdot k \cdot E, \quad (10.9)$$

где использована классическая размерность использованных величин: $[k] = \text{Кл} \cdot \text{м/В}$; $[E] = \text{В/м}$.

Теперь можно рассчитать конкретные значения оптимальных коэффициентов зарядки и продолжительности флокирования для получения плотности ворсового покрытия 80 г/м^2 .

Т а б л и ц а 10.5. Оптимальные значения коэффициента зарядки

$E, \text{кВ/см}$	$q_{\max}, \text{Кл}$	$k/k_{\max}$	$q_o, \text{Кл}$	$n_{\max}, \text{г/м}^2$	$t_0, \text{с}$
4	$2,98 \cdot 10^{-12}$	0,57	$1,70 \cdot 10^{-12}$	169	6,08
5	$3,72 \cdot 10^{-12}$	0,47	$1,75 \cdot 10^{-12}$	206	4,87
6	$4,47 \cdot 10^{-12}$	0,37	$1,65 \cdot 10^{-12}$	243	4,06

Значения, приведенные в *табл. 10.5*, носят, конечно, частный характер, поскольку расчет проведен для одного значения плотности ворсового покрытия, которая должна быть на материале 80 г/м^2 , одного ворса (ПА, 1 мм) и для трех значений напряженности. Однако можно утверждать, что общие закономерности должны сохраниться для ворса разных геометрических размеров и при разных режимах флокирования.

На практике, кроме поверхностной плотности ворсового покрытия, необходимо учитывать прочность закрепления ворса в клеевом слое, что связано с его глубиной проникновения и, следовательно, с кинетической энергией ворса в момент внедрения. Учет этого ограничения, возможно, потребует несколько большего значения заряда.

Кроме производительности, в качестве критериев оптимизации процесса производства рулонных флокированных материалов могут быть предложены следующие варианты:

1. Максимум плотности ворсового покрытия при заданной длительности нанесения.
2. Наибольшая прочность закрепления ворса в клеевом слое.
3. Минимальная себестоимость материала.

Первый вариант мы рассматривать не будем, так как в этом случае рост качества материала неизбежно сопровождается значительным увеличением стоимости материала при снижении производительности.

Второй и третий варианты будут подробно рассмотрены ниже для выбора оптимальных условий достижения минимального времени получения заданной

плотности ворсового покрова (максимальная производительность) и максимальной глубины проникновения ворсинок в клеевой слой (наибольшая прочность).

10.4. Выбор оптимального режима флокирования для обеспечения максимальной прочности закрепления ворса

Критерий для выбора режима осаждения ворса, рассмотренный в предыдущем разделе, как было сказано выше, является не единственно возможным. Рассмотрим другой критерий и посмотрим, изменится ли выбор режима флокирования. Таким критерием является максимальная прочность закрепления ворса в клеевом слое. Прочность ворсового покрова, в первую очередь, зависит от качества клеевой композиции, но, не в последнюю очередь, она зависит от глубины проникновения ворса в клеевой слой. Глубина проникновения ворсинки в клей, т. е. в вязкую среду, пропорциональна энергии ворсинки. Фактически это означает, что необходимо определить скорость ворсинки в момент внедрения в клеевой слой.

Распределение ворсинок по скоростям в зависимости от их координаты представлено в разд. 5 (5.38) и в работах [19] и [54]. Если в выражение для скорости подставить значение координаты $x = h$ и выразить заряд ворсинки через напряженность поля около заряжающего электрода $q = kE_0$, то скорость в момент внедрения в клеевой слой будет выглядеть следующим образом:

$$v = \sqrt{\frac{2kjhE_0}{\varepsilon_0 C}}. \quad (10.9)$$

Далее, необходимо использовать выражения для плотности тока j и напряженности около заряжающего электрода E_0 :

$$j = \frac{\varepsilon_0 C E_0}{m}, \quad E_0 = \frac{U}{h} - C \sqrt{\frac{h}{2mk}}.$$

После преобразования выражение для скорости ворса будет включать только свойства ворса и режим флокирования:

$$v = \sqrt{\frac{2k}{m}} \left(E \sqrt{h} - \frac{C}{\sqrt{2km}} h \right). \quad (10.10)$$

Полученное соотношение записано через напряженность электрического поля E и межэлектродное расстояние h . Так как рост скорости ворсинок при увеличении напряжения или напряженности очевиден, то важно определить, существует ли оптимальное значение межэлектродного расстояния при постоянной напряженности электрического поля.

Необходимо записать выражение для кинетической энергии ворсинки в момент внедрения в клей

$$W = \frac{mv^2}{2} = k \left(E \sqrt{h} - \frac{C}{\sqrt{2km}} h \right)^2. \quad (10.11)$$

Максимум кинетической энергии ворсинки при достижении клеевого слоя соответствует определенному значению расстояния между электродами:

$$h = \frac{km}{2c^2} E^2. \quad (10.12)$$

На графике (рис. 10.5) зависимость кинетической энергии от межэлектродного расстояния представлена для различной напряженности электрического поля, а на рис. 10.6 – для ворса с разными коэффициентами зарядки.

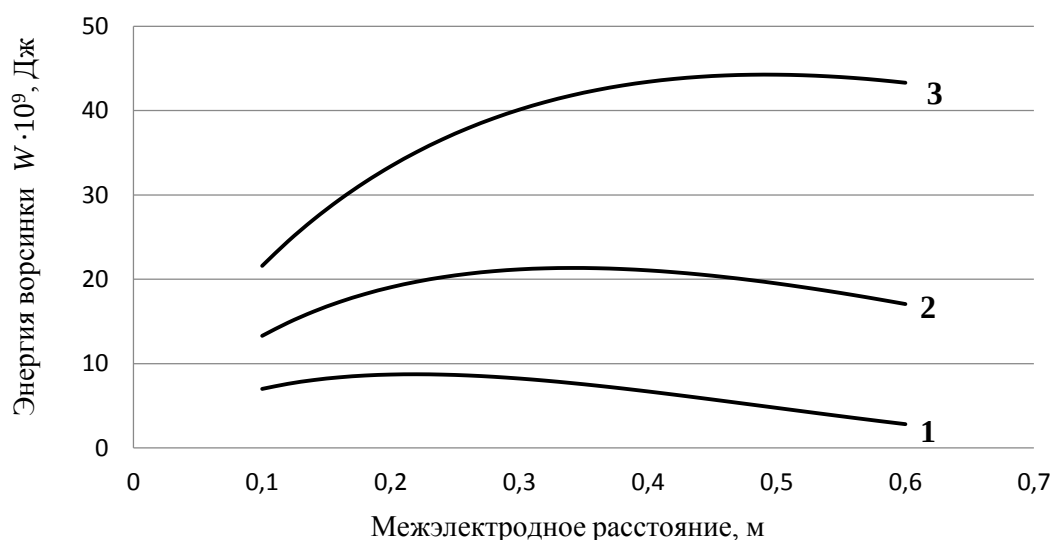


Рис. 10.5. Кинетическая энергия ворсинок при внедрении в клей для различной напряженности электрического поля:

1 – $E = 4$ кВ/см; 2 – $E = 5$ кВ/см; 3 – $E = 6$ кВ/см

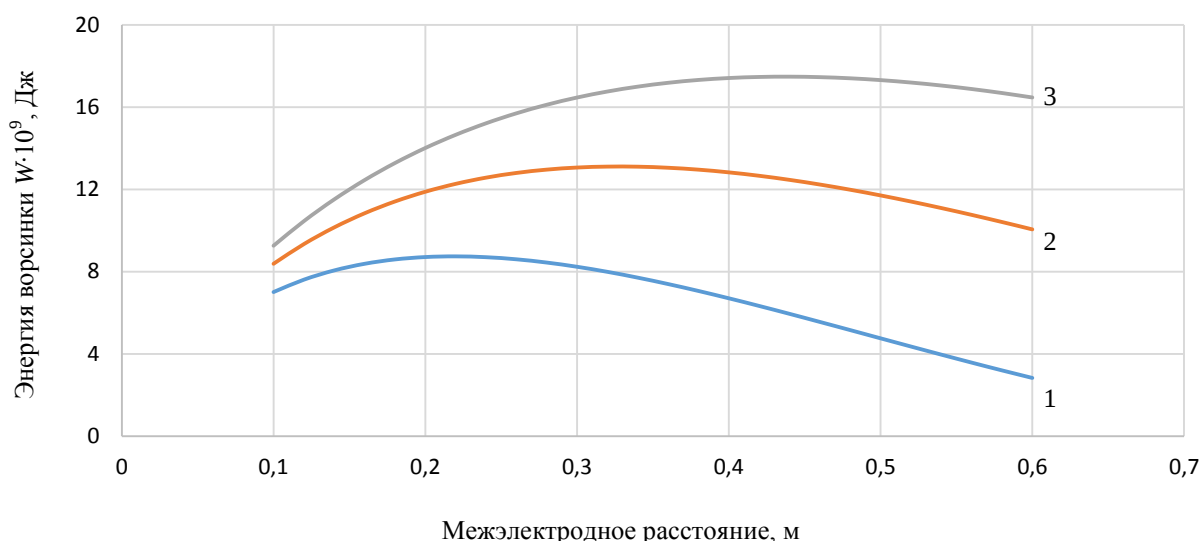


Рис. 10.6. Кинетическая энергия ворсинок при внедрении в клей для ворса с разными коэффициентами зарядки:

1 – $k = 1,0 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В; 2 – $k = 1,5 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В; 3 – $k = 2,0 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В

Из графиков видно наличие оптимального значения расстояния. Однако при анализе результатов возникает вопрос о причинах существования максимума кинетической энергии при определенном расстоянии между электродами. Казалось бы, при постоянной напряженности скорость возрастает монотонно. Но, согласно разработанной модели (5.18), возрастание расстояния h ведет к уменьшению напряженности около заряжающего электрода, а это снижает величину среднего заряда ворса и уже, как следствие этого, снижается скорость ворса. Следовательно, действительно существует оптимальное расстояние, на котором достигается максимальная энергия ворсинок.

К сожалению, этот критерий не всегда можно применить для реального технологического процесса. Значения оптимального расстояния, особенно для качественного ворса, весьма велики. Для ворса длиной 1 мм с коэффициентом зарядки $k = 5,0 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В, при напряженности $E = 5$ кВ/см оно составляет более 80 см. Это означает, что напряжение на электродах должно быть равно 400 кВ, что слишком много для существующих источников высокого напряжения. Однако, если коэффициент зарядки составляет $2,0 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В, а напряженность поля 4 кВ/см, то расстояние становится вполне реальным – 20,5 см, а требуемое напряжение – 82 кВ вполне приемлемым. Однако сознательно снижать напряженность представляется не эффективным, поскольку она сильнее влияет на скорость. Поэтому в реальности увеличения прочности закрепления ворса имеет смысл достигать путем выбора, как и в предыдущем разделе, максимального значения напряженности.

10.5. Выбор оптимального расстояния между электродами флокатора

В данном случае речь идет о влиянии межэлектродного расстояния на ориентацию ворса на поверхности материала. В разд. 7 рассмотрена ориентация ворса в процессе его движения между электродами и показано, что она определяется двумя моментами сил: моментом силы электростатического взаимодействия, ориентирующем ворсинку вдоль силовых линий, и моментом силы аэродинамического сопротивления, препятствующим этому. Эти моменты возникают, конечно, только при отклонении оси ворсинки от вектора скорости или вектора напряженности. При флокировании плоских материалов в «квазиоднородном» поле направление этих векторов совпадает. Если угол отклонения одинаков, то эти моменты можно сравнивать между собой. Первый момент не меняется в процессе движения, а второй возрастает с ростом скорости ворсинки. Если второй момент начинает преобладать, то ориентация ворсинки становится неустойчивой. Это означает, что при малейшем отклонении оси ворсинки от направления вектора скорости она теряет ориентацию, т. е. разворачивается перпендикулярно направлению движения и теряет скорость. Поэтому было высказано предположение, что наилучшая ориентация ворса достигается на таком расстоянии, где оба момента становятся равными. Можно предположить, что наилучшим расстоянием между электродами будет то, при котором равенство

упомянутых моментов возникает при достижении ворсинкой противоположного электрода.

В работе [63] было показано, что уменьшение межэлектродного расстояния при одинаковой напряженности ведет к росту плотности ворсового покрытия (при постоянной длительности нанесения). Однако сокращение расстояния может повлиять на прочность закрепления ворса в клеевом слое. Если оно мало, то скорости ворсинок недостаточны для глубокого проникновения в клеевой слой. Это может привести к получению материала с низкой стойкостью к истиранию. Поэтому для выбора расстояния необходимо оценить стойкость ворсового покрова к истиранию при разном расстоянии. Интерес представляет определение минимального расстояния между электродами, при котором скорость ворсинок будет достаточна для прочного закрепления в клеевом слое.

Для экспериментальной проверки высказанных предположений были проведены следующие исследования.

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 покрытия. Методика оценки стойкости ворсового покрытия к истиранию описана в разд. 2.4.

Для оценки стойкости ворсового покрытия к истиранию при различных расстояниях между электродами и сохранении постоянной напряженности электрического поля использовали прибор APG 1000, внешний вид которого представлен на *рис. 2.10*.

Количество циклов истирания измеряли для образцов, изготавливаемых из полиамидного ворса длиной $l = 0,5$ мм в одинаковых условиях: время нанесения ворса и время термофиксации клея при двух значениях напряженности электрического поля (4 и 5 кВ/см) и четырех значений расстояния между электродами (4, 6, 10 и 12 см) с использованием одной и той же клеевой композиции. В каждом случае было изготовлено по 5 образцов.

На *рис. 10.7* представлены флокированные образцы после истирания, что необходимо для обоснования одинаковой степени истирания для всех образцов.

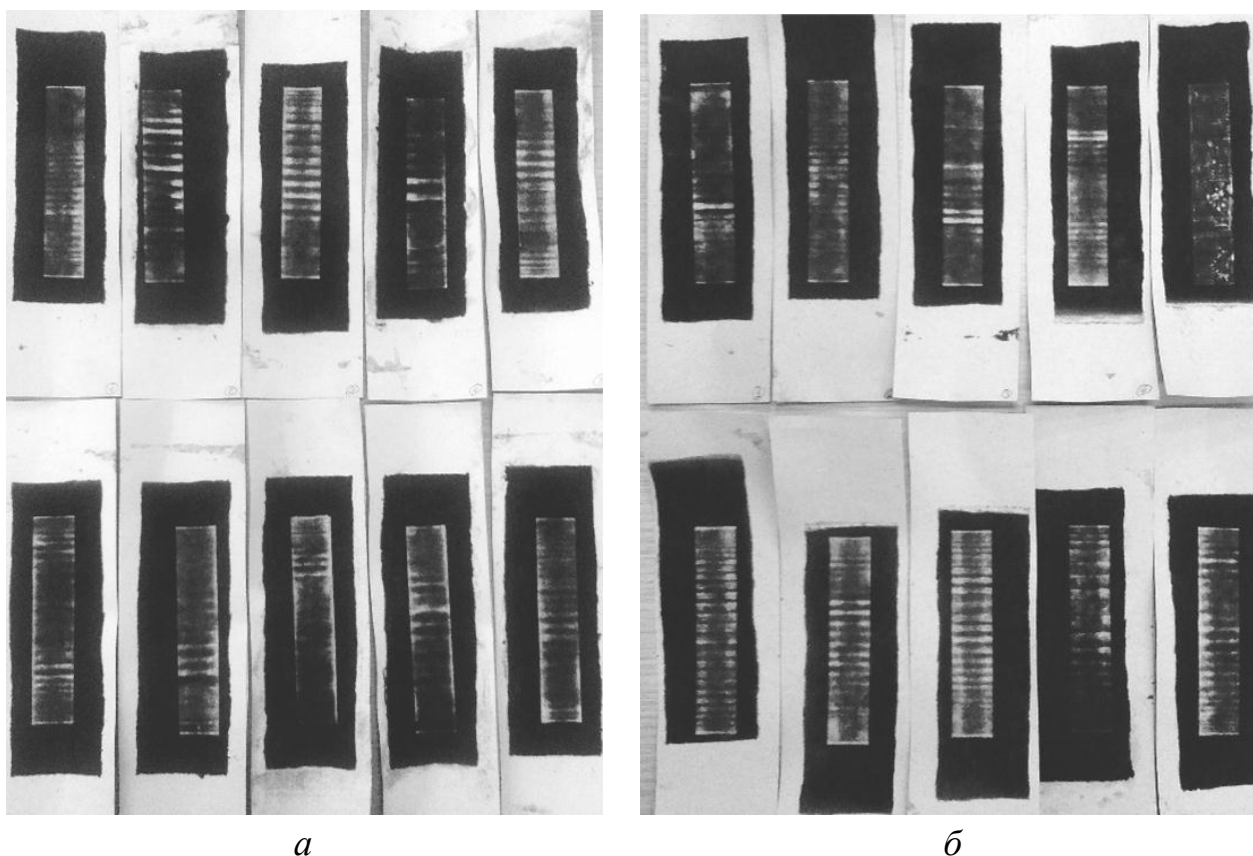


Рис. 10.7. Флокированные образцы после истирания:
а – напряженность 4 кВ/см; *б* – напряженность 5 кВ/см

Одновременно контролировали плотность ворсового покрытия с помощью массового метода определения плотности (разд. 2.4).

Результаты проведенных исследований для напряженностей E , равных 4 и 5 кВ/см, и межэлектродных расстояниях h , равных 4, 6, 10 и 12 см, представлены в табл. 10.5.

Т а б л и ц а 10.5. Плотность ворсового покрытия и стойкость к истиранию

h , см	E , кВ/см			
	4		5	
	Количество циклов истирания N	n , г/м ²	Количество циклов истирания N	n , г/м ²
4	85,2	77,2	89,4	78,8
6	101,2	75,8	104,8	77,7
10	140,8	73,0	144,8	75,1
12	179	70,9	183,6	73,2

Соответствующие зависимости плотности ворсового покрытия n и стойкости к истиранию N от межэлектродного расстояния представлены в виде линейных эмпирических зависимостей (10.13) и (10.14) для напряженностей 4 и 5 кВ/см соответственно.

$$N = 35,67 + 11,36h; \quad n = 80,38 - 0,769h. \quad (10.13)$$

$$N = 39,29 + 11,42h; \quad n = 81,73 - 0,692h. \quad (10.14)$$

Представленные эмпирические зависимости, безусловно, носят сугубо частный характер, поскольку относятся к конкретному ворсу со своим коэффициентом зарядки и электрическим сопротивлением. Однако характер влияния межэлектродного расстояния проявляется достаточно отчетливо.

Как мы видим, плотность ворсового покрытия при одинаковом времени формирования ворсового покрытия снижается с увеличением расстояния между электродами. Такая динамика подтверждает высказанное выше предположение.

Однако при увеличении расстояния между электродами возрастает, как и ожидалось, стойкость ворсового покрытия к истиранию. Поскольку все образцы получены с использованием одного клеевого состава, одного ворса, имеющего одинаковые электрофизические параметры, а термофиксация клея проводилась при одинаковых режимах, то разницу стойкости к истиранию разных образцов можно объяснить различной глубиной проникновения ворса в клеевой слой. Она будет определяться величиной кинетической энергии, которую ворсинка имеет в момент внедрения.

Выше, в разд. 10.4 была теоретически рассмотрена возможность выбора оптимального расстояния между электродами по критерию максимальной энергии ворсинок в момент внедрения в клеевой слой.

Если глубина проникновения ворсинки в клеевой слой определяется кинетической энергией ворса (10.11), внедряющегося в клей, то между ними должна быть четкая взаимосвязь.

Для выявления наличия корреляции между стойкостью к истиранию и кинетической энергией ворсинок рассчитаем энергию для ворса, имеющего нужные геометрические размеры ($l = 0,5$ мм; $d = 20$ мкм, $T = 0,33$ текс) в условиях заданной напряженности и известных расстояниях. Значение коэффициента зарядки k не влияет на динамику изменения энергии и в расчетах принято равным $2,25 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В. Соответствующие результаты представлены в табл. 10.6.

Т а б л и ц а 10.6. Взаимосвязь стойкости к истиранию и кинетической энергии ворсинок

h , см	E , кВ/см					
	4			5		
	n , г/м ²	W , Дж·10 ⁻⁸	Количество циклов истирания	n , г/м ²	W , Дж·10 ⁻⁸	Количество циклов истирания
4	77,2	1,03	85,2	78,8	1,73	89,4
6	75,8	1,42	101,2	77,7	2,43	104,8
10	73,02	2,06	140,8	75,13	3,65	144,8
12	70,9	2,32	179	73,17	4,18	183,6

Для наглядности, на *рис. 10.8* представлена зависимость стойкости к истиранию от кинетической энергии ворсинок в момент внедрения их в клеевой слой для двух значений напряженности.

Полученные результаты исследований показывают возможность оптимизации при использовании различных критериев. Критерием может быть либо обеспечение максимальной стойкости к истиранию при плотности ворсового покрытия не ниже заданной, либо максимальной плотности ворсового покрытия при стойкости к истиранию не меньше необходимой.

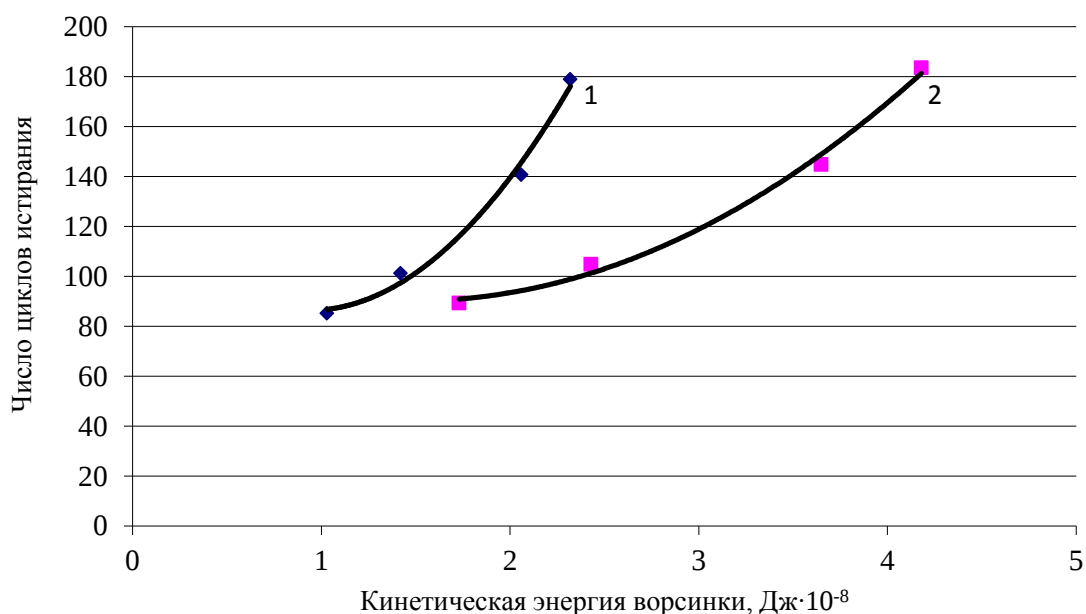


Рис. 10.8. Зависимость стойкости к истиранию от кинетической энергии ворсинок для двух напряженностей:
 $1 - E = 4 \text{ кВ/см}$; $2 - E = 5 \text{ кВ/см}$

Руководствуясь полученными результатами эксперимента и эмпирическими моделями, можно утверждать, что с ростом расстояния стойкость ворсового покрытия к истиранию возрастает, но одновременно уменьшается максимальная плотность ворсового покрытия. Это позволяет осуществлять оптимизацию с использованием различных критериев.

11. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ФЛОКИРОВАННЫХ НИТЕЙ

Все изложенное выше относительно технологии электрофлокирования носит достаточно общий характер, но, все-таки, относится, прежде всего, к получению ворсового покрытия на плоской поверхности. Нанесение ворса на такую специальную основу, как нити, т. е. технология получения флокированных нитей, имеет большое количество специфических особенностей.

Эта технология была разработана в Германии [66]. Получено значительное количество патентов [68]–[75] и на их основе создано промышленное оборудование, реализующее данную технологию. Здесь мы рассмотрим иной подход к процессу нанесения ворса на нити. Он существенно отличается по ряду принципиальных конструктивных решений, что позволяет, как нам представляется, значительно увеличить скорость выпуска нитей и обеспечить равномерное нанесение ворса по всей их поверхности.

Данный раздел посвящен разработке основ технологии и техническому решению узла флокирования для линии по производству флокированных нитей. Флокированная нить представляет собой стержневую нить, покрытую клеевым слоем, в котором радиально с высокой плотностью закреплен ворс. Такие нити используют для производства высококачественных обивочных материалов для автомобилей, морских лайнеров, мебели и т. п. Получаемые ткани, благодаря структуре флокированных нитей (до 80 % воздуха), обеспечивают высокую воздухопроницаемость при отличной термоизоляции. Широкие возможности дизайна тканей обеспечиваются за счет использования флокированных нитей разного цвета и линейной плотности, а также различных переплетений. Все это, в сочетании с высокой износостойкостью, делает их незаменимыми там, где необходимо сочетать высокую долговечность при интенсивной эксплуатации с привлекательным внешним видом.

Эта технология является одной из самых сложных в области электрофлокирования и при этом очень мало описана в литературе. Поэтому в данном разделе будут проанализированы основные технологические процессы, реализуемые при получении флокированных нитей, предложены решения для реализации этих процессов, а также технические решения основных узлов. Технологическая схема производства флокированных нитей представлена на *рис. 11.1*.

Безусловно, основным и принципиальным узлом технологии производства флокированных нитей является узел флокирования. В этой технологии он значительно отличается от аналогичных конструкций при производстве рулонных материалов. Здесь он должен решать целый ряд весьма специфических задач, как, например, обеспечивать равномерное нанесение ворса по окружности нитей с высокой плотностью при экономном расходовании ворса и высокой скорости его нанесения.

Описание данной технологии следует начать с принципиального момента, который, на первый взгляд, может показаться не столь важным, а именно – с анализа возможных схем подключения электродов при флокировании нитей [64].

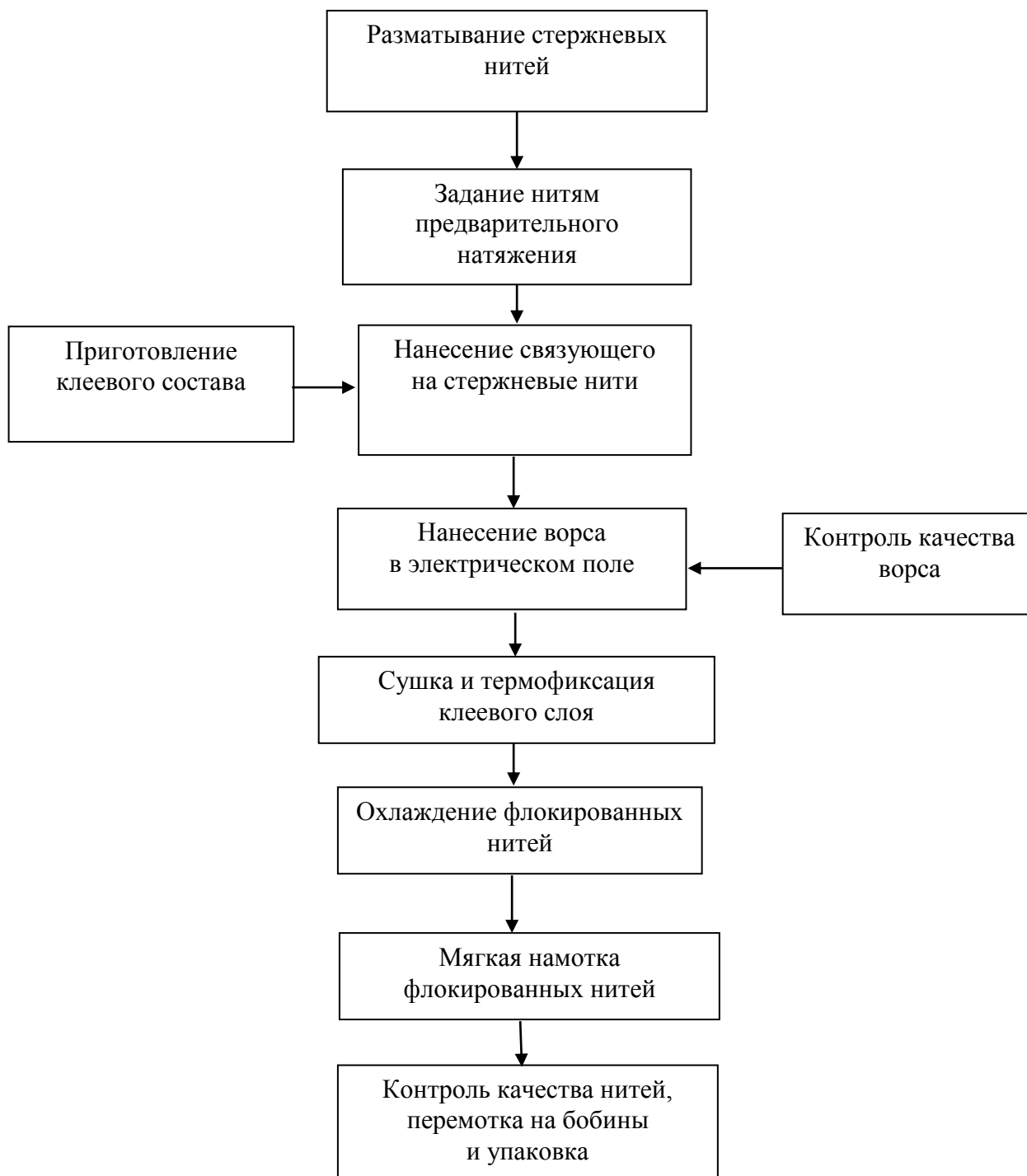


Рис. 11.1. Схема производства флокированных нитей

11.1. Выбор схемы подключения электродов для нанесения ворса на нити

Флокирование нитей, вообще говоря, возможно при различных вариантах подключения потенциалов высокого напряжения к электродам флокатора. Однако скорость процесса и плотность ворсового покрытия будут различны. Поэтому, прежде чем приступить к дальнейшим исследованиям, необходимо хотя бы в самом общем виде проанализировать различные варианты подключения

электродов [64]. Необходимо учесть обязательное для всех случаев обстоятельство: нити должны быть заземлены при любом варианте. Это проще всего реализовать путем заземления устройства для нанесения клея, поскольку используемый клей обладает достаточно высокой электропроводностью.

Различные варианты подключения представлены на *рис. 11.2, а–д*. Сначала рассмотрим вариант (*рис. 11.2, а*), когда к верхнему электроду подают потенциал высокого напряжения, а нижний электрод – заземлен. Это традиционная схема для флокирования плоских материалов.

В этом случае ворс в зону флокирования можно подавать только сверху через сетчатое дно бункера, поскольку на нижнем электроде зарядка ворса осуществляться не может из-за низкой напряженности электрического поля между заземленными нитями и нижним заземленным электродом. Это фактически является основным препятствием в использовании такого способа подключения электродов к источнику высокого напряжения. Если ворс подают в зону флокирования сверху, то значительная его часть, которая прошла между нитей, остается на поверхности нижнего электрода и больше в процессе нанесения участвовать не будет. Таким образом, способ подключения, используемый повсеместно для флокирования плоских материалов, оказывается непригодным для нанесения ворса на нити.

На *рис. 11.2, б* представлен вариант подключения потенциала высокого напряжения к нижнему электроду при заземленном верхнем электроде. Этот способ больше подходит для флокирования нитей, поскольку ворс на нижнем электроде будет непрерывно перезаряжаться и вновь принимать участие в процессе нанесения. В этом случае должно установиться динамическое равновесие между ворсом, приходящим на нижний электрод и уходящим с него.

Кроме того, важно, что ворс, прошедший между нитями, оказывается в зоне, где фактически отсутствует электрическое поле и тормозится за счет аэродинамического сопротивления. Вследствие этого на некотором расстоянии между нитями и верхним электродом, где ворс останавливается, оказывается зона с весьма высокой плотностью заряда того же знака, что и нижний электрод. Поэтому вновь прибывающий в эту зону ворс тормозит встречное поле, и он начинает вновь двигаться к нитям с противоположной стороны. При этом ворс будет наноситься на обратную сторону нитей. Здесь необходимо также заметить, что при таком варианте ворс можно подавать в зону флокирования как сверху, так и снизу, например, на транспортере, движущемся вдоль нижнего электрода. Важным преимуществом этого варианта является и то, что скорость подачи ворса может быть весьма высокой. Напряженность электрического поля, близкая к нулю, действует аналогично малому коэффициенту зарядки ворса. Например, как было показано в разд. 10 (*рис. 10.3*), скорость подачи ворса при малых значениях коэффициента зарядки значительно превосходит скорость поступления ворса даже при среднем значении относительного коэффициента $k = 0,5 k_{\max}$.

Третий вариант подключения потенциалов к электродам показан на *рис. 11.2, с*. В этом случае к верхнему и нижнему электродам подают потенциалы высокого напряжения разных знаков, т. е. требуется два разнополярных источника высокого напряжения. Такое подключение можно считать классическим, по-

сколькx оно использовано в патентах [70]–[75], положенных в основу существующих за рубежом линий по производству флокированных нитей. Данный вариант имеет следующие положительные стороны:

- возможность создания высокой напряженности электрического поля в области нанесения ворса на нити, что важно при подаче ворса в межэлектродное пространство на диэлектрическом транспортере, как в упомянутых патентах;

- несмотря на высокую напряженность поля на поверхности электродов, на нитях не возникает коронный разряд, так как заземленные нити расположены вблизи поверхности нулевого потенциала.

Однако такая схема подключения обуславливает и серьезный недостаток, связанный с тем, что значительная часть ворса будет двигаться между электродами, минуя нити. Это ведет к замедлению скорости формирования ворсового покрытия. При этом ворс наносится преимущественно на верхнюю и нижнюю поверхности нитей. С этим связано существование специальных патентов, например [70], [72], в которых обеспечивается принудительное вращение нитей в зоне флокирования. Кроме того, встречаясь в плоскости нитей, разноименно заряженный ворс может разряжаться, что тоже не способствует ускорению процесса.

В качестве четвертого варианта подключения источника высокого напряжения к электродам флокатора рассмотрим соединение и верхнего, и нижнего электродов с потенциалом одного знака. Такой способ имеет то преимущество, что все силовые линии или их существенная часть замкнуты на поверхность нитей. Это означает, что заряженному ворсу в этом случае фактически некуда деться кроме заземленной поверхности нитей. При этом поверхностная плотность силовых линий на поверхности нитей распределена гораздо равномернее, чем в предыдущем случае, а значит и равномерность нанесения ворса будет значительно выше. Основной недостаток такого способа подключения потенциалов – меньшая скорость подачи ворса в зону флокирования по сравнению со вторым вариантом.

Таким образом, на основании проведенного анализа можно заключить:

- первый вариант (*рис. 11.2, а*), вероятно, не пригоден для получения флокированных нитей;

- третий вариант требует большего времени для достижения одинаковой плотности по сравнению со вторым и четвертым вариантами и принудительного вращения нитей;

- второй и четвертый варианты представляются наиболее перспективными для получения наибольшей производительности процесса, причем возможно их использование в комбинации друг с другом.

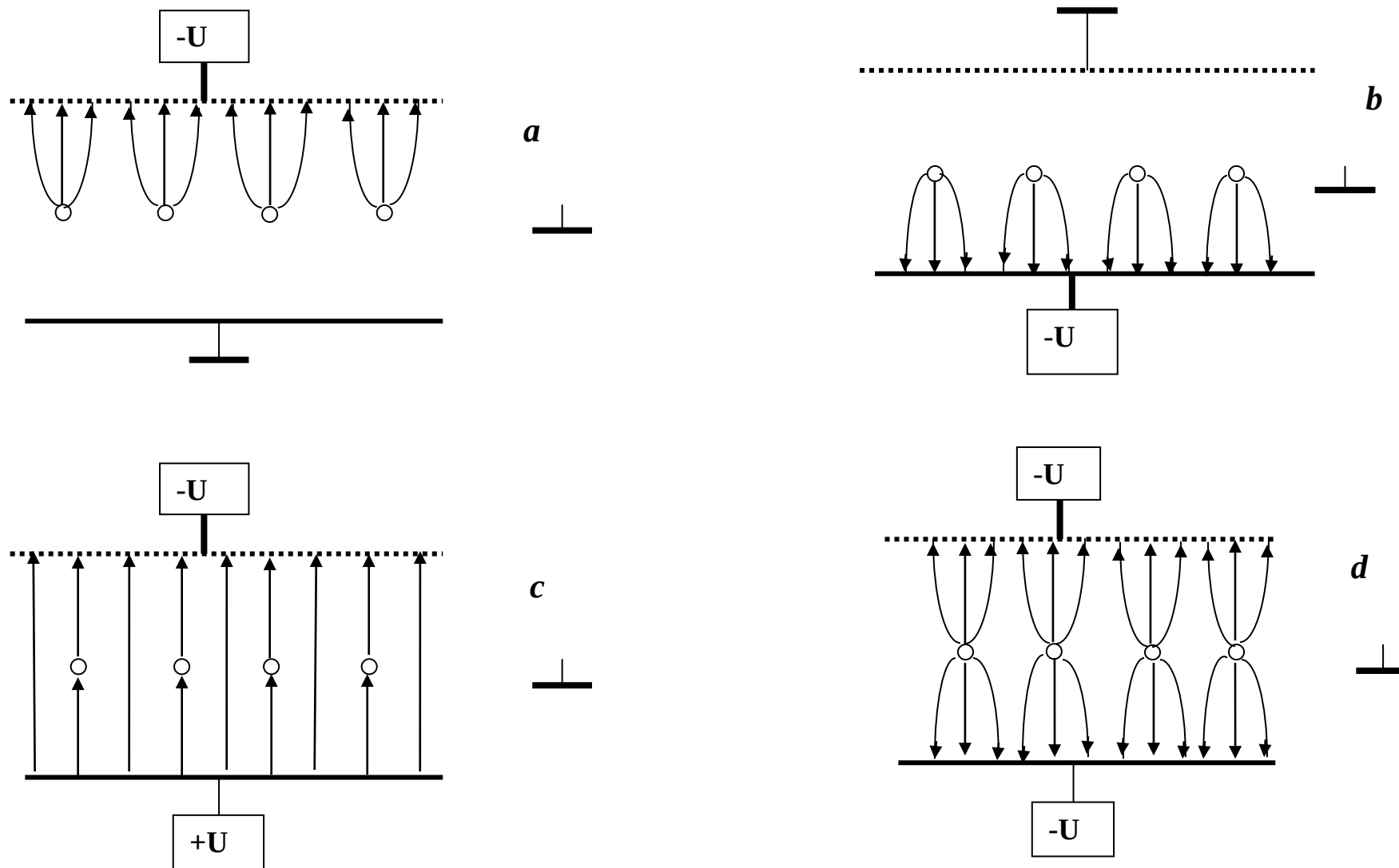


Рис. 11.2. Варианты подключения потенциала высокого напряжения к электродам флокатора

11.2. Выбор режима флокирования нитей на основе описания поля параллельных проводников

При производстве ворсовых нитей по технологии электрофлокирования одним из важнейших вопросов, определяющих скорость нанесения и плотность ворсового покрытия на нитях, является выбор значений таких технологических параметров процесса, как напряжение на электродах флокатора, расстояние между нитями и расстояние между полотном нитей и электродами. Для оценки этих параметров было использовано математическое описание неоднородного электрического поля ряда параллельных проводников, расположенных между плоскими электродами. Это описание представлено в подразд. 9.1.2. На основе полученных моделей можно рассчитать потенциал и составляющие напряженности электрического поля в любой точке пространства между электродами, при различных значениях диаметра цилиндрических проводников, расстояниях между ними и расстоянии от поверхности электродов.

Проведенные исследования процесса нанесения ворса на нити показали, что с ростом напряжения плотность ворсового покрытия на нитях, а следовательно, и скорость флокирования, увеличивается. Т. е. чем выше напряжение, тем больше производительность процесса флокирования нитей. Однако при достижении некоторого напряжения возникает коронный разряд с нитей и нанесение ворса на них практически полностью прекращается. Кроме того, высокие требования, предъявляемые к эластичности флокированных нитей, ведут к необходимости уменьшения клеевого слоя на нити, т. е. диаметра нити, что снижает порог возникновения коронного разряда. Таким образом, порог возникновения коронного разряда с нитей существенно влияет на выбор технологического режима процесса флокирования нитей. Для выбора *оптимального* режима процесса флокирования, обеспечивающего максимальную скорость нанесения ворса, необходимо одновременное выполнение следующих условий [60]:

1. Напряженность электрического поля на поверхности нити с клеевым слоем должна быть меньше напряженности, при которой возникает коронный разряд.

2. Напряженность электрического поля на поверхности электрода, где происходит зарядка ворса, должна быть максимальной.

Расчет указанных оптимальных условий можно осуществить на основе представленной в подразд. 9.1.2 модели неоднородного электрического поля для ряда параллельных проводников между параллельных плоских электродов.

Максимальное значение напряженности на электродах необходимо для высокой скорости зарядки и придания ворсинкам наибольшего заряда. Именно заряд волокна в значительной степени определяет скорость флокирования, глубину внедрения в клеевой слой, ориентацию ворса и плотность ворсового покрытия, получаемого на поверхности нити.

Напряженность электрического поля в указанной системе электродов (рис. 9.7–9.10) описывается выражениями (9.10) и (9.11).

Наибольшая величина напряженности будет около поверхности нити с клеем в точке с координатами $(0; r_0)$. Напряженность поля на поверхности

плоского электрода будем вычислять в точке с координатами $(0; h)$. В обоих случаях x составляющая напряженности равна 0, поэтому для оптимизации будем использовать только y составляющую, т. е. выражение (9.11).

Для выбора оптимальных режимов процесса необходимо представлять себе влияние основных технологических параметров. На первом этапе оценим характер влияния расстояния между нитями на напряженность поля в двух указанных точках.

В расчетах диаметр нити с клеевым слоем был выбран 0,5 мм, что примерно соответствует реальным значениям. Это значение соответствует, конечно, нити с жидким связующим, так как именно на такую нить происходит нанесение ворса. Нити располагались посередине между электродами на расстоянии 8 см, а расстояние между ними варьировалось от 10 до 20 мм. Для перечисленных условий были построены зависимости напряженности электрического поля как на поверхности нити, так и на поверхности электрода от напряжения, подаваемого на электроды флокатора. Одновременно, на этом же графике показана штриховыми линиями напряженность начала коронного разряда с нити и напряженность на поверхности электрода, соответствующая значению 3 кВ/см. Пороговое значение напряженности начала коронного разряда было рассчитано на основе работ [7], [60]. Для удобства восприятия всех зависимостей на одном графике в качестве ординаты было использовано значение десятичного логарифма напряженности. Результаты расчетов представлены на *рис. 11.3*.

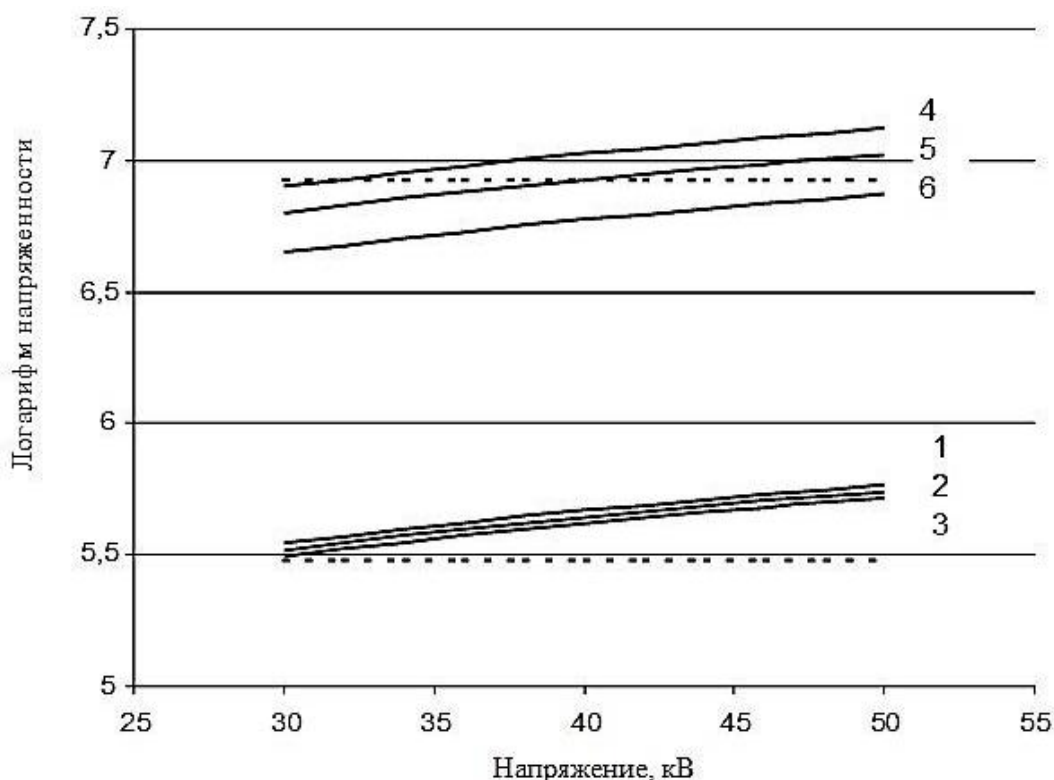


Рис. 11.3. Напряженность электрического поля на поверхности электрода и нитей:

1 – $d = 10$ мм; 2 – $d = 15$ мм; 3 – $d = 20$ мм; 4 – $d = 20$ мм;
5 – $d = 15$ мм; 6 – $d = 10$ мм

Результаты, представленные на графике, показывают, что большое расстояние между нитями не выгодно не только из-за сокращения количества нитей в установке или возрастания размеров установки, но и существенно сокращает диапазон допустимых напряжений, поскольку коронный разряд начинается уже при 32 кВ, а напряженность на поверхности электрода еще незначительна. При этом, как показывают эксперименты, расстояние между нитями менее 10 мм может вызывать неравномерное покрытие поверхности ворсом.

Графики, представленные на *рис. 11.4*, построены аналогично предыдущим, но здесь варьировалась высота нитей при постоянном расстоянии между ними 15 мм.

Полученные зависимости позволяют достаточно четко локализовать диапазон напряжений, позволяющих наиболее эффективно наносить ворс на нити, при заданной высоте. Это говорит о том, что с помощью простой программы на основе полученных выражений для напряженности легко получить оптимальные значения технологических параметров, а именно – высоты и напряжения, обеспечивающих наиболее эффективные условия флокирования нитей.

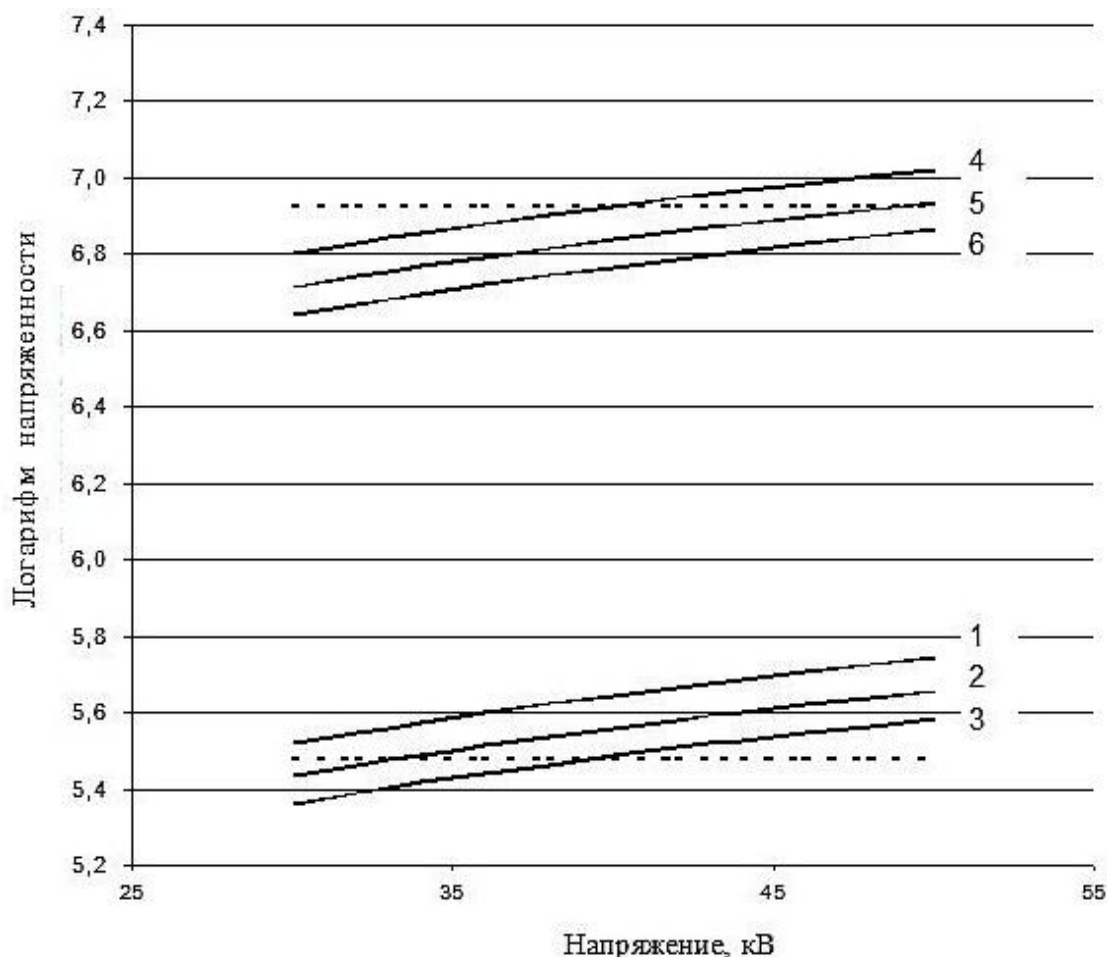


Рис. 11.4. Напряженность электрического поля на поверхности электрода и нитей:

1 – $h = 8$ см; 2 – $h = 10$ см; 3 – $h = 12$ см; 4 – $h = 8$ см;
5 – $h = 10$ см; 6 – $h = 12$ см

Таким образом, предложенное в подразд. 9.1.2 описание неоднородного электрического поля имеет не только теоретическое, но и чисто практическое значение для технологии производства флокированных нитей. Это не единственное использование данного описания. В дальнейшем, на основе использования неоднородного электрического поля будет обоснована возможность создания ворсовых узоров.

11.3. Влияние электропроводности нити с клеевым слоем на процесс флокирования

При изготовлении флокированных нитей, как и при нанесении ворса на плоские изделия, флокируемую поверхность покрывают клеевым слоем. Важное отличие здесь состоит в том, что под поверхностью плоского изделия всегда расположен электрод, к которому и направляется заряженный ворс. В случае нитей имеется возможность подключить нулевой потенциал (заземление) к клеевому слою. Однако толщина клеевого слоя на нити весьма незначительна и не превышает 0,2 мм, а удельная электропроводность клея может колебаться в достаточно широких пределах. Всё это приводит к тому, что для разных клеевых составов линейное сопротивление нити может варьироваться от $5 \cdot 10^4$ до 10^9 Ом/см.

Если принять даже не слишком высокое значение сопротивления 10^8 Ом/см, значение тока, протекающего по нити 1 мкА, и расстояние до точки заземления 200 см, то легко определить, что падение напряжения на этом участке составит 20 кВ. Это означает, что условия нанесения ворса значительно изменились – реальная разность потенциалов между нитью и электродом составляет, к примеру, уже не 40 кВ, а лишь 20 кВ. Это неизбежно скажется на скорости нанесения и ориентации ворса на нитях.

В реальном процессе нанесения величина тока меняется вдоль нити как по мере нарастания плотности ворса, так и в результате накопления тока по мере приближения к точке заземления. Для анализа этого процесса необходимо построить его математическую модель и сравнить с результатами экспериментальных исследований. На основе анализа процесса и исследований надо выяснить, какое влияние оказывает величина линейного сопротивления стержневой нити со связующим на плотность ворсового покрытия, получаемую при флокировании нитей.

11.3.1. Модель влияния проводимости нити с клеевым слоем на скорость изменения плотности ворса на нити

На *рис. 11.5* приведена схема флокирования нитей. Флокируемая нить обладает некоторым линейным сопротивлением γ , которое преимущественно определяется проводимостью и толщиной клеевого слоя. В процессе флокирования в электрическом поле к нити поступает заряженный ворс, вследствие чего вдоль нее протекает ток $I(x)$ и, соответственно, возникает распределение потенциала $\varphi(x)$ вдоль нити. Определим вид функции распределения потенциала вдоль нити и с ее помощью оценим величину плотности ворса на нити, получаемую в процессе флокирования. Запишем исходные уравнения.

1. Закон Ома для участка нити dx :

$$\frac{1}{\gamma} \frac{d\varphi(x)}{dx} = I(x). \quad (11.1)$$

2. Считаем, что скорость увеличения плотности ворса на нити пропорциональна как числу «вакантных» мест на единице длины нити, так и разности потенциалов между данным участком нити и электродами флокатора:

$$\frac{dn(x)}{dx} = k[n_{\max} - n(x)][U_0 - \varphi(x)], \quad (11.2)$$

где $n(x)$ – поверхностная плотность ворсового покрытия на единицу длины нити в точке x ; $n_{\max}$ – максимально достижимое значение плотности ворса на нити; U_0 – напряжение на электродах флокатора; k – коэффициент пропорциональности.

3. Считаем, что с ростом потенциала нити $\varphi(x)$ уменьшается прирост тока (поступление заряженного ворса) на данном участке нити dx :

$$\frac{dI(x)}{dx} = -\alpha \frac{d\varphi(x)}{dx}, \quad (11.3)$$

где α – коэффициент пропорциональности, 1/Ом.

Подставив (11.1) в (11.3), получаем

$$\frac{1}{\gamma} \frac{dI(x)}{dx} = -\alpha \cdot I(x).$$

Решая это уравнение и определяя постоянную интегрирования, имеем

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha\gamma(x-l_1)}, \quad (11.4)$$

где I_0 – максимальное значение тока, текущего через сечение нити на участке l_1 .

Далее, подставляя (11.4) в (11.1), получим

$$\frac{d\varphi(x)}{dx} = \gamma I_0 e^{-\alpha\gamma(x-l_1)}.$$

Интегрируя это уравнение, определим распределение потенциала вдоль нити:

$$\varphi(x) = \varphi_0 + \frac{I_0}{\alpha} [1 - e^{-\alpha\gamma(x-l_1)}],$$

где $\varphi_0 = I_0 \mathcal{N}_1$ – значение потенциала нити в точке входа во флокатор (рис. 11.5), т. е. падение напряжения на участке l_1 при протекании тока I_0 .

Определим постоянную α исходя из следующих предположений. Пусть мы имеем флокатор неограниченной длины. Тогда при некотором значении x величина экспоненты станет значительно меньше единицы, т. е.

$$e^{-\alpha\gamma(x-l_1)} \ll 1$$

и $\varphi(x)$ достигнет максимального значения $\varphi_{\max} = U_0$.

Далее потенциал нити расти не может, так как разность потенциалов на нити и электроде становится равной нулю, а следовательно, и напряженность электрического поля будет равна 0. При этом ворс не заряжается и не переносит заряд к нити.

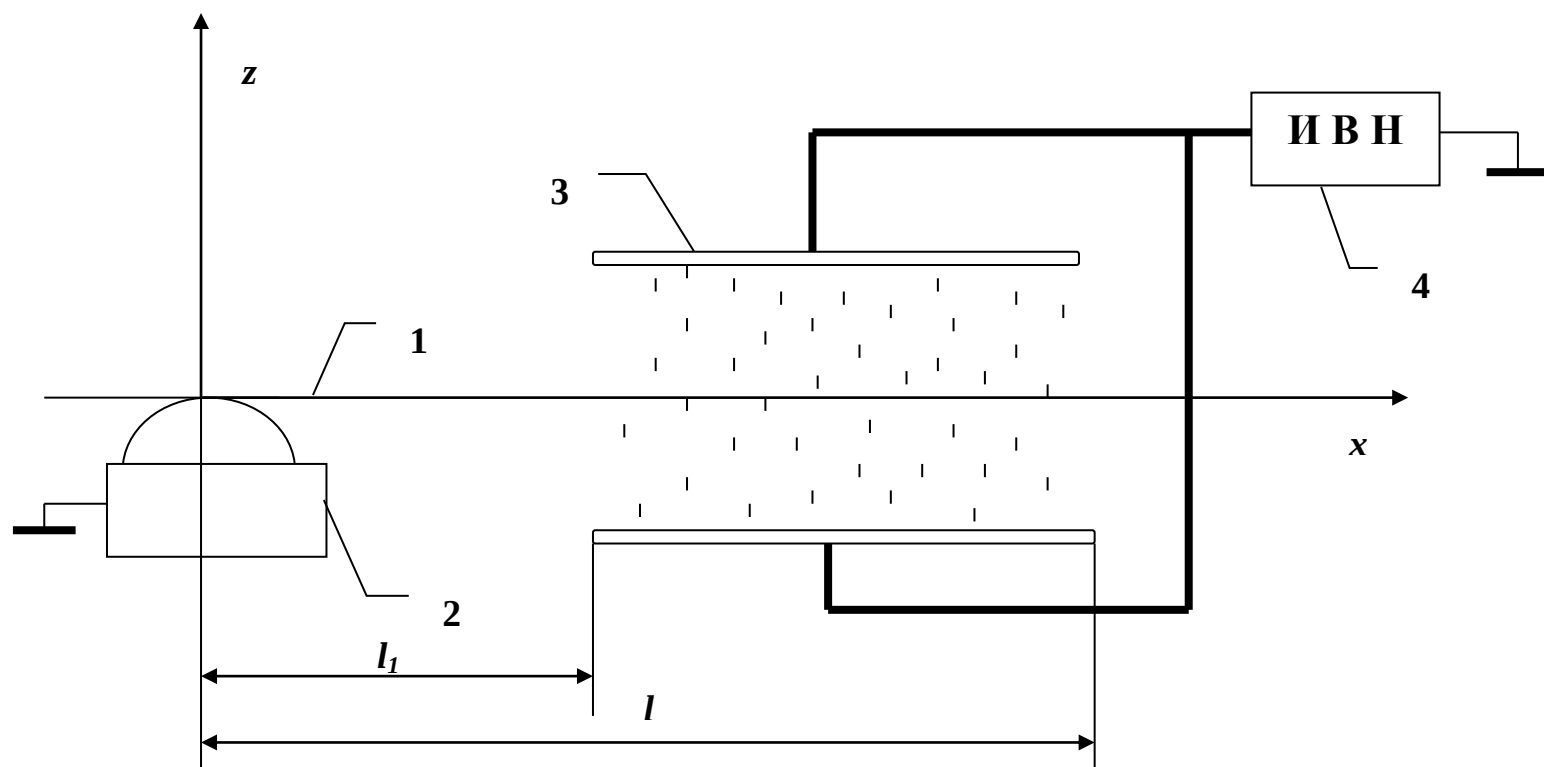


Рис. 11.5. Схема флокирования нитей:
 1 – флокируемая нить; 2 – клеенаносящее устройство; 3 – электроды флокатора;
 4 – источник высокого напряжения

Тогда будем иметь

$$\alpha = \frac{I_0}{U_0 - \varphi_0}.$$

Таким образом, используя значение α , распределение потенциала можно записать в следующем виде:

$$\varphi(x) = \varphi_0 + (U_0 - \varphi_0)(1 - \ell^{\frac{x/l_1 - 1}{U_0/\varphi_0 - 1}}). \quad (11.5)$$

Теперь, используя уравнение (11.2), можно получить следующее выражение:

$$\ln \frac{n_{\max} - n}{n_{\max}} = k[U_0(l_1 - x) + \int_{l_1}^x \varphi(x) dx]. \quad (11.6)$$

Подставив полученное выражение для потенциала $\varphi(x)$ из (11.5) в (11.6) и проинтегрировав, получаем

$$\ln \frac{n_{\max} - n}{n_{\max}} = -kl_1 \frac{(U_0 - \varphi_0)^2}{\varphi_0} (1 - \ell^{\frac{x/l_1 - 1}{U_0/\varphi_0 - 1}}).$$

Из полученного выражения легко получить уравнение, описывающее зависимость $n(x)$:

$$n(x) = n_{\max} \{1 - \exp[-kl_1 \frac{(U_0 - \varphi_0)^2}{\varphi_0} (1 - \ell^{\frac{x/l_1 - 1}{U_0/\varphi_0 - 1}})]\}. \quad (11.7)$$

При малом линейном сопротивлении нити потенциал $\varphi_0 \ll U_0$ и формулу (11.7) для этого случая можно существенно упростить. Плотность ворса на нити будет при этом выражаться следующим образом:

$$n(x) = n_{\max} [1 - \ell^{-kU_0(x-l_1)}]. \quad (11.8)$$

Коэффициенты k и $n_{\max}$, присутствующие в формулах (11.7) и (11.8), определяются эмпирически. Для нити, имеющей высокую электропроводность, используя уравнение (11.8), выразим произведение $k(l - l_1)$ через остальные параметры:

$$k(l - l_1) = \frac{\ln(1 - n/n_{\max})}{U_0}.$$

Из этого уравнения для двух значений напряжения и соответствующих им значений плотности ворсового покрытия, полученных экспериментальным путем, можно определить искомые параметры $n_{\max}$ и k . При большом значении линейного сопротивления γ нужно исходить из выражения (11.7), причем будем считать значение $n_{\max}$ таким же, как и в первом случае, если остальные параметры процесса флокирования остались неизменными. Это вполне допустимо, поскольку ориентация ворса, от которой по преимуществу зависит параметр $n_{\max}$, определяется электрофизическими свойствами ворса и параметрами процесса флокирования, а они в этом случае не изменяются.

11.3.2. Экспериментальная оценка влияния проводимости клеевого слоя на динамику возрастания плотности ворса на нитях

Для получения конкретных значений параметров $n_{\max}$ и k и последующего сравнения полученных выражений с экспериментальными результатами были проведены исследования по определению плотности ворсового покрытия на нитях при одинаковой скорости их движения для двух различных значений линейного сопротивления нити в зависимости от напряжения на электродах. В результате проведенных исследований были получены следующие значения параметров:

$$n_{\max} = 0,665 \text{ г/м}; k_1 = 3,55 \cdot 10^{-4} (\text{В} \cdot \text{м})^{-1}; k_2 = 7,31 \cdot 10^{-5} (\text{В} \cdot \text{м})^{-1}.$$

Полученные результаты соответствуют следующим исходным данным: $l_1 = 15 \text{ см}$; $l = 45 \text{ см}$; $\gamma_1 = 5 \cdot 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}^{-1}$; $\gamma_2 = 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{см}^{-1}$. Для расчетов величина тока I_0 была принята равной $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ А}$, что соответствует среднему значению наблюдаемых токов.

На *рис. 11.6* представлены расчетные зависимости для линейной плотности ворса на нити от напряжения на электродах флокатора и экспериментально полученные результаты для двух приведенных выше значений γ .

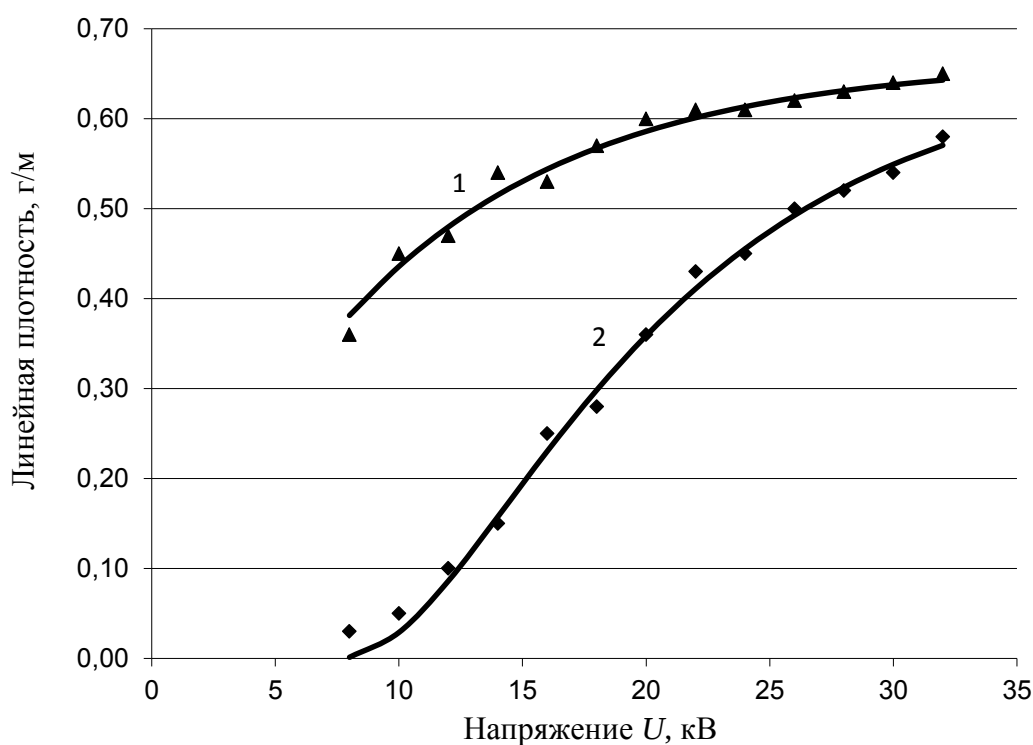


Рис. 11.6. Зависимость линейной плотности ворса на нитях от напряжения на электродах флокатора:
1 – линейное сопротивление $5 \cdot 10^4 \text{ Ом/см}$;
2 – линейное сопротивление 10^9 Ом/см

С использованием полученных данных и предложенной модели были построены зависимости линейной плотности ворса на нити от расстояния, пройденного нитями в зоне флокирования, т. е. от координаты участка нити во фло-

каторе при различном напряжении на электродах флокатора (20, 30, 40, 50 кВ). Первый график (рис. 11.7) соответствует линейному сопротивлению нити с клеевым слоем, равному 10^9 Ом/см. На следующем графике представлена зависимость при линейном сопротивлении нити, равном $5 \cdot 10^4$ Ом/см.

На приведенных графиках (рис. 11.7, 11.8) скорость движения нитей была принята равной 4 м/мин. Подключение электродов соответствовало принятой в расчетах схеме.

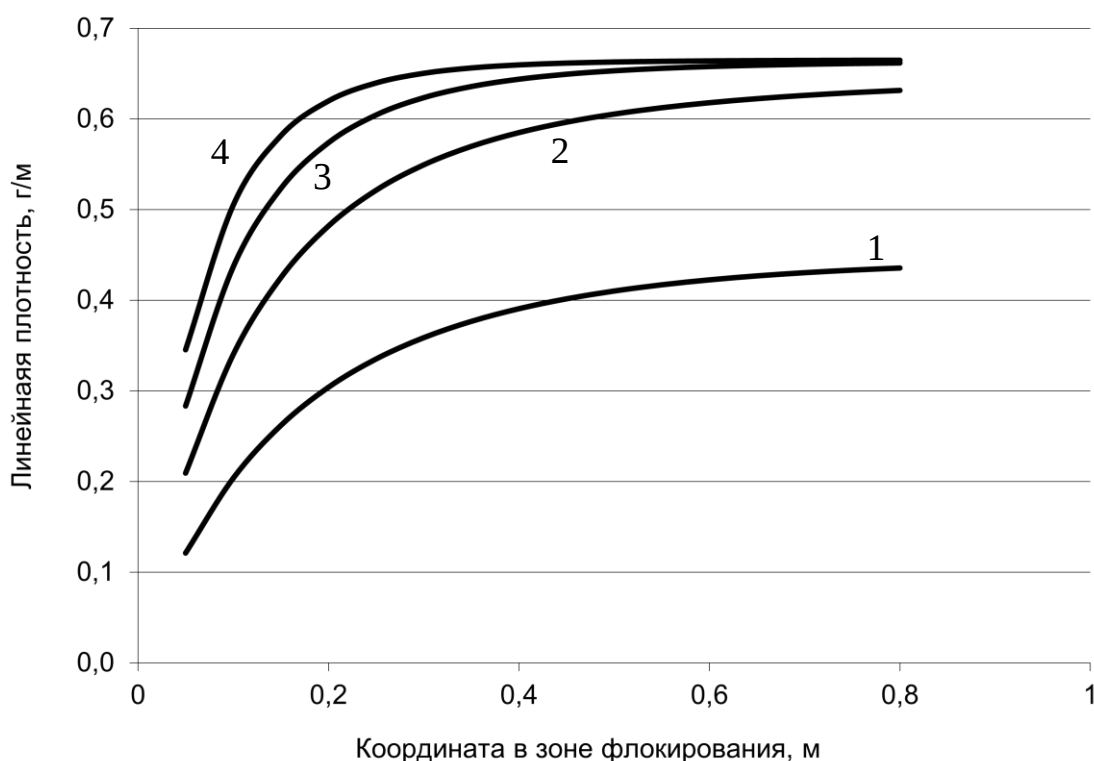


Рис. 11.7. Зависимость линейной плотности ворса на нити от координаты:

1 – $U_0 = 20$ кВ; 2 – $U_0 = 30$ кВ; 3 – $U_0 = 40$ кВ; 4 – $U_0 = 50$ кВ

Известная скорость движения нитей легко позволяет пересчитать значение координаты в промежуток времени, необходимый для флокирования. Кроме того, полученные выражения позволяют, исходя из заданной плотности ворса на нитях и известной скорости, определить нужную длину зоны флокирования при иной скорости движения нитей. Например, если необходимая плотность ворса при скорости нитей 4 м/мин достигается при длине флокатора 0,4 м, то при скорости 10 м/мин такая же плотность будет получена во флокаторе длиной 1 м.

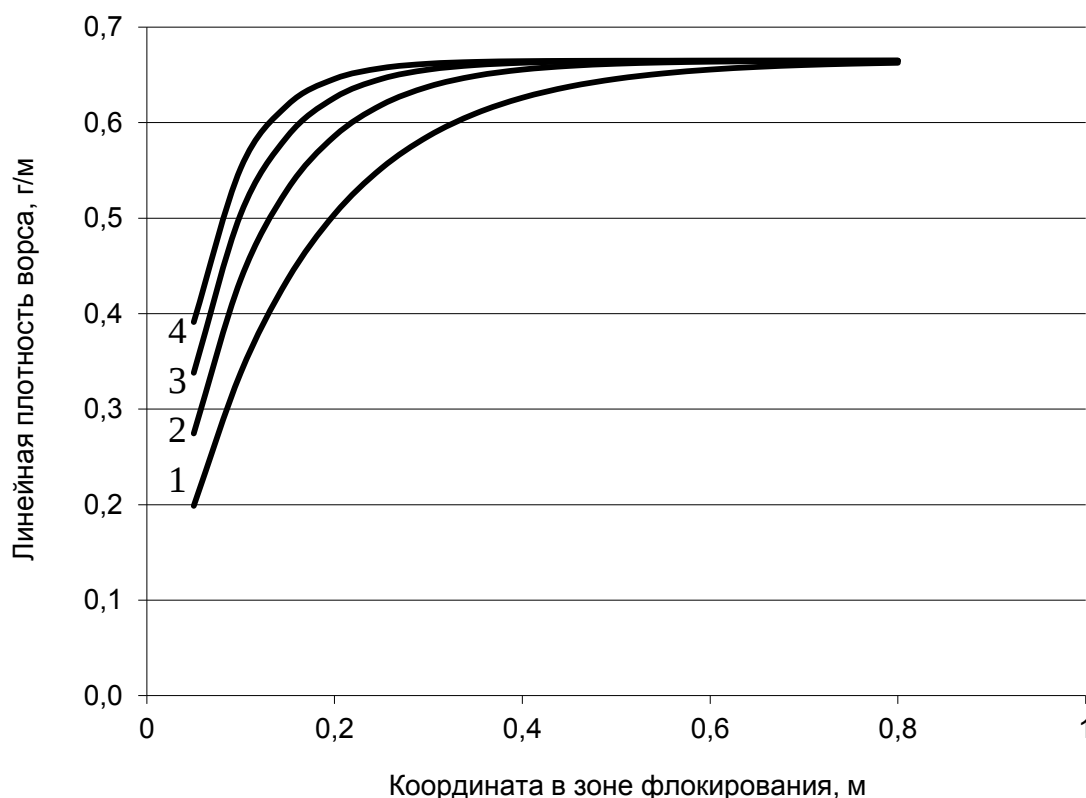


Рис. 11.8. Зависимость плотности ворса на нити от координаты:
 1 – $U_0 = 20$ кВ; 2 – $U_0 = 30$ кВ; 3 – $U_0 = 40$ кВ; 4 – $U_0 = 50$ кВ

Полученные результаты позволяют однозначно утверждать, что малое линейное сопротивление нити с клеевым слоем позволяет осуществлять нанесение ворса значительно быстрее, чем при высоком сопротивлении клеевого слоя. Высокое линейное сопротивление, кроме большего времени, также требует более высокого напряжения на электродах. Малое значение напряжения вообще не позволяет получать достаточно высокую линейную плотность ворса на нитях (рис. 11.7).

Из графиков видно, что при линейном сопротивлении нити 10^9 Ом/см достичь значительных скоростей флокирования весьма затруднительно. Увеличение напряжения на электродах – путь не вполне удовлетворительный, поскольку уже при напряжении около 40 кВ возникает коронный разряд и процесс нанесения ворса прекращается. На основе модели можно также предположить, что высокое значение среднего заряда ворса может отрицательно сказаться на получаемой плотности, так как это приведет к росту величины тока и, следовательно, к большому значению потенциала $\varphi(x)$, что замедляет процесс флокирования.

Для технологии остается решить важный вопрос – как поступать, если клей обладает хорошими параметрами для получения флокированной пряжи, но имеет слишком большое удельное сопротивление.

Решение этого вопроса может быть основано на полученном авторском свидетельстве [65]. Сущность данного изобретения состоит в том, что перед нанесением клеевого состава на нить её смачивают раствором электролита,

обеспечивающем нужную электропроводность. Это, как показали исследования, позволяет значительно сократить время нанесения ворса, и, кроме того, слой плохо проводящего клея создает как бы изоляцию, благодаря которой коронный разряд с нитей возникает при более высоком напряжении, что позволяет повысить напряжение и, тем самым, дополнительно ускорить процесс флокирования нитей.

Таким образом, на основе проведенного анализа и расчетов получены выражения, описывающие процесс формирования ворсового покрытия на нити при различном линейном сопротивлении клеевого слоя на нити. Сравнение расчетных значений с экспериментальными результатами (рис. 11.6) показало их хорошее совпадение.

Кроме того, предложенная модель весьма важна для выбора оптимальных параметров при переходе от лабораторного макета к промышленной установке. Это касается таких параметров, как напряжение, длина флокатора или скорость движения нитей для заданной величины линейного сопротивления нити и необходимой плотности ворсового покрова.

11.4. Влияние основных технологических параметров на процесс флокирования нитей

Для выбора режимов работы оборудования в процессе производства флокированных нитей и оценки возможной производительности данного процесса было проведено экспериментальное исследование влияния основных технологических параметров на получаемую плотность ворсового покрытия. Можно предполагать, что общие закономерности флокирования плоских материалов сохраняются и здесь, однако необходимо в этом убедиться. Требуется также получить некоторые количественные характеристики процесса, которые иным способом определить затруднительно. Кроме того, при флокировании нитей существует ряд важных технологических параметров, отсутствующих при нанесении ворса на плоские материалы.

Процесс формирования ворсового покрытия на нити должен определяться такими технологическими параметрами, как напряжение на электродах флокатора или напряженность в зоне флокирования, время нанесения ворса и расстояние между нитями. Сразу необходимо пояснить, что в данных исследованиях требовалось, в первую очередь, выявить основные закономерности процесса и не ставилось цели получить эмпирические выражения выявленных зависимостей.

Измерение плотности ворсового покрытия на нитях

Плотность ворсового покрытия на нити можно определять либо традиционным образом как поверхностную плотность, т. е. количеством ворсинок на 1 мм^2 , либо как линейную плотность, например, в мг/м (масса ворса в мг на нити длиной 1 м) или 1/мм (количество ворсинок на участке длины нити 1 мм). Последний вариант легко сопоставить с первым вариантом: площадь поверхности нити длиной $l = 1 \text{ мм}$ и диаметром d равен $S = \pi dl$.

В процессе исследований измеряли плотность ворсового покрытия по привесу, взвешивая на аналитических весах высушенные нити только с клеевым слоем (многократно), а также с клеевым слоем и нанесенным ворсом. Образцов нитей заданной длины использовали от 10 до 15 в одном эксперименте. Дополнительно определяли среднее значение диаметра d_n нити с клеевым слоем и длину отрезков нитей l_n . Массу нити с клеевым слоем m_1 , соответствующую полученным отрезкам флокированных нитей, вычисляли в каждом случае исходя из длины отрезков и измеренной линейной плотности нити с клеевым слоем. После этого вычисляли поверхностную плотность ворса на поверхности флокированной нити n (1/мм²):

$$n = \frac{(m_2 - m_1) \cdot 10^6}{\pi d_n l_n T l}, \quad (11.9)$$

где m_1 – масса нити с клеевым слоем, г; m_2 – масса нити с клеем и нанесенным ворсом, г; d_n – диаметр нити с клеевым слоем, мм; l_n – средняя длина отрезков нити, мм; T – линейная плотность ворса, текс; l – средняя длина ворса, мм.

Исходя из выражения (11.9) видно, что основной вклад в погрешность вносит определение разности масс. Погрешность остальных параметров достаточно мала либо ввиду проведения значительного числа измерений (d_n , l_n), либо ввиду того, что значения параметров (T , l) гарантированы поставщиком и также были измерены. Расчеты, основанные на проведенных измерениях, показывают, что величина погрешности при определении плотности ворсового покрытия составляет: для ворса длиной 0,5 мм – 6–8 %, для ворса 1,5 мм – 3–5 %. Эксперименты были проведены при двух вариантах подключения высокого напряжения к электродам флокатора, которые показаны на *рис. 11.2, b, d*.

Влияние технологических параметров на плотность ворсового покрытия на нитях

Первым этапом изучения влияния технологических параметров на получаемую на нитях поверхностную плотность ворсового покрытия была оценка воздействия напряжения на электродах флокатора. Эксперимент был проведен, как говорилось выше, для двух вариантов подключения электродов. Диапазон изменения напряжения составлял в первом варианте подключения от 12 до 36 кВ, а во втором варианте – от 8 до 32 кВ. Плоскость нитей во всех случаях размещалась посередине между электродами на высоте 8 см от нижнего электрода.

На *рис. 11.9* представлены зависимости плотности ворсового покрытия на нитях от напряжения на электродах для ворса длиной 0,5 мм. Время нанесения было выбрано достаточно большим (60 с), чтобы можно было ориентироваться на плотность ворсового покрытия, близкую к максимальному значению.

Полученные результаты свидетельствуют, как и предполагалось выше, что более высокая плотность и большая скорость ее роста будет достигаться при варианте подключения электродов на *рис. 11.2, d*. Однако в этом случае несколько меньше максимально возможное напряжение на электродах. При большем напряжении возникает коронный разряд с нитей. Кроме того, для такого подключения электродов скорость подачи ворса в зону флокирования (при

подаче ворса сверху через сетчатое дно бункера), как и при флокировании плоских материалов, имеет достаточно серьезное ограничение.

В другом варианте процесс нанесения ворса начинается при более высоком напряжении, плотность ворсового покрытия несколько ниже, но скорость поступления ворса в зону флокирования может быть обеспечена на существенно более высоком уровне.

Результаты эксперимента аналогичны результатам для плоских материалов: предельная плотность ворсового покрытия возрастает с увеличением напряженности в зоне флокирования.

Полученные данные свидетельствуют также и о том, что количество ворсинок на единице площади поверхности нити ($1/\text{мм}^2$) гораздо больше количества ворсинок на поверхности плоских материалов. Это связано с геометрией поверхности нити, а точнее, с тем фактом, что радиус нити с клеевым слоем примерно такой же по величине, как и длина ворса. Подробнее этот вопрос был рассмотрен ранее в разд. 6, где теоретически было обосновано более высокое значение предельно достижимой плотности ворсового покрытия на цилиндрической поверхности по сравнению с плоской поверхностью.

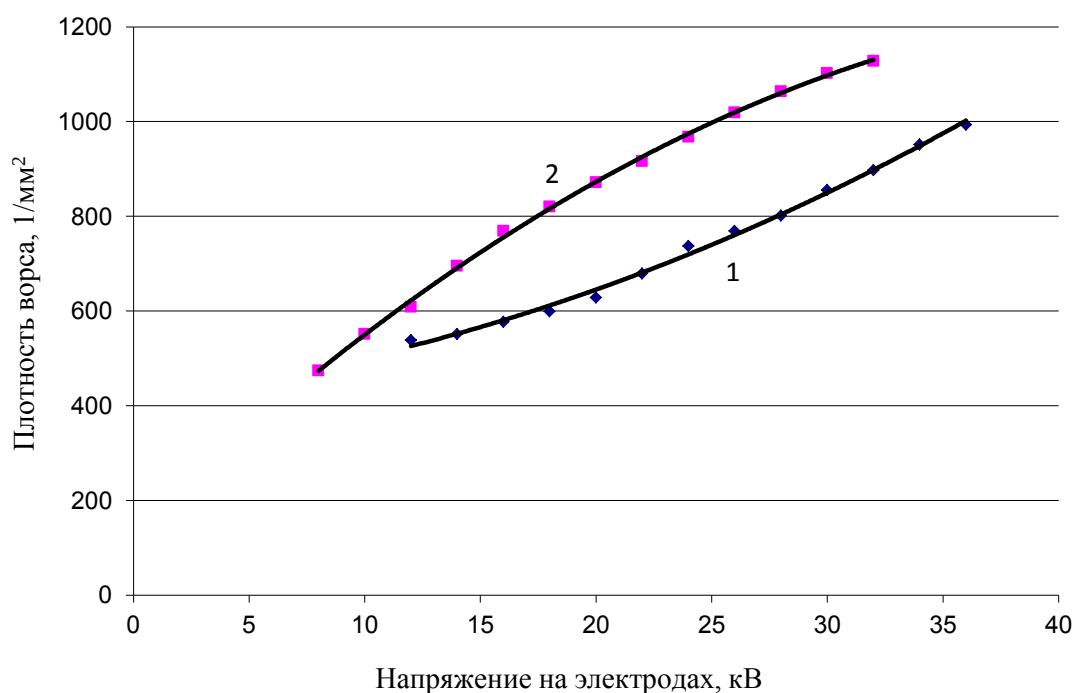


Рис. 11.9. Влияние напряжения на плотность ворса на нитях:
1 – потенциал высокого напряжения на нижнем электроде;
2 – потенциал высокого напряжения на обоих электродах

Следующим этапом стало исследование динамики изменения плотности ворсового покрытия на нити от длительности нанесения ворса. Это важно, в первую очередь, для оценки скорости процесса формирования ворсового покрытия на нити. Основные условия эксперимента были сохранены теми же, что и в предыдущем случае. Исследования были проведены для ворса длиной – 0,5

и 1,5 мм. Напряжение на электродах во всех случаях составляло 30 кВ, т. е. годилось для обоих вариантов подключения.

На *рис. 11.10* (ворс 1,5 мм) и *11.11* (ворс 0,5 мм) представлены зависимости плотности ворсового покрытия на нитях от длительности флокирования при расстоянии между нитями 15 мм. Каждый эксперимент, аналогично предыдущему, был осуществлен в двух вариантах подключения электродов. На основе полученных результатов можно сказать, что более эффективным, как и ранее, оказался вариант подключения обоих электродов к потенциалу высокого напряжения. Необходимо отметить высокую плотность ворсового покрытия на нитях. Во всех случаях, как уже было отмечено, она значительно превышает плотность, получаемую на плоских материалах при тех же условиях. Ход зависимости в целом аналогичен процессу нанесения ворса на плоские материалы.

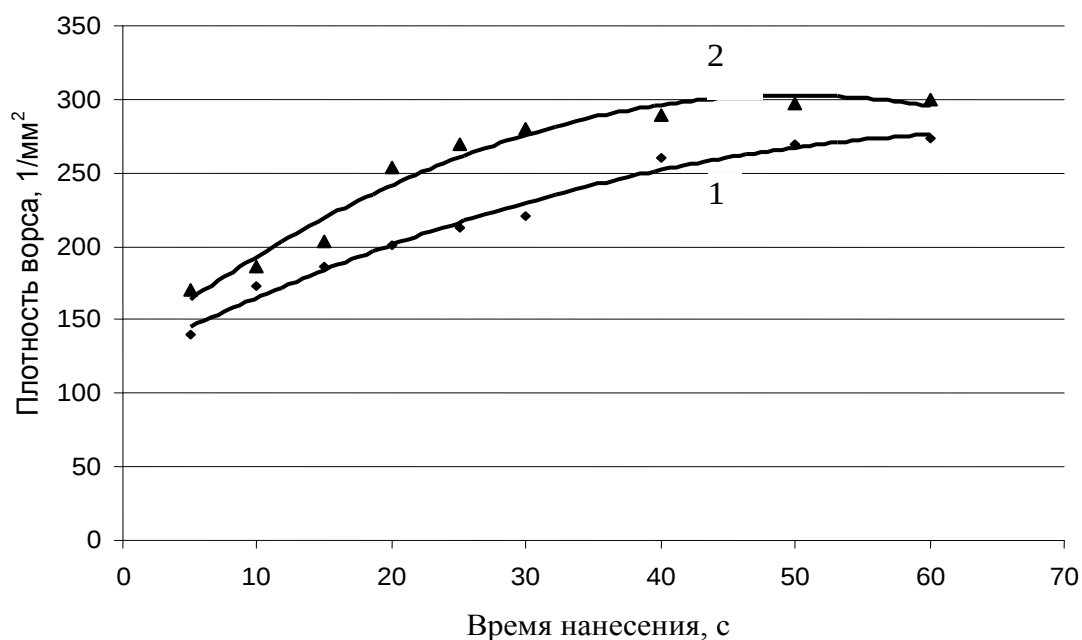


Рис. 11.10. Зависимость поверхностной плотности ворса на нитях от длительности нанесения (длина ворса 1,5 мм):
1 — потенциал на нижнем электроде; 2 — потенциал на обоих электродах

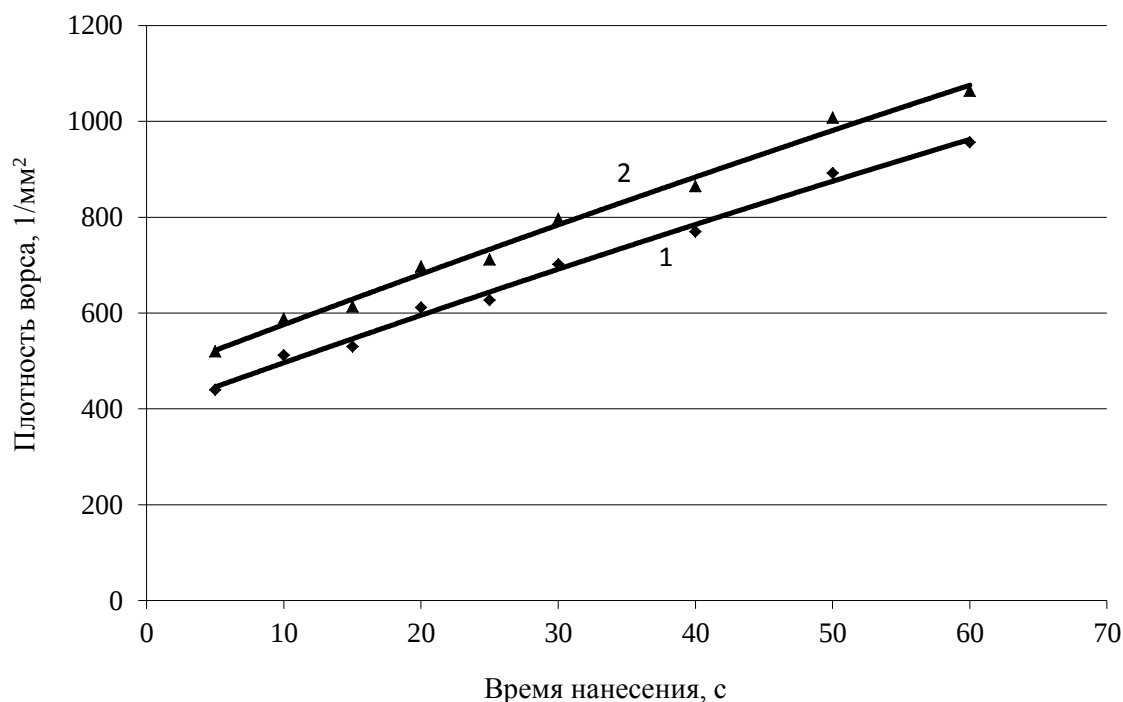


Рис. 11.11. Зависимость поверхностной плотности ворса на нитях от длительности нанесения (длина ворса 0,5 мм):

1 – потенциал на нижнем электроде; 2 – потенциал на обоих электродах

Сугубо предварительная оценка скорости нанесения ворса показывает, что уже за 5 с поверхностная плотность ворса на нитях достаточно высока и превышает или сравнима с максимальной плотностью для ворса такой длины на плоских материалах.

Влияние расстояния между нитями

На следующем этапе была проведена оценка влияния расстояния между нитями на получаемую плотность ворсового покрытия на них. Для этого были изготовлены флокированные нити при одинаковом напряжении на электродах (30 кВ), высоте полотна нитей (8 см) с ворсом длиной 1,5 мм за время 60 с, но при различных расстояниях между нитями в диапазоне от 10 до 30 мм. Длительное время флокирования позволяет судить о взаимосвязи расстояния между нитями с предельной плотностью, т. е. с ориентацией ворса на нити. Так же, как и на предыдущих этапах исследования, использовали два варианта подключения электродов к потенциалу высокого напряжения.

На рис. 11.12 представлена зависимость плотности ворсового покрытия от расстояния между нитями.

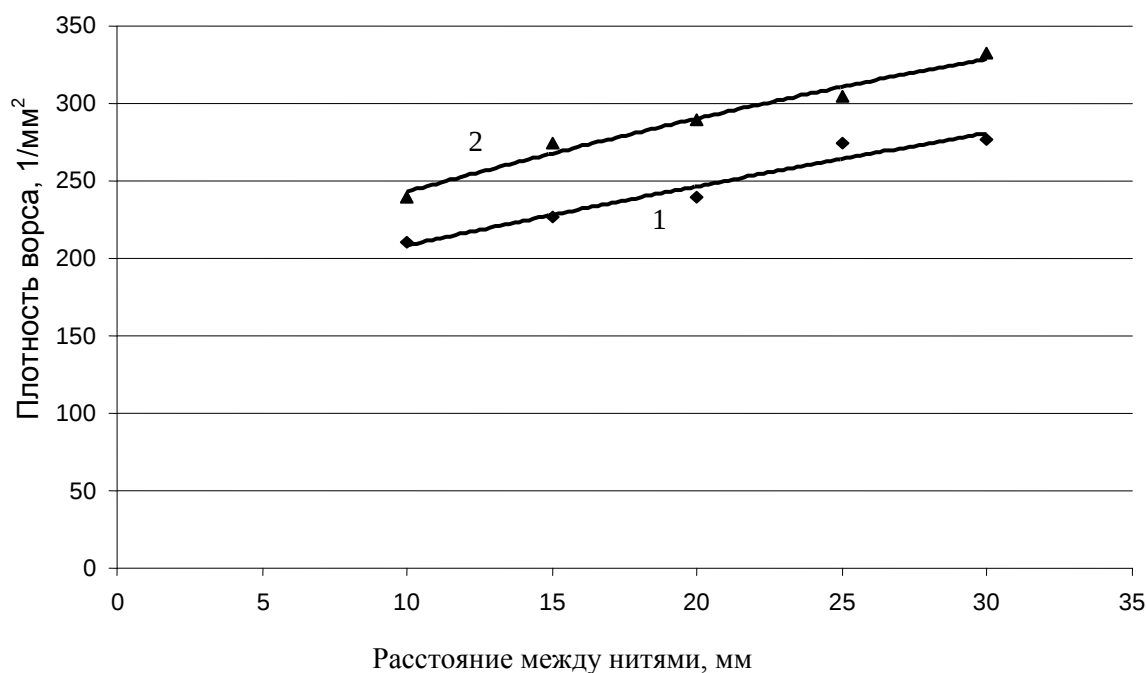


Рис. 11.12. Влияние расстояния между нитями на поверхностную плотность ворса:

- 1 – потенциал высокого напряжения на нижнем электроде;
 2 – потенциал высокого напряжения на обоих электродах

Так же, как и в предыдущих случаях, плотность ворсового покрытия во втором случае выше.

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- подключение двух электродов флокатора к потенциалу высокого напряжения одного знака позволяет получать более высокие значения плотности ворсового покрытия при любой продолжительности флокирования;
- величина предельной плотности ворсового покрытия на нитях выше при двух подключенных электродах, однако порог возникновения коронного разряда в этом случае ниже, что сокращает диапазон напряжений, в котором возможен устойчивый процесс флокирования нитей;
- повышение напряжения при флокировании ведет к увеличению плотности ворса на нитях и, соответственно, к снижению времени достижения заданной плотности ворсового покрытия;
- с увеличением расстояния между нитями возрастает плотность ворсового покрытия, получаемая за одинаковое время, однако, как было показано ранее в разд. 11.2, это ведет к снижению порога возникновения коронного разряда и, кроме того, к существенному сокращению количества нитей в зоне флокирования.

Сделанные по результатам исследований выводы крайне важны для конструкции узла флокирования нитей.

11.5. Конструктивное решение узла нанесения ворса на нити

На основе проведенного анализа неоднородного электрического поля системы ряда параллельных тонких проводников между плоскими электродами, к которым подключен потенциал высокого напряжения, проведенного в разд. 9, и исследования процесса флокирования нитей при различных условиях, описанного выше, было предложено схематическое решение узла нанесения ворса. Основные требования, предъявляемые к конструкции узла флокирования, можно сформулировать следующим образом: высокая производительность, экономичный расход ворса и равномерность нанесения ворса на поверхность нитей. В предложенной конструкции сделана попытка учесть всю имеющуюся информацию относительно технологии флокирования нитей и разрешить существующие противоречия. На первом этапе проведен выбор и обоснование схемы подключения электродов в зоне флокирования.

Анализ возможных схем подключения электродов позволил выбрать два наиболее перспективных варианта (см. *рис. 11.2, b и d*). Каждый из вариантов имеет свои положительные стороны и недостатки.

Подключение нижнего электрода к потенциалу высокого напряжения при заземленном верхнем имеет следующие преимущества:

- более высокий порог возникновения коронного разряда позволяет использовать для нанесения ворса более высокое напряжение, что обеспечивает большую скорость флокирования, а также лучшую зарядку и ориентацию ворса;
- использование заземленного верхнего бункера-электрода дает возможность интенсивного поступления ворса непосредственно в зону флокирования сквозь сетку верхнего электрода.

Подключение обоих электродов к потенциалу высокого напряжения имеет следующие преимущества:

- более высокая плотность ворсового покрытия на нитях при одинаковой продолжительности нанесения;
- гарантированная равномерная плотность ворсового покрытия по окружности нити.

Для совмещения преимуществ обоих вариантов предложено конструктивное решение для флокатора, имеющее две последовательные зоны нанесения ворса. В первой зоне нижний электрод подключен к потенциалу высокого напряжения и в этой же зоне осуществляется поступление ворса сквозь верхний электрод с сетчатым дном. Во второй зоне оба электрода (верхний и нижний) подключены к потенциалу высокого напряжения. Обе зоны нанесения связаны между собой единым транспортером.

Как было показано в разд. 5, наибольшая скорость поступления ворса в зону флокирования реализуется при нулевой напряженности электрического поля. Именно такой режим осуществлен в первой зоне нанесения. Благодаря этому поступающего в первую зону ворса достаточно для функционирования обеих зон. Следует сразу уточнить, что осаждение ворса на нить происходит при необходимой высокой напряженности – зарядка ворса происходит на нижнем электроде.

Во второй зоне нанесения потенциал высокого напряжения одного знака подключен к обоим электродам (верхнему и нижнему). Это позволяет обеспечивать, как было показано в разд. 11.4, большую скорость нанесения и лучшую ориентацию ворса на нитях. Кроме того, в первой зоне на нить будет нанесено определенное количество ворса и, тем самым, её эффективный диаметр увеличится. За счет этого можно повысить напряженность флокирования во второй зоне и дополнительно увеличить скорость флокирования, улучшив ориентацию ворса.

Таким образом, удалось соединить положительные качества обеих схем подключения электродов и благодаря этому существенно повысить эффективность изготовления флокированных нитей.

Одной из важных проблем нанесения ворса на нити является его вылет из области флокирования. Экспериментальные исследования показали, что наблюдается вылет значительного количества ворса в процессе его нанесения, причем преимущественно в боковые стороны зоны флокирования. Обычно с этим явлением удастся справиться путем размещения под транспортером емкости для сбора ворса шириной несколько больше, чем ширина ленты транспортера. Однако, не отказываясь от этого конструктивного элемента, желательно обеспечить более эффективное использование ворса в зоне флокирования.

Другая имеющаяся проблема, проявившаяся в экспериментах, – это возникновение коронного разряда на крайних нитях при более низком напряжении, чем на остальных. Это требует либо общего снижения напряжения и, соответственно, снижения эффективности процесса, либо примирения с браком на крайних нитях.

Для сокращения вылета ворса из области флокирования предлагается использовать неоднородное электрическое поле, аналогично варианту, предложенному для плоских материалов в разд. 9.2, однако в таком виде это не решает второй проблемы. В процессе создания конструкции флокатора был предложен вариант, решающий одновременно обе проблемы. На *рис. 11.13* показана схема, поясняющая данное предложение.

Функция дополнительных электродов 4 двойная: во-первых, между дополнительными и плоскими (верхним 1 и нижним 2) электродами возникает неоднородное электрическое поле, препятствующее вылету ворса из зоны флокирования и, во-вторых, радиус кривизны такого электрода имитирует поверхность крайней нити, т. е. как бы заменяет её. Таким образом, применение подобных дополнительных электродов позволяет сразу решить обе проблемы: исключить появление коронного разряда с крайних нитей при низком напряжении и существенно сократить вылет ворса из области флокирования нитей. На данное устройство получен патент [68].

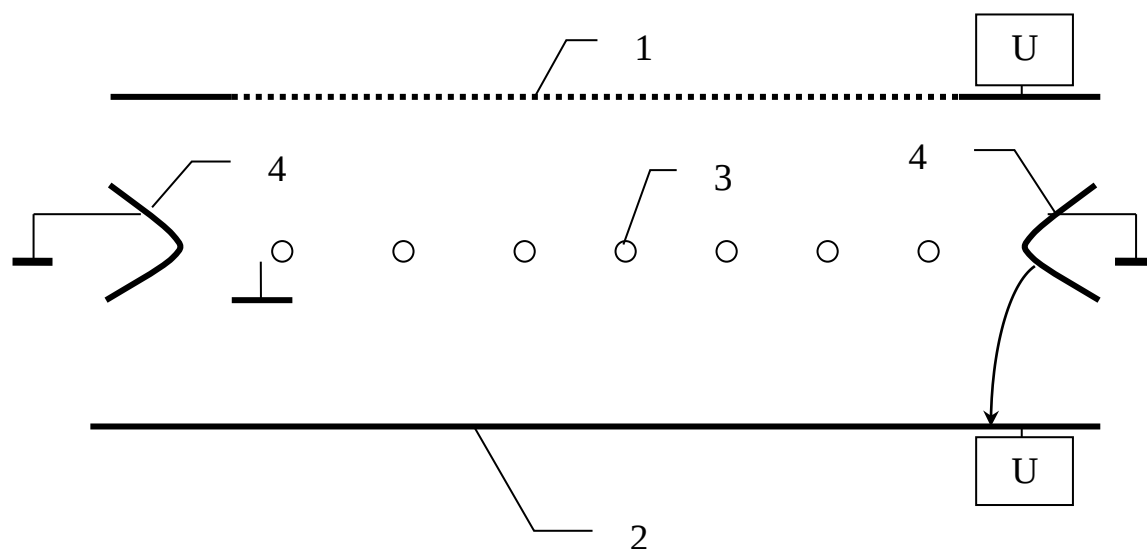


Рис. 11.13. Схема использования дополнительных электродов при флокировании нитей:

1 – верхний сетчатый электрод; 2 – нижний электрод;
3 – флокируемые нити; 4 – дополнительные электроды

Из устройства для нанесения клеевого состава нити попадают в зону флокирования. Флокатор предназначен для внедрения ворса в клеевой слой на нитях и формирования ворсового покрытия заданной поверхностной плотности. Конструкция узла флокирования позволила на лабораторной модели обеспечить скорость выпуска флокированных нитей до 16 м/мин.

На *рис. 11.14* представлена схема макета флокатора. Нити 1, покрытые связующим, перемещаются между верхними электродами 2, 3 и лентой транспортера 4 на равном расстоянии от них (80 мм). Электрофлокирование осуществляется в двух зонах – предварительной – 5 и основной – 6. Общая длина двух зон флокирования 600 мм. Напряжение на электродах 20–30 кВ. В основной зоне напряженность электрического поля выше, чем в зоне предварительного нанесения ворса. Роль верхнего заземленного электрода первой зоны выполняет сетчатое дно 3 бункера 7. Верхний электрод 2 второй зоны выполнен в виде сплошного металлического листа.

Ворс поступает на ленту транспортера 4 из бункера 7 через сетку 3. Вибрация бункеру придается с помощью электродвигателя 8. Транспортер приводится в движение электродвигателем 9. Транспортер представляет собой диэлектрическую ленту с металлическими полосками 10, которые расположены поперек транспортера. Их длина несколько меньше ширины транспортера, и они имеют контакты с противоположной стороны ленты транспортера. Ширина полосок 50 мм, расстояние между ними 5 мм. Металлические полоски выполнены из металла, устойчивого к окислению. Лента транспортера 4 проходит непосредственно над нижними электродами предварительной зоны – 11 и основной зоны флокирования 12 в контакте с токоведущими элементами нижних электродов. Под лентой транспортера между зонами флокирования расположено било 13, изготовленное из диэлектрического материала и приводимое во

вращение двигателем 14, что обеспечивает непрерывную вибрацию ленты транспортера для облегчения отрыва от нее ворса.

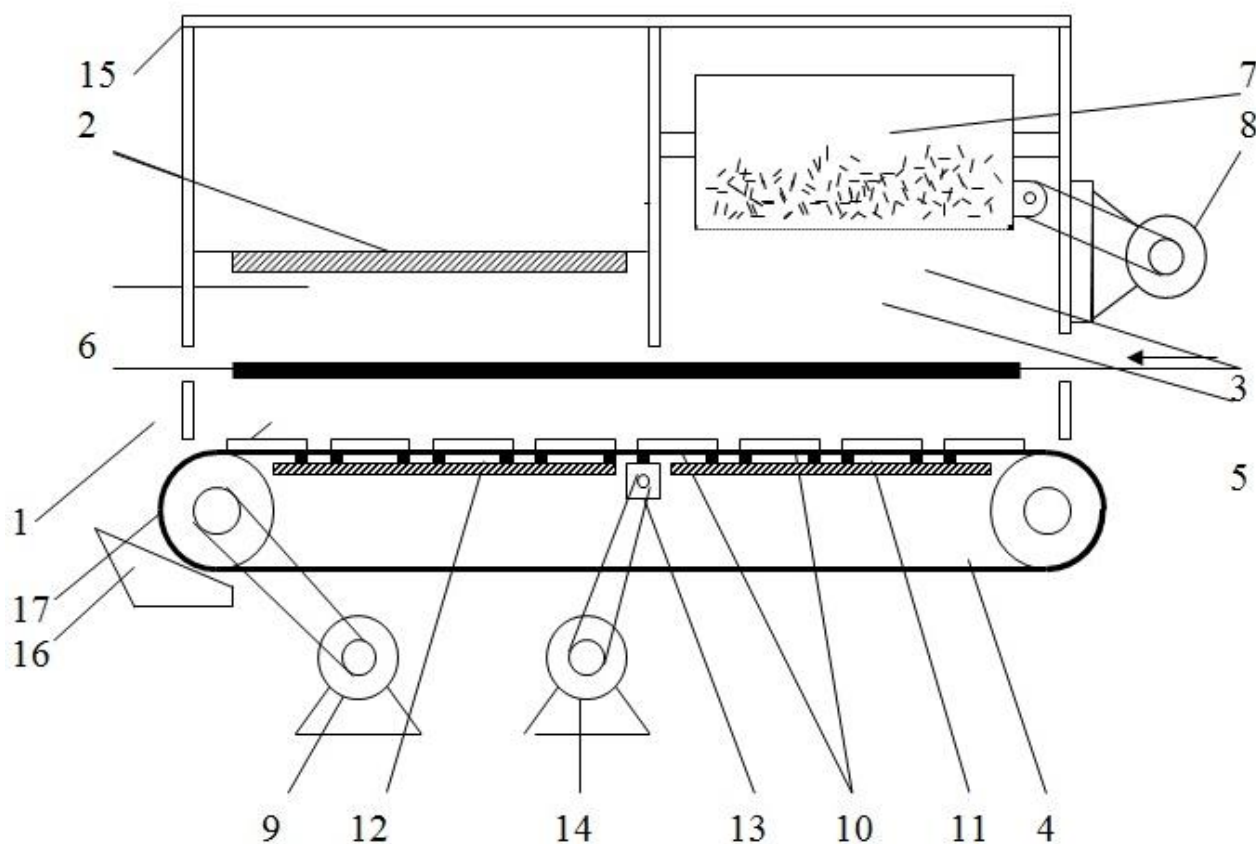


Рис. 11.14. Схема лабораторного стенда для флокирования нитей:
 1 – флокируемая нить; 2 – верхний электрод второй зоны; 3 – сетчатое дно подающего бункера; 4 – транспортер; 5 – первая (предварительная) зона флокирования; 6 – вторая (основная) зона флокирования;
 7 – подающий бункер; 8 – электродвигатель подающего бункера;
 9 – электродвигатель транспортера; 10 – металлические элементы транспортера; 11 – нижний электрод первой зоны флокирования;
 12 – нижний электрод второй зоны флокирования; 13 – било;
 14 – электродвигатель била; 15 – диэлектрический корпус установки;
 16 – бункер для сбора оставшегося на транспортере ворса;
 17 – дополнительные боковые электроды

При флокировании ворс, не перезарядившийся на нижнем электроде предварительной зоны 11, переносится транспортером во вторую зону, где металлические полоски 10 оказываются в контакте с высоковольтным электродом 12. Благодаря этому ворс, находящийся на транспортере, оказывается посредством металлических элементов в контакте с высоковольтным электродом, заряжается и под действием кулоновских сил устремляется к нитям. После того, как рассматриваемый участок транспортера прошел зону флокирования, металлические элементы теряют контакт с высоковольтным электродом 12, процесс зарядки ворса прекращается. Таким образом, металлические элементы находятся под потенциалом высокого напряжения лишь в зоне флокирования, а при выходе из зоны флокирования транспортер заземляется. Оставшийся ворс собирается в бункер 16. Вся система электродов и бункер для подачи ворса смонтированы внутри прозрачного диэлектрического корпуса 15.

Для уменьшения «вылета» ворса из зоны флокирования вдоль боковых стенок на уровне флокируемых нитей установлены дополнительные электроды 17. Дополнительные электроды представляют собой металлические уголки с углом раскрытия 30° – 40° и стороной 20 мм, расположенные вдоль крайних нитей на расстоянии 20 мм от них вдоль всей длины флокатора.

12. ТЕХНОЛОГИЯ ОТДЕЛКИ МАТЕРИАЛОВ МНОГОЦВЕТНЫМИ ВОРСОВЫМИ УЗОРАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕОДНОРОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

В разд. 9.3 была показана возможность создания ворсовых узоров на основе использования неоднородного электрического поля [96], [112], [115]. В отличие от способа получения ворсовых рисунков с помощью специальных ограничивающих сетчатых шаблонов [94], [95], т. е. способа печати ворсом, который можно считать традиционным, упомянутый способ проще и дешевле в реализации. Этот способ отличается тем важным моментом, что из одного бункера подают смесь двух ворсов разного цвета и с разными электрофизическими свойствами (*рис. 12.1*). Идея способа весьма интересна, но представляется не вполне технологичной. Это связано с использованием смеси двух ворсов, свойства которых будут постепенно выравниваться, и эффект исчезает. Возможности метода ограничены только двумя цветами и сравнительно простыми узорами.

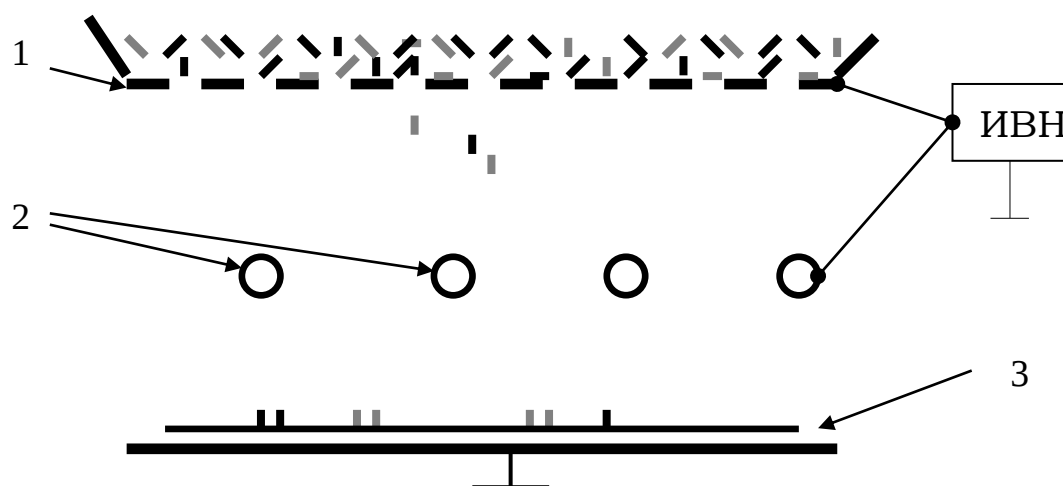


Рис. 12.1. Схема лабораторного флокатора с промежуточным электродом:
1 – подающий бункер; 2 – промежуточный электрод из параллельных проводников; 3 – нижний заземленный электрод

Данный раздел посвящен технологии и конструктивным решениям оборудования для получения многоцветных ворсовых узоров путем последовательного нанесения ворса разного цвета в неоднородном электрическом поле. Указанный способ непосредственно использует специфику движения ворса в неоднородном поле.

12.1. Формирование ворсовых узоров в неоднородном электрическом поле

Применение последовательного нанесения ворса в неоднородном электрическом поле дало возможность разработать технологию, описанную в работах [102]–[105], [112], [115] и обладающую большим спектром возможностей. Сюда, в первую очередь, относится возможность управления структурой получаемого узора путем выбора характеристик электрического поля. Для изучения их влияния на динамику изменения структуры узора на поверхности материала был проведен ряд экспериментов для промежуточного электрода в виде ряда параллельных цилиндрических проводников. Полосы, получаемые при такой конфигурации электродов, показаны на *рис. 12.2*.

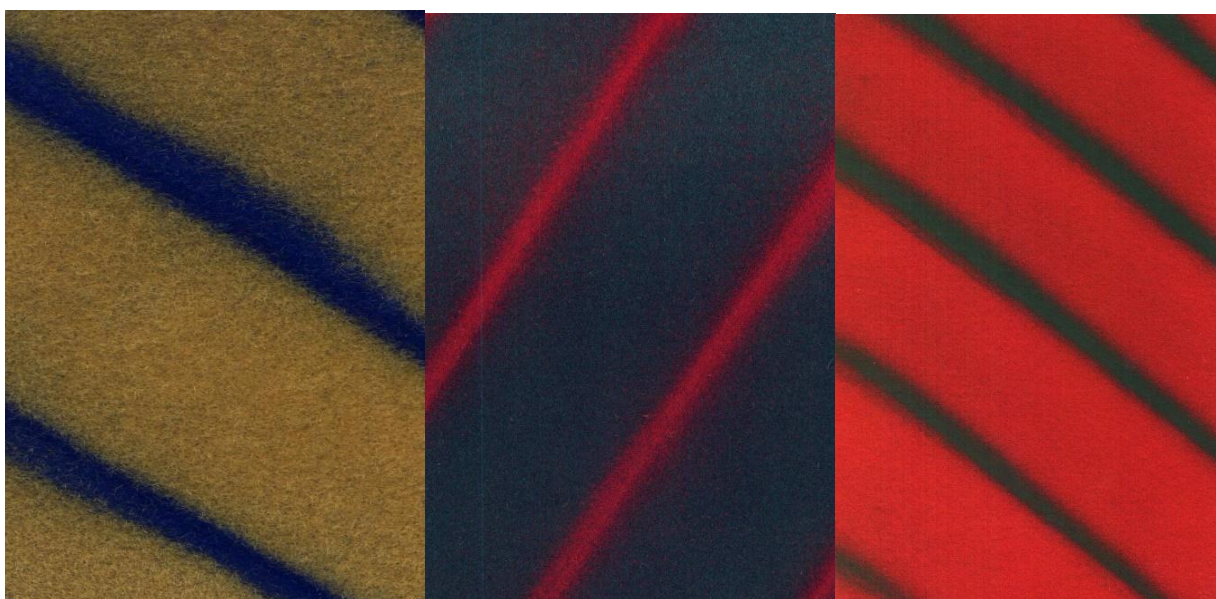


Рис. 12.2. Образец ворсового узора, полученного для промежуточного электрода в виде параллельных проводников

Несмотря на сравнительную простоту поля параллельных проводников, характер влияния его параметров должен быть аналогичным полям более сложной конфигурации. Выводы, сделанные на основе проведенных исследований, можно распространить на промежуточные электроды более сложной конструкции.

12.2. Влияние потенциала промежуточного электрода на ширину ворсовых полос

Для экспериментов был выбран промежуточный электрод, состоящий из параллельно расположенных цилиндрических проводников. Границы создаваемого им рисунка (при данной форме электрода это параллельные ворсовые полосы) достаточно четкие, поэтому за критерий оценки влияния потенциала выбран ширина ворсовой полосы. По каждому полученному образцу проводили

серию из 15 измерений, определяли среднее значение ширины ворсовой полосы с доверительной вероятностью 0,9. В данном случае использовали полиамидный ворс длиной 1 мм и линейной плотностью 0,33 текс. Напряжение на верхнем электроде устанавливали постоянным и равным $U_0 = 35$ кВ, расстояние от промежуточного электрода до основы с клеевым слоем 7 см, расстояние между цилиндрическими проводниками 35 мм, диаметр цилиндрических электродов 3 мм, время флокирования 12 с.

Подаваемое на промежуточный электрод напряжение U_1 в двух случаях (1, 2) было больше величины U_0 , т. е. отклонение напряжения $\Delta U = U_1 - U_0 > 0$, в 9 вариантах (4–12) значение напряжения U_1 уменьшалось при том же значении U_0 , т. е. $\Delta U = U_1 - U_0 < 0$ (табл. 12.1). Таким образом, получен график ширины ворсовых полос для различных значений отклонения напряжения на промежуточном электроде ΔU (рис. 12.3).

Т а б л и ц а 12.1. Результаты эксперимента

Номер образца	Напряжение U_1 , кВ	Отклонение напряжения ΔU , кВ	Ширина полосы L , мм
1	39	4	$18,0 \pm 1,5$
2	37	2	$16,5 \pm 1,0$
3	35	0	$13,0 \pm 1,0$
4	33	- 2	$10,0 \pm 0,5$
5	31	- 4	$8,5 \pm 0,5$
6	29	- 6	$7,0 \pm 0,5$
7	27	- 8	$8,0 \pm 0,5$
8	25	- 10	$11,0 \pm 1,0$
9	23	- 12	$14,0 \pm 1,0$
10	21	- 14	$18,0 \pm 1,5$
11	19	- 16	$22,0 \pm 1,5$
12	17	- 18	$26,0 \pm 2,0$

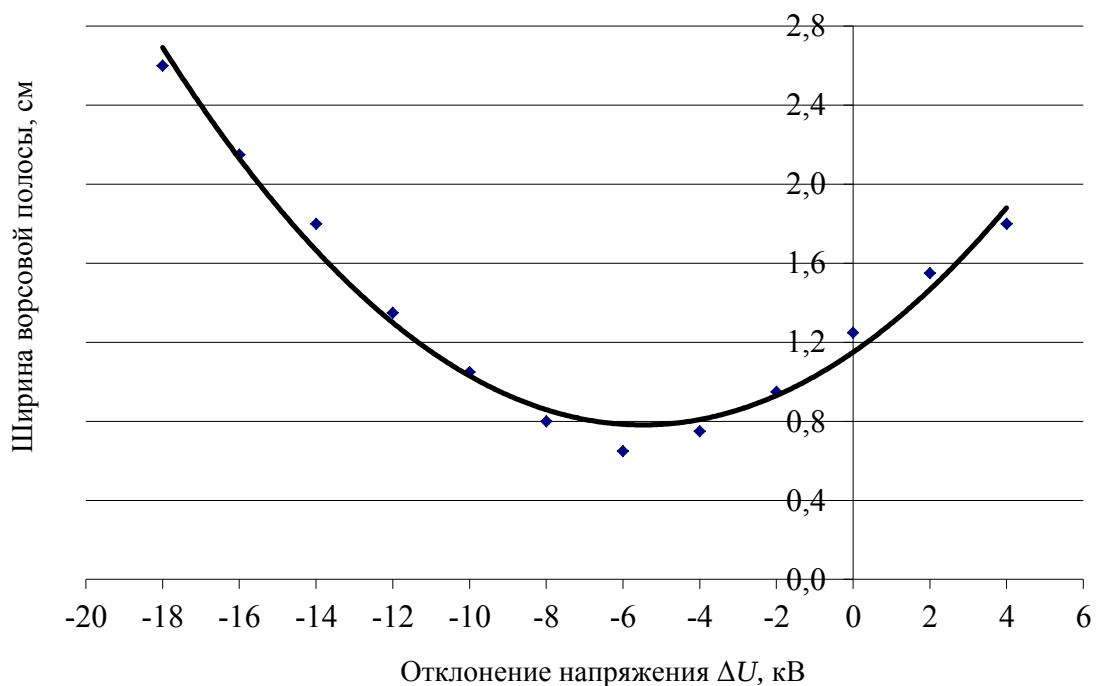


Рис. 12.3. Зависимость ширины ворсовой полосы от напряжения на промежуточном электроде

Зависимость носит параболический характер. Аппроксимирующая функция для L (см) с величиной достоверной аппроксимации $R^2 = 0,9804$ для данного случая имеет вид

$$L = 0,0122\Delta U^2 + 0,134\Delta U + 1,15;$$

$$\Delta U_{\min} = -5,5 \text{ кВ.}$$

Полученная функция от потенциала на промежуточном электроде имеет ярко выраженный минимум. Для объяснения этого факта предварительно рассмотрим влияние всех вариантов отклонения напряжения.

Первый случай, когда потенциал промежуточного электрода больше потенциала верхнего. Ворсинки приобретают тогда некоторый отрицательный заряд $-q_0$ и испытывают притяжение к проводникам промежуточного электрода и при движении смещаются по направлению к ним. Если разность потенциалов $\Delta U = U_1 - U_0$ существенна, то часть ворсинок, имеющая значительную скорость и двигающаяся на некотором удалении от проволок промежуточного электрода, минует их, не перезаряжаясь. Далее они попадают в поле с противоположно направленной напряженностью. Происходит их торможение, часть ворсинок разряжается при встрече с ворсинками противоположного заряда. Это ведет к изменению объемного заряда ворса в данной области и, следовательно, к изменению электрического поля. Ворсовая полоса «размывается».

При одинаковом потенциале верхнего и промежуточного электродов часть ворсинок заряжается в зоне высокой напряженности около проволок промежуточного электрода, а часть – при контакте с ними. Заряженные ворсинки двигаются к середине полосы. Слабо заряженные или незаряженные ворсинки

проходят между проволоками, где напряженность поля наименьшая, и также попадают в середину полосы или близко к ней.

Во втором случае, когда напряжение на промежуточном электроде ниже, чем на верхнем, напряженность электрического поля около подающей сетки будет отлична от 0 и направлена вниз. Это означает, что ворсинки приобретают некоторый заряд q_0 и двигаются вниз, минуя по пути промежуточный электрод. Если в этом случае разность потенциалов достаточно существенна, то часть ворсинок, имеющая достаточную скорость, проходит промежуточный электрод без касания и перезарядки и, соответственно, слабо отклоняясь от траектории первоначального движения. Это приводит к тому, что образующаяся ворсовая полоска изначально имеет значительную ширину.

Если разность потенциалов не велика, то ворсинки в верхней зоне приобретают незначительный заряд. Поэтому скорость движения ворсинок к промежуточному электроду мала. Ворсинки не пролетают мимо, практически все они перезаряжаются и двигаются дальше, стремясь попасть в середину полосы. Т. е. существует потенциал промежуточного электрода U_1 , при котором наибольшее число ворсинок приобретает заряд у промежуточного электрода, обеспечивая, таким образом, наименьшую ширину ворсовой полосы. Положение минимума для каждого конкретного случая, вероятно, зависит от геометрических и электрофизических свойств ворса и параметров промежуточного электрода (точнее, от расстояния между проволоками электрода).

На основе визуального осмотра образцов видно, что центр всех ворсовых полос расположен четко в середине между проводниками. Ширина полосы имеет явный минимум при $\Delta U = -5,5$ кВ. Отклонение от этого напряжения на промежуточном электроде ведет к росту ширины ворсовой полосы, а границы становятся размытыми. Плотность ворса по всей ширине полос при $\Delta U < 0$ становится более равномерной, но снижается, а границы становятся более четкими.

Таким образом, варьирование потенциала промежуточного электрода можно использовать как для управления параметрами получаемого узора, так и для создания эксклюзивных рисунков. Например, близкие цвета создадут плавный размытый переход, а два контрастных цвета, при правильном подборе, на границе смешаются и образуют третий цвет.

12.3. Влияние основных конструктивных характеристик установки и условий флокирования на процесс формирования ворсового рисунка

Данный раздел посвящен изучению влияния основных технологических параметров процесса и технических параметров на характеристики получаемого ворсового узора. В качестве основного критерия была выбрана ширина ворсовой полосы при использовании промежуточного электрода в виде параллельных цилиндрических проводников и получены эмпирические зависимости от основных параметров процесса.

На основе анализа процесса и предварительных исследований, представленных в разд. 12.1, 12.2 можно предположить, что на структуру ворсового ри-

сунка, получаемого в неоднородном электрическом поле, влияет подаваемое на электроды напряжение, время нанесения, расстояние от промежуточного электрода до основы с клеевым слоем, а также геометрические параметры самого промежуточного электрода.

Проведенные исследования были нацелены, прежде всего, на выявление общих закономерностей о взаимосвязи таких характеристик, как расстояния от промежуточного электрода до верхнего и нижнего электродов, расстояние между цилиндрическими элементами электрода, длительность нанесения и т. п., с шириной, получаемых ворсовых полос на поверхности основы. Т. е. численные значения коэффициентов для полученных эмпирических соотношений носят сугубо частный характер. Они получены для ворса с определенными геометрическими параметрами, электрическим сопротивлением и т. д., однако характер взаимосвязей должен носить достаточно общий характер.

В качестве исходного был использован вариант подключения одинакового потенциала к верхнему и промежуточному электродам, поскольку для этого требуется только один источник высокого напряжения. Использование делителя напряжения для создания требуемого потенциала на промежуточном электроде, как показывает опыт проведения исследований, представляется не эффективным. Дело в том, что во флокаторе параллельно току, текущему через делитель, течет ток, создаваемый заряженным ворсом, величина которого не стабильна. Это аналогично подключению параллельно делителю сопротивления переменной величины. Поэтому обеспечить точное значение потенциала на промежуточном электроде с помощью делителя не удастся.

Ширину получаемых ворсовых полос определяли, усредняя измерения как вдоль полосы, так и для разных параллельных полос. Был использован полиамидный ворс длиной 1 мм и линейной плотностью 0,33 текс. По каждому образцу проводили 15 измерений и определяли среднее значение ширины ворсовой полосы с доверительной вероятностью 0,9.

Первый фактор, влияние которого оценивали, – это время нанесения ворса. Именно эта зависимость определяет производительность технологического процесса. В первом варианте напряжение на электродах было равным 30 кВ, высота промежуточного электрода над нижним электродом составляла 7 см. Во втором варианте напряжение 45 кВ, при той же высоте. Промежуточный электрод представлял собой ряд параллельных проводников цилиндрической формы. Расстояние между ними – 3,5 см, диаметр проводников – 3 мм.

Здесь не будет представлен графический вид полученных зависимостей из-за их частного характера. Выбор вида эмпирической зависимости определялся исходя из физического характера процесса и результатов экспериментальных исследований.

Характер временной зависимости не может иметь максимума, поскольку ширина полосы может только возрастать. Однако характер зависимости должен иметь асимптотический характер. В области, достаточно удаленной от асимптоты, наиболее простая функция, достаточно хорошо описывающая результаты эксперимента, имеет следующий вид:

$$L = 3,95\sqrt{t} + 2,01.$$

Полученные результаты свидетельствуют, что с увеличением времени нанесения ширина ворсовой полосы растет до тех пор, пока ворс не покрывает все пространство под проводниками электрода. Предложенный вариант аппроксимации, безусловно, не является единственным, но он хорошо описывает полученные результаты эксперимента. На основе этой зависимости можно вычислить время полного заполнения интервала $L = 35$ мм. Это время равно 70 с, что вполне соответствует данным эксперимента.

Для второй экспериментальной серии ($U = 45$ кВ) получен аналогичный вид зависимости с иными коэффициентами:

$$L = 3,97\sqrt{t} + 1,02.$$

Время заполнения в этом случае составит 73 с.

Следующим по важности технологическим параметром, влияние которого необходимо было оценить, – это напряжение, подаваемое на электроды.

При проведении этой серии измерений расстояние между электродами (промежуточным и нижним) составляло 7 см, время флокирования было постоянным и составляло 6 с. Варьировалось подаваемое на электроды напряжение.

В этом случае эмпирическая функция на основе экспериментальных результатов имеет следующий вид:

$$L = -0,34U + 22,5.$$

Полученная зависимость сугубо линейна, и с увеличением подаваемого на электроды напряжения ширина ворсовой полосы уменьшается. Не вполне ясно, как следует трактовать то, что при напряжении $U = 66$ кВ ширина ворсовой полосы становится равной нулю. Это достаточно сложно проверить экспериментально, поскольку такое напряжение при расстоянии между электродами 7 см соответствует напряженности, равной $E \approx 9,5$ кВ/см. Такая напряженность в обычных условиях недостижима из-за электрического пробоя. Можно предположить, что при высокой напряженности характер зависимости будет иным. Таким образом, данная эмпирическая зависимость вполне обоснована в рамках рабочего диапазона изменения напряжения.

Далее было исследовано влияние расстояния между промежуточным электродом, образованным цилиндрическими проводниками, и нижним электродом на ширину ворсовых полос. Эта зависимость представляет большой интерес для формирования рисунка. При проведении этой серии измерений варьировалось расстояние между промежуточным и нижним заземленным электродами (h , см). Подаваемое напряжение оставалось постоянным – 35 кВ, время флокирования составляло 6 с. Эмпирическая функция для данной экспериментальной зависимости $L(h)$, в мм, следующая:

$$L = 0,036h^2 + 0,26h + 9,71.$$

Полученная нелинейная зависимость показывает, что с увеличением расстояния между электродами ширина ворсовой полосы увеличивается. При расстоя-

нии, равном $h = 23$ см, и при данном времени флокирования (6 с) весь промежуток между цилиндрическими проводниками будет заполнен ворсом: $L(23 \text{ см}) = 35$ мм. Этот результат, вероятно, вновь связан с небольшим диапазоном изменения фактора. Дело в том, что при напряжении 35 кВ и указанном расстоянии (23 см) напряженность будет мала $E = 1,5$ кВ/см, а следовательно, мал заряд ворса. Это ведет к плохой ориентации ворса на поверхности материала.

При сокращении расстояния ширина ворсовой полосы уменьшается, но при расстоянии $h < 5$ см напряженность электрического поля слишком высока, и возникают электрические пробой. Поэтому данную зависимость нельзя экстраполировать в эту область.

На следующем этапе было изучено влияние на ширину ворсовых полос расстояния между цилиндрическими проводниками промежуточного электрода D . Анализ этой зависимости важен для изучения динамики формирования структуры ворсового узора. Для исследования этого вопроса было изготовлено пять вариантов промежуточного электрода с расстояниями между параллельными цилиндрическими проводниками: 1, 2, 3, 4 и 5 см.

С помощью этих электродов при напряжении 35 кВ и времени флокирования 6 с были изготовлены образцы. Проведенные измерения позволили получить зависимость, которую можно аппроксимировать линейной функцией со следующими числовыми коэффициентами:

$$L = 2,37D + 3,87.$$

Здесь диапазон изменения фактора от 1 до 5 см. Из полученной зависимости следует простой вывод о том, что с увеличением расстояния между проводниками электрода ширина ворсовой полосы будет расти. Можно предположить, что для электродов с более сложной формой рисунка эта тенденция будет сохраняться.

Влияние свойств ворса

Внешний вид рисунка и качество ворсового покрытия определяется в значительной степени свойствами ворса. Геометрические параметры ворса влияют на плотность его нанесения, внешний вид, а также могут создавать рельеф. Электрофизические свойства определяют плотность ворсового покрытия, четкость рисунка и скорость его формирования [112], [115].

В ходе эксперимента был изготовлен ряд флокированных образцов, свойства этих ворсов измерены по методикам, описанным в разд. 2.3. На образцах была измерена ширина ворсовых полос. Результаты измерений и исходные параметры представлены в табл. 12.2.

Общая закономерность, проявляющаяся при анализе данных таблицы, очевидна – снижение качества ворса ведет к увеличению ширины ворсовой полосы. Подробнее анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что наиболее важными свойствами ворса разд. 2.3), определяющими вид рисунка, являются ток, создаваемый заряженным ворсом [15], и его «прыгучесть». При возрастании «прыгучести» (доля разлетевшегося ворса) и тока ширина ворсовой полосы уменьшается. Удельная электропроводность, разделяемость и при-

рода ворса в меньшей степени определяют ширину получаемой ворсовой полосы.

Т а б л и ц а 12.2. Влияние свойств ворса

Вид волокна	Длина, мм	Удельная электропроводность, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	Разделяемость, %	Ток, мкА	Прыгучесть, %	Напряжение, кВ	Время, с	Ширина полосы, мм
ПА	1,0	$1,09 \times 10^{-7}$	90,5	1,0	100	30	10 20	4,0 7,6
						40	10 20	3,2 6,8
ПА	1,0	$1,60 \times 10^{-8}$	85,6	0,95	45	30	10 20	8,8 9,4
						40	10 20	7,9 8,3
ПА	1,0	$4,20 \times 10^{-8}$	96,5	0,3	12	30	10 20	9,1 11,3
						40	10 20	8,4 9,2
Вискозное	0,6	$1,14 \times 10^{-9}$	92,6	0,4	12,5	30	10 20	8,3 9,7
						40	10 20	7,5 8,6
ПА	0,5	$2,25 \times 10^{-9}$	92,8	0,7	50	30	10 20	7,9 9,4
						40	10 20	7,2 8,0

Влияние колебаний напряжения

При отделке текстильных изделий флокированными рисунками подаваемое на электроды напряжение может варьироваться по разным причинам. Изменение напряжения влияет на структуру формируемого рисунка, следовательно, при отклонении напряжения от заданного значения ворсовые рисунки на изделиях будут отличаться. В то же время повторяемость получаемых ворсовых рисунков часто является важным показателем качества отделки. Технологическими факторами, которые могут отклоняться от постоянных значений в процессе производства, можно считать напряжение, но в большей степени электрофизические свойства ворса.

Для выявления воздействия колебаний потенциала промежуточного электрода на ширину ворсовых полос были изготовлены образцы с одинаковым ворсом при напряжении 35 и 37 кВ. Остальные параметры технологического процесса сохранялись постоянными. Далее на опто-электронном приборе по методике, описанной в работах [79]–[82], через каждые 2,5 мм в направлении, перпендикулярном ворсовым полоскам, была измерена плотность ворсового покрова. Оказалось, что малое отклонение напряжения (± 1 кВ) лишь незначительно влияет на ширину ворсовых полос. Однако необходимо четко контролировать стабильность напряжения в процессе производства, так как изменение структуры ворсового покрытия все-таки имеет место, и оно может быть нежелательным.

Еще более важный фактор, который способен нарушить идентичность получаемых узоров, – это электрофизические свойства ворса. Здесь речь идет об одном и том же ворсе, свойства которого изменились в процессе работы или за время хранения. В качестве ключевого параметра для ворса был выбран коэффициент заряда ворса. В процессе работы, например, при снижении влажности в производственном помещении, может измениться коэффициент зарядки и, как следствие, средний заряд ворсинок, снижение которого отрицательно повлияет на качество ворсового узора. Для изучения этого вопроса определенное количество ворса было размещено в эксикаторе при пониженной влажности. В качестве исходного был использован ворс длиной 1 мм из ПА волокна линейной плотностью 0,33 текс с коэффициентом зарядки $k = 4,1 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В. После нахождения при пониженной влажности коэффициент зарядки стал равным $3,1 \cdot 10^{-18}$ Кл·м/В. «Прыгучесть» ворса, измеренная по методике, описанной в разд. 2.3, составляла 21 и 28 с соответственно.

С использованием этого ворса были получены образцы при одинаковых условиях флокирования. Их анализ показал, что распределение плотности ворсового покрытия изменилось несколько больше, чем в предыдущем случае, но ширина полосы при этом изменилась незначительно и визуально изменений в рисунке фактически не обнаружено.

Следовательно, при небольшом колебании рабочего напряжения и не очень существенном изменении свойств ворса, возможно, воспроизведение заданного рисунка с высокой степенью повторяемости. Однако постоянный контроль свойств ворса следует признать необходимым.

12.4. Технологический процесс и схемы подключения электродов для получения многоцветных ворсовых узоров

Разработанная технология получения многоцветных ворсовых узоров и рисунков предназначена, в первую очередь, для отделки текстильных изделий, но пригодна для самого широкого ассортимента изделий. В качестве основы может применяться любой плоский материал, к которому можно подобрать удовлетворительный клеевой состав: дерево или материалы на его основе (ДСП, ДВП и т. п.), стекло, керамика, металл, картон и т. д.

К сожалению, не все материалы имеют хорошую адгезию к применяемым в технологии флокирования клеевым композициям. Поэтому для отделки некоторых материалов сначала необходимо провести подготовительную операцию. Она может заключаться в очистке поверхности от загрязнений, обезжиривании или грунтовке поверхности.

На следующем этапе осуществляется нанесение связующего. Вид и состав клеевой композиции выбирают в зависимости от вида и структуры флокируемой поверхности (разд. 2.5). Способ нанесения определяется преимущественно видом клея, его вязкостью и требуемой производительностью и может осуществляться кистью, раклей через сетчатый шаблон или распылением. При нанесении клея в виде рисунка с помощью сетчатого шаблона используют адгезив на основе водных дисперсий полимеров и получают ворсовый рисунок, а при сплошном нанесении клея на поверхность и последующем нанесении ворса по данной технологии получают ворсовые узоры.

Непосредственно сам процесс нанесения многоцветных ворсовых узоров заключается в последовательном нанесении ворса разного цвета на нескольких флокирующих установках. Сначала на первой установке с промежуточным электродом под действием неоднородного электрического поля формируется узор из ворса первого цвета. Далее, если рисунок двухцветный, то на установке без промежуточного электрода наносят ворс второго цвета, который заполняет площадь, не занятую первым ворсом. Если планируется рисунок с большим числом цветов, то после первой операции дальнейшее флокирование вновь ведется с промежуточным электродом уже другой формы и ворсом другого цвета. Повторение этой операции зависит от количества цветов, запланированных в рисунке. Заключительное флокирование проводится без промежуточного электрода, последний ворс заполняет свободную площадь.

Все это показывает важность для этой технологии целого ряда аспектов развитой в предыдущих разделах теории: описание неоднородного поля ряда проводников, модель ориентации и процесса осаждения при последовательном нанесении разного ворса.

Рекомендуемая последовательность нанесения зависит от свойств, геометрических размеров и природы ворса, а также от специфики создаваемого рисунка (рельефный узор, плавные цветовые переходы, четкие границы цветов). Максимальное количество цветов в рисунке зависит от величины открытого времени применяемого клея, количества флокирующих установок и цветового решения создаваемого рисунка.

Выбор способа и режима сушки зависит в основном от материала основы и вида клея. Большинство клеевых композиций на основе водных дисперсий акриловых полимеров, применяемых, в первую очередь, для текстильных материалов, требует для термофиксации температуру 130–150 °С. Это не всегда соответствует допустимой температуре для основы. Для такого случая разработаны специальные добавки, снижающие температуру термофиксации связующего.

Клеи с использованием органических растворителей можно сушить при комнатной температуре в течение длительного времени (обычно 24 ч), но эти

клеи обычно применяют для металлов, пластиков, стекла и т. п., но не применяют для текстильных материалов.

После сушильной камеры изделия очищают от не закрепившегося ворса, осуществляют их разбраковку и упаковку.

Для промышленного использования разработанной технологии создания многоцветных флокированных узоров необходимо предложить принципиальное конструктивное решение камеры флокирования, на базе которой можно создать полную установку. Такой модуль должен соответствовать всем требованиям: обеспечивать интенсивную подачу ворса, возможность быстрой замены ворса, подключение всех электродов к соответствующим потенциалам, быстрое и удобное размещение изделия в камере флокирования, быстрое отключение высокого напряжения и разрядка высоковольтных электродов после завершения флокирования, возможность быстрого изменения формы промежуточного электрода.

Как было сказано ранее, в представленной технологии ворсовый узор формируется за счет введения в зону флокирования промежуточного электрода. Существуют два различных, но допустимых варианта подключения электродов камеры:

- потенциал высокого напряжения подключают к верхнему и промежуточному электродам, нижний электрод при этом заземляют;
- потенциал высокого напряжения подключают к нижнему электроду, верхний и промежуточный – заземляют.

Патенты, полученные на разработанный способ получения многоцветных ворсовых рисунков, включают оба эти варианта подключения электродов к потенциалу высокого напряжения [102]–[104].

Первый вариант подключения показан на примере образования трехцветного флокированного узора (*рис. 12.4*). Здесь первые два ворса наносят в соответствии с описанной схемой подключения, а последний ворс – в традиционном варианте, т. е. без промежуточного электрода.

Второй вариант представлен на *рис. 12.5*, на примере получения двухцветного узора. Здесь показана возможность использования одного источника высокого напряжения на две камеры флокирования.

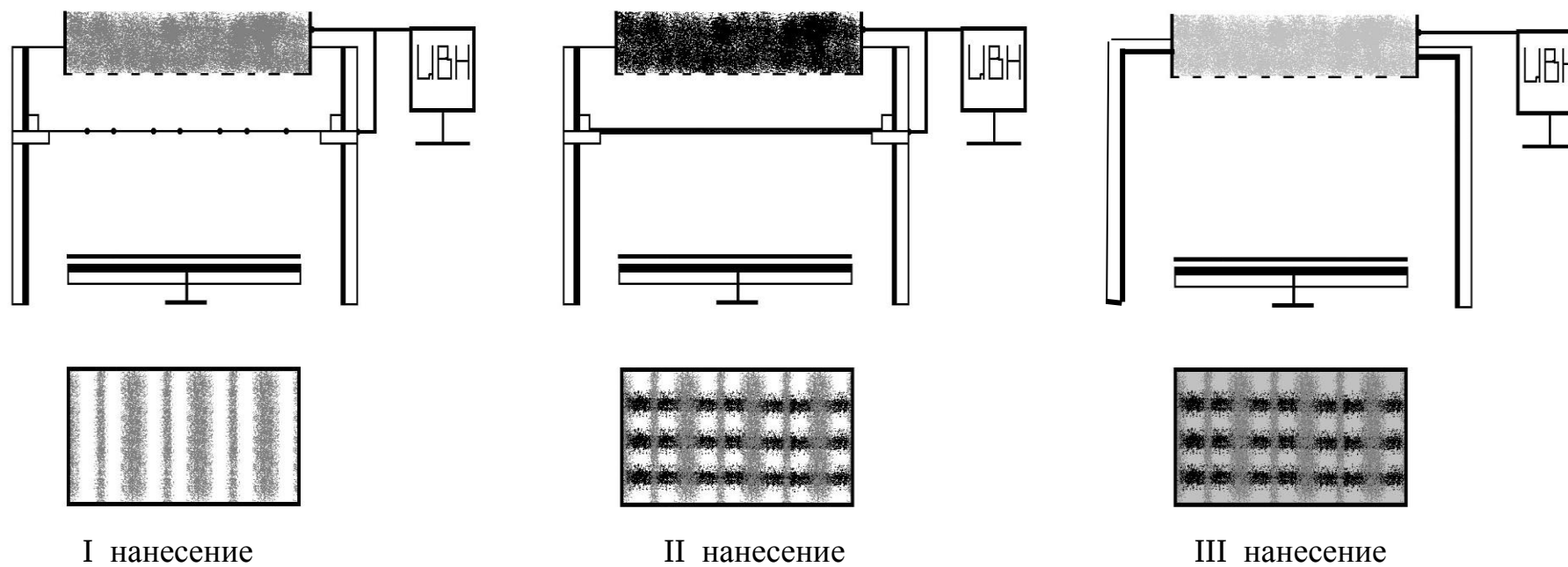


Рис. 12.4. Схема формирования трехцветного флокированного узора

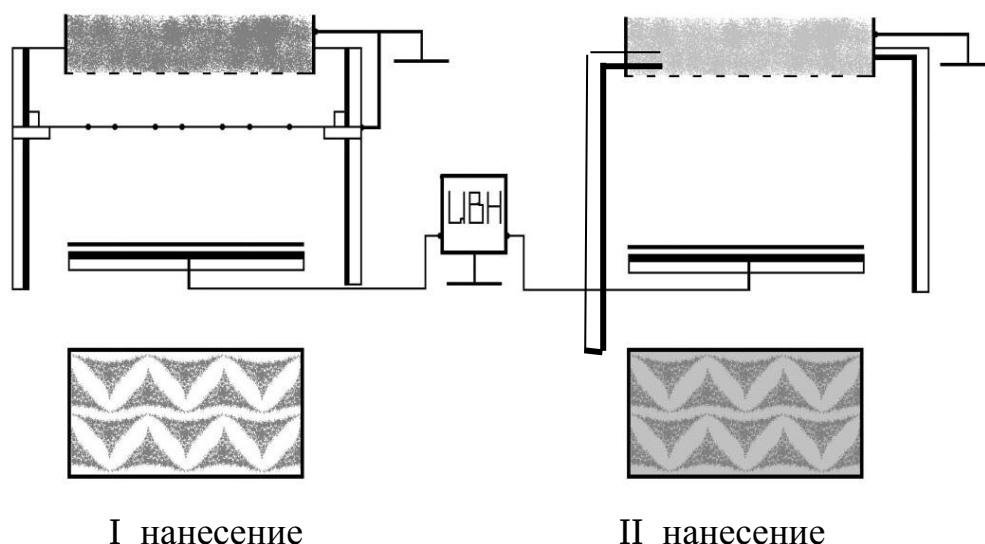


Рис. 12.5. Схема формирования двухцветного флокированного узора

Первый вариант подключения может быть реализован на любом пригодном для данной технологии оборудовании (разд. 12.4): ручных флокаторах, электропневмофлокаторах, флокаторах камерного типа, флокаторах с транспортером. Однако при использовании первых двух типов оборудования недостатком является значительный разлет ворса из зоны флокирования. Наиболее перспективным типом оборудования для отделки штучных изделий по данной технологии следует считать камеру флокирования, в конструкции которой легче всего реализовать основные технологические принципы получения ворсовых узоров в неоднородном электрическом поле.

Второй вариант (рис. 12.5) является менее традиционным в сравнении с первым (рис. 12.4), но в данном случае имеет некоторые преимущества:

- 1) возможность использовать один источник высокого напряжения для нескольких флокаторов;
- 2) дозагрузку ворса можно производить в процессе работы, без выключения источника высокого напряжения;
- 3) разлет ворса из зоны флокирования существенно меньше.

Этот вариант подключения электродов затруднительно использовать для флокаторов с транспортером из-за некоторых технических сложностей с системой подключения высокого напряжения.

12.5. Формирование ворсовых узоров с использованием стандартных форм промежуточного электрода. Прогнозирование вида узора

В разд. 12.3 были получены закономерности, связывающие основные технологические и конструктивные параметры с шириной ворсовых полос для системы параллельных проводников. Эти закономерности, как показывает опыт, в целом сохраняются и для электродов другой формы. Например, геометрические размеры рисунка возрастают с уменьшением напряжения и ростом времени флокирования. Однако ряд особенностей, касающихся формы получа-

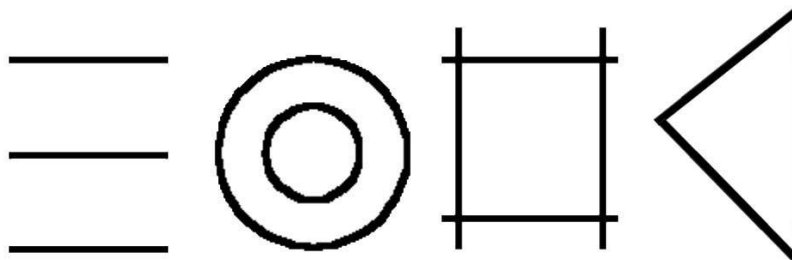
емого ворсового рисунка, зависят не столько от указанных параметров, сколько от расположения проводников промежуточного электрода. Точно прогнозировать форму ворсового рисунка в зависимости от формы промежуточного электрода достаточно сложно. Но представление об этом можно получить на основе электродов простых геометрических форм. На *рис. 12.6, а* представлены электроды четырех основных форм и вид получаемого ворсового рисунка. В качестве общей закономерности формирования ворсового узора можно отметить стремление ворсинок занять области с наименьшей напряженностью электрического поля в плоскости электрода. Для создания ворсовых рисунков с более сложным узором можно использовать промежуточные электроды, сочетающие в себе элементы простых форм (*рис. 12.6, б*).

По полученным образцам в дальнейшем возможно с достаточной степенью точности прогнозировать вид получаемого ворсового рисунка. В ряде случаев можно по заданному узору проектировать промежуточный электрод для его получения. Варьирование технологических и конструктивных параметров, определяющих вид рисунка, позволяет получать разнообразные рисунки как с четкими границами цветов, так и с плавными переходами цветов, дизайн которых будет ограничиваться только фантазией заказчика и законами художественной композиции. На *рис. 12.7* представлен флокированный образец, полученный с помощью промежуточного электрода сложной формы, показанного на левом рисунке.

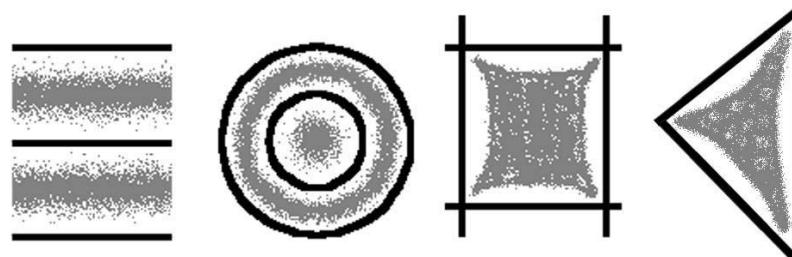
Таким образом, мы имеем возможность создавать ворсовые узоры разнообразной формы и с различными цветовыми эффектами. Сюда относится получение разнообразных цветовых переходов ворса и возможность формирования рельефных ворсовых узоров, которые можно получать при использовании ворса разной длины.

Важным моментом данной технологии является последовательность нанесения ворса и чередования условий флокирования. Чтобы получать узоры с контрастным переходом цвета, необходимо сначала наносить высококачественный ворс при высокой напряженности электрического поля, а для фоновой цвета можно использовать меньшую напряженность или использовать менее качественный ворс. Если требуется получить плавный переход цвета, то сначала используют меньшую напряженность. Процесс взаимопроникновения разного ворса описан в разд. 6.5.

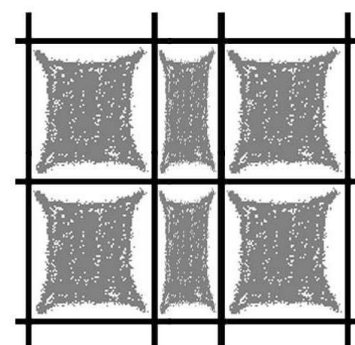
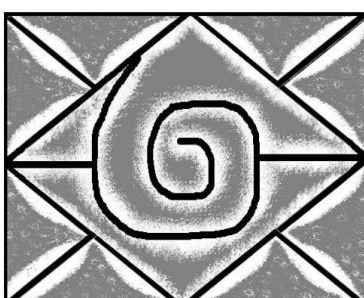
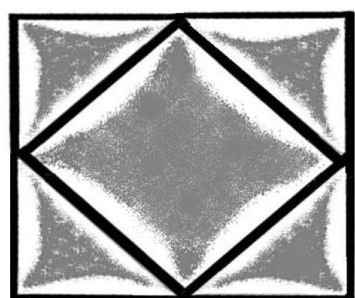
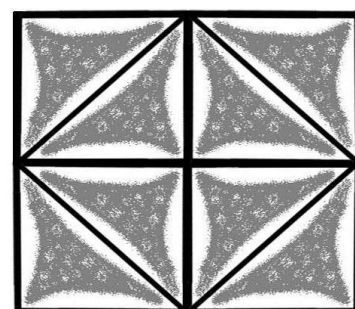
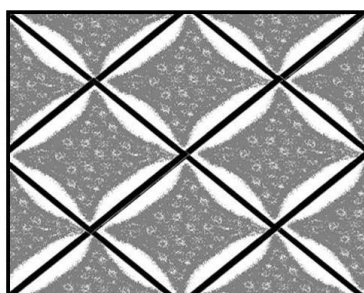
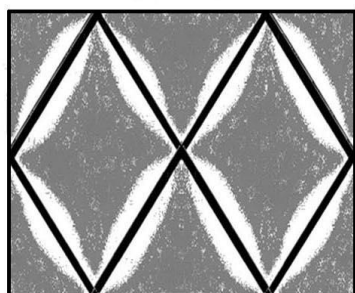
Форма
промежуточного
электрода



Вид ворсового
рисунка

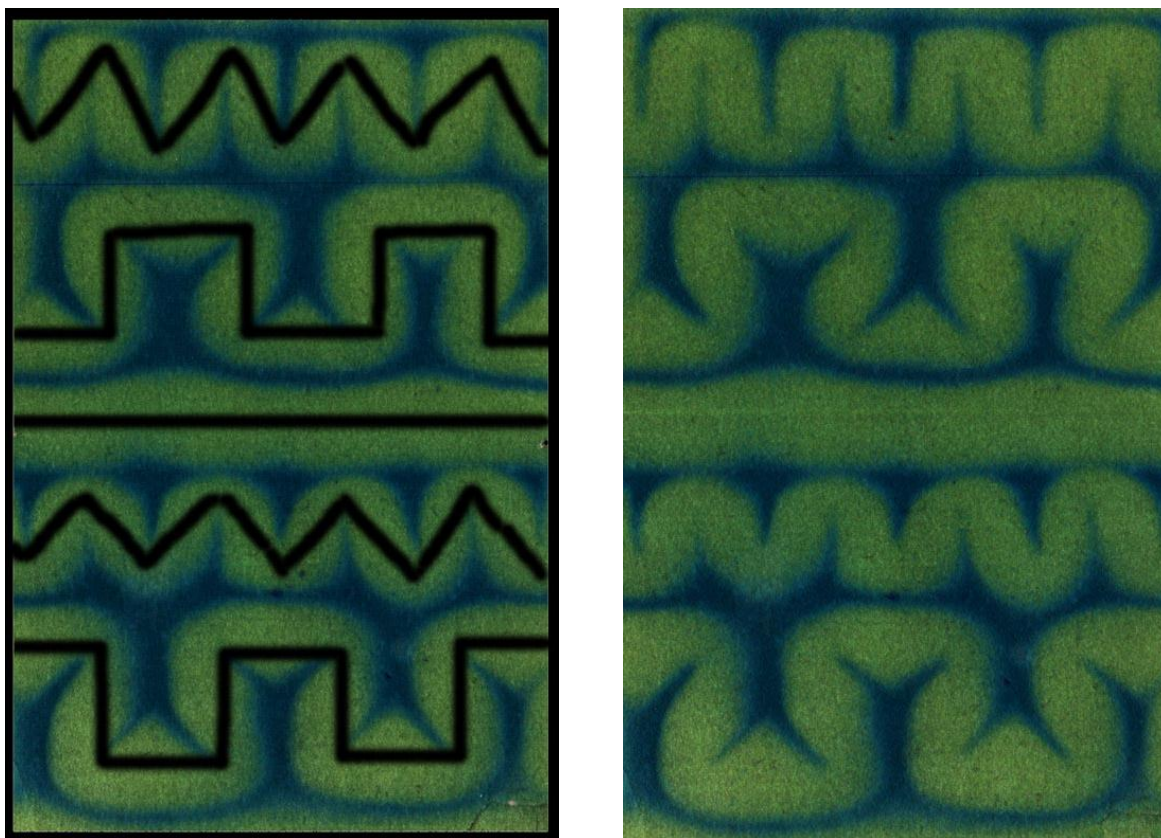


a



б

Рис. 12.6. Вид промежуточного электрода и получаемого рисунка



a

б

Рис. 12.7. Образец с ворсовым узором:
a – форма электрода и полученный узор;
б – готовый флокированный узор

Можно отметить и то, что оборудование, необходимое для формирования ворсового узора по описанной технологии, значительно проще и дешевле существующих карусельных установок (разд. 13), поскольку не требует столь высокой точности изготовления и настройки при изменении вида рисунка.

Помимо этого технология позволяет создавать ворсовые узоры на объемных изделиях, что подробнее будет описано в следующем разделе.

12.6. Технология получения многоцветных ворсовых узоров на объемных изделиях

Получение многоцветных ворсовых узоров на объемных изделиях по известным технологиям представляет значительные сложности [116]. Это связано с тем, что шаблоны как для нанесения красителя, так и для нанесения ворса должны с высокой степенью точности соответствовать форме изделия. Поэтому такие изделия не получили распространения.

Развиваемая в данной работе технология, в отличие от других, позволяет разработать вполне технологичный способ получения многоцветных ворсовых узоров на объемных изделиях, причем одинаковые промежуточные электроды можно использовать для изделий различных форм.

Последовательность основных технологических операций получения ворсовых узоров в неоднородном электрическом поле на объемных изделиях в основном та же, что и для плоских изделий. Поэтому далее рассматриваются только существенные отличия.

В первую очередь, разница между технологией для объемных изделий от технологии для плоских изделий в том что, плоское изделие размещается на плоском электроде. При этом расстояние до промежуточного электрода составляет обычно 6–8 см. Для разрабатываемой технологии это означает, что либо электрод должен быть внутри объемного изделия, либо поверхность такого изделия должна стать электродом. Если изделие или его поверхность имеют достаточную электропроводность, вопрос автоматически снимается. Если же изделие из диэлектрического материала, то его поверхности необходимо сначала придать достаточную электропроводность. При использовании клея на основе водной дисперсии вопрос также решен – достаточно лишь подключить нужный потенциал к клеевой поверхности.

К сожалению, большая часть возможного ассортимента объемных изделий, поверхность которых имеет смысл покрывать ворсом, изготовлена из диэлектрических материалов, адгезия которых к указанным клеям не высока. Это, например, стекло, керамика, пластик и т. п. Для решения указанной проблемы, по крайней мере в случае полых изделий, предложен следующий выход. Внутренняя поверхность изделия смачивается электролитом, например 5–20%-м водным раствором NaCl, и к ней подключается электрод с нужным потенциалом или заземление.

Способ периодического нанесения ворса на объемные изделия

Варианты конкретных технических решений для такой технологии можно разделить на два основных направления:

- изделие во время нанесения ворса статично (неподвижно);
- изделие во время нанесения ворса можно вращать или перемещать.

На оба эти способа получен патент [117].

Первый способ удобен тем, что практически не требует специального оборудования, отличающегося от оборудования, применяемого для получения ворсовых узоров на плоских материалах. Единственная разница в том, что промежуточный электрод может быть не только плоским (*рис. 12.8, а*), а, например, в форме полуцилиндра (*рис. 12.8, б*).

Установка для нанесения ворсовых узоров на объемные изделия состоит из подающего ворс 1 бункера 2, промежуточного электрода 4, подключенного, так же как и бункер 2, к источнику высокого напряжения 3 и нижнего заземленного электрода 5. Между электродами 4 и 5 располагают изделие 6.

Процесс формирования многоцветных ворсовых узоров на полой объемной изделии происходит в несколько этапов:

1. Создание электропроводного слоя на внутренней поверхности осуществляют путем заливания и последующего выливания электролита (например, 5–20%-й раствор NaCl в воде). После этого изделие 6 закрепляют на спе-

циальной оснастке 7 (рис. 12.8), часть которой покрыта металлом, например, фольгой, для обеспечения контакта внутренней поверхности с заземлением.

2. Нанесение клея на поверхность изделия (кистью, распылением, окунанием и т. п.). Выбор вида клея зависит в первую очередь от материала изделия.

3. Для нанесения узора ворсом первого цвета изделие на оснастке помещают между промежуточным электродом 4 и нижним электродом 5 и закрепляют неподвижно. После этого устанавливают необходимое напряжение и включают подачу ворса. Время нанесения зависит от способа подачи ворса, его качества и нужной площади заполнения этим ворсом. Обычно время колеблется в пределах от 4 до 10 с.

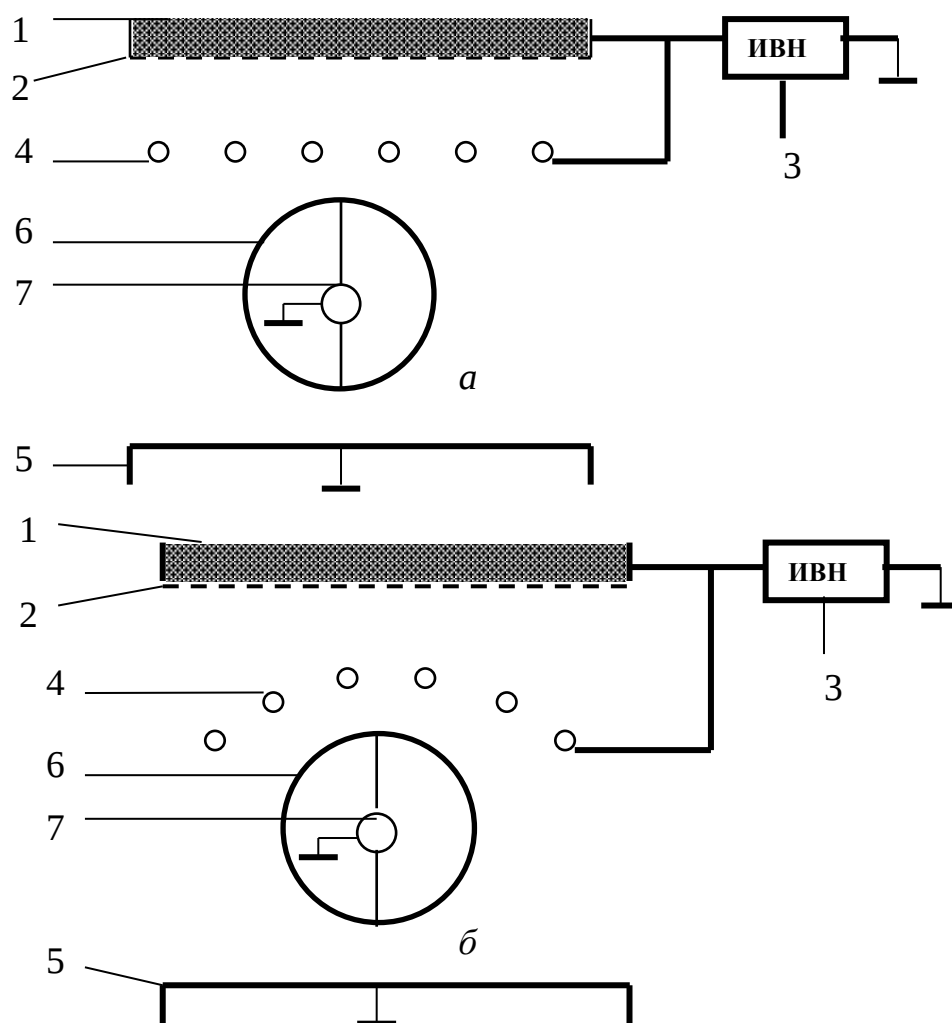


Рис. 12.8. Схема устройства для нанесения ворсового узора на объемное изделие

После остановки процесса нанесения ворса изделие поворачивают или перемещают и повторяют нанесение, создавая, таким образом, узор на поверхности. На следующем флокаторе с ворсом другого цвета и промежуточным электродом иной формы процесс нанесения повторяют. Т. е. на поверхность изделия, не закрывая ранее нанесенный ворс, наносят новый узор ворсом другого цвета. На последнем этапе осуществляют нанесение ворса на клеевую поверхность, ранее не заполненную ворсом, без промежуточного электрода. Обычно это фоновый цвет узора.

В данной технологии количество цветов можно варьировать, но создавать узор более чем из 4–5 цветов не технологично.

4. Сушка. Способ и режимы сушки зависят в основном от материала изделия и вида клея.

5. На последней стадии проводят чистку изделия от незакрепившегося ворса.

Промежуточный электрод может быть не только плоским, как на *рис. 12.8, а*, но и отчасти соответствовать форме изделия, как это показано на *рис. 12.8, б*. Второй вариант удобнее тем, что позволяет за одно нанесение покрыть ворсом большую площадь поверхности.

Таким образом, важной особенностью этого способа является периодичность нанесения: нанесение, поворот и/или смещение, нанесение и т. д.

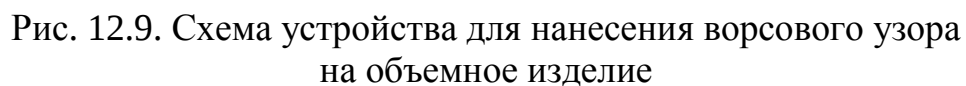
Способ непрерывного нанесения ворсового узора на объемное изделие

Важнейшее условие получения ворсового узора по этому способу – это неподвижность промежуточного электрода относительно поверхности, на которую наносят ворс. В случае объемного изделия это означает, что на оснастке должно быть закреплено не только изделие, но и промежуточный электрод, причем таким образом, чтобы в процессе поворота или перемещения изделия при нанесении ворса конфигурация силовых линий не изменялась. Это позволяет сохранять структуру ворсового рисунка, несмотря на движение изделия. Схематически такой вариант представлен на *рис. 12.9*. При этом важно обеспечить необходимую разность потенциалов между поверхностью изделия и промежуточным электродом.

Такой вариант позволяет наносить ворс каждого цвета за один прием без остановки подачи ворса. Однако необходимая оснастка для реализации этого варианта сложнее, чем в первом случае.

Преимущество этого способа не только в меньшем времени создания узора, но и в более высокой степени его воспроизводимости.

Технологическая схема получения многоцветных ворсовых узоров на объемном изделии в этом случае отличается от первого варианта тем, что после нанесения клея на оснастке закрепляют промежуточный электрод и подключают к нужному потенциалу. После этого изделие на оснастке помещают в зону флокирования и осуществляют полное нанесение узора первого цвета за один период.



230

13. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ВОРСА НА РАЗЛИЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Технология электрофлокирования отличается тем, что для ее реализации можно использовать очень широкий спектр оборудования: от компактных и дешевых ручных флокаторов до огромных линий в десятки метров длиной. Отличие оборудования обусловлено, в первую очередь, его назначением: нанесение ворса на рулонные материалы (ткани, пленка, бумага и т. п.) в виде сплошного покрытия или в виде рисунка, нанесение ворсового покрытия на штучные изделия в виде надписей, эмблем или рисунков, покрытие ворсом объемных изделий технического и декоративного назначения и т. д. Общим для любой области применения данной технологии является наличие источника высокого напряжения, высоковольтных кабелей, емкости для ворса и системы электродов. Источники высокого напряжения различного назначения и от разных производителей отличаются максимальным напряжением (как правило, от 50 до 100 кВ) и максимально возможной величиной тока (как правило, от 50 до 500 мкА). Вследствие этого их размеры и вес отличаются в десятки раз. Достаточно типичный вид источника высокого напряжения показан на *рис. 13.1*. Как правило, он имеет два индикатора (напряжения и тока) и возможность регулировки напряжения.



Рис. 13.1. Источник высокого напряжения

13.1. Ручные электрофлокаторы

Ручные флокаторы представляют собой самый простой и дешевый вариант оборудования для нанесения ворса, но имеют достаточно широкую область применения [10], [19]. Их, как правило, используют для отделки штучных изделий, как плоских, так и объемных. Существует очень большое количество различных модификаций ручных флокаторов, причем как у нас, так и за рубежом. На *рис. 13.2* показана немецкая модель флокатора (*Maag Flockmaschinen GmbH*). Представленная немецкая модель является классическим вариантом и включает источник высокого напряжения с индикаторами напряжения и тока, ручкой регулировки напряжения и индикаторными лампочками включения сети и высокого напряжения. К источнику посредством высоковольтного кабеля присоединена емкость для ворса с сетчатой съемной крышкой. Размеры емкости для ворса могут быть различными в зависимости от площади, на которую предполагается наносить ворс.

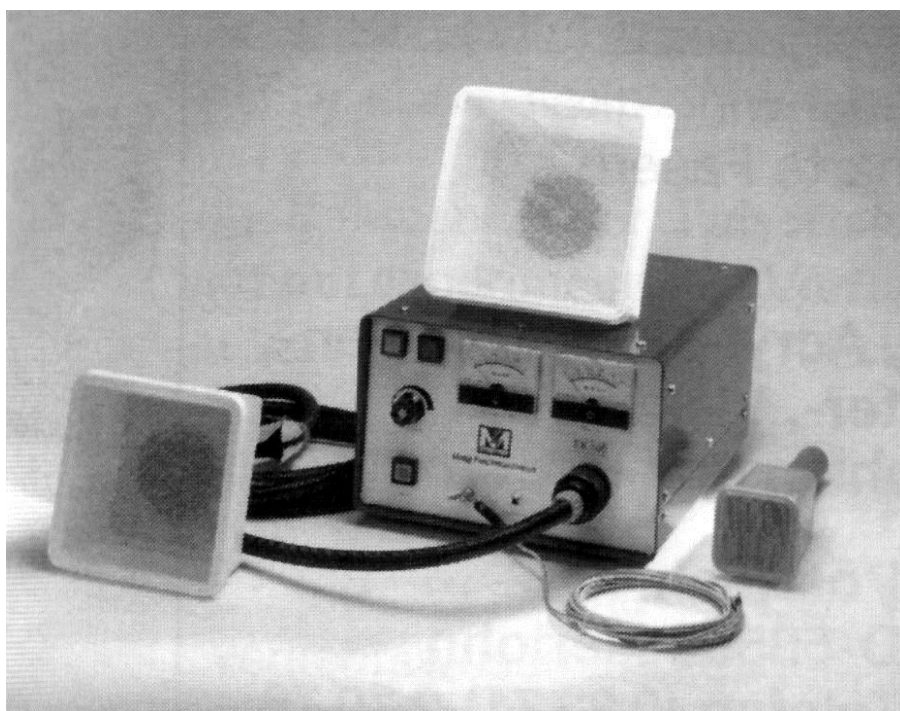


Рис. 13.2. Ручной электрофлокатор фирмы *Maag Flockmaschinen GmbH*

На *рис. 13.3* представлена отечественная модель флокатора, которая отличается тем, что имеет малогабаритный источник высокого напряжения, на котором отсутствуют приборы для измерения напряжения и тока.

Показанная разновидность ручного флокатора с миниатюрным источником высокого напряжения (*рис. 13.3*), частично расположенном в рукоятке (обычно это умножитель напряжения), исключает необходимость использования высоковольтного кабеля.

Существуют модели ручных флокаторов, которые рассчитаны на питание от обычных батареек. У таких моделей источник высокого напряжения размещен целиком в рукоятке флокатора вместе с батарейками. Такие мобильные

флокаторы (рис. 13.4) можно использовать для нанесения ворса в местах, где нет электрических розеток.

На рис. 13.4 представлены описанные выше модели флокаторов в разобранном виде. Слева модель на батарейках, справа модель с умножителем высокого напряжения, расположенном в рукоятке флокатора.



Рис. 13.3. Ручной электрофлокатор с малогабаритным источником питания

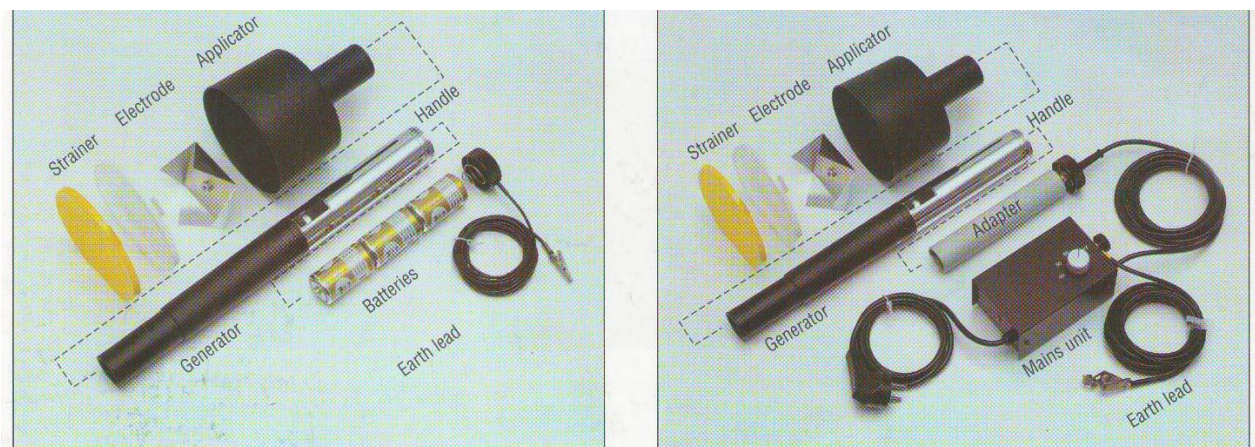


Рис. 13.4. Внутреннее устройство малогабаритных ручных флокаторов

Назначением ручных электрофлокаторов является формирование ворсового покрытия в основном на плоских или слабо рельефных поверхностях сравнительно небольшой площади (глубиной не более 5 мм при ширине более 10 мм). Обычно за один раз ворс наносят на площадь не более 5–10 дм². При нанесении ворса на площади большего размера возрастает продолжительность флокирования, требуется многократная перезагрузка ворса в бункер флокатора. При этом необходимо следить, чтобы не высыхал клеевой слой на поверхности изделия (открытое время для акриловых клеевых композиций обычно не превышает нескольких минут).

Процесс создания ворсового покрытия происходит следующим образом. Изделие или материал с нанесенным клеевым слоем кладут на заземленный электрод. Рекомендуемый объем ворса, засыпаемого в бункер флокатора, составляет от 1/3 до 1/2 его объема, но не более 2/3. Рабочая напряженность электрического поля в зоне флокирования должна составлять 4–5 кВ/см. Это означает, что, например, при расстоянии между сеткой флокатора и флокируемой поверхностью 10 см напряжение нужно устанавливать 40–50 кВ или при напряжении 60 кВ расстояние до поверхности должно быть в пределах от 12 до 15 см. Это относится к ворсу, удовлетворяющему по своим электрофизическим свойствам необходимым стандартам. При флокировании ручным аппаратом необходимо равномерно перемещать его над всей флокируемой поверхностью, постоянно встряхивая и выдерживая одинаковое расстояние до поверхности с клеевым слоем.

При флокировании не очень больших изделий рекомендуется в целях экономии ворса и для снижения запыленности ворсом рабочего помещения использовать специальные кабины или столы. Вариант такой кабины фирмы *Schenk GmbH Maschinenbau* показан на *рис. 13.5*.

Дно кабины сделано из достаточно крупной металлической сетки, которая заземлена и сквозь которую ворс, не внедрившийся в клеевой слой, просыпается в специальную емкость. Собранный ворс можно использовать многократно.



Рис. 13.5. Рабочее место для отделки различных изделий с применением ручного флокатора

13.2. Электропневмофлокаторы

Особым видом достаточно компактных устройств для нанесения ворса на различные изделия является электропневмофлокатор (*рис. 13.6*) [37]. Он отличается от ручных флокаторов рядом признаков. Ворс в зону нанесения подают в потоке воздуха. Зарядка ворса во многих моделях таких флокаторов осуществляется в поле коронного разряда. В состав такой модели флокатора входят: источник высокого напряжения, бункер для ворса достаточно большой емкости, компрессор для подачи воздуха, дозатор, обеспечивающий поступление ворса в поток воздуха с нужной скоростью, воздушный шланг и кабель высокого напряжения, наноситель с рукояткой и высоковольтным коронирующим электродом.

Особенности электропневмофлокатора определяются следствием его области применения. Он предназначен для нанесения ворсового покрытия на изделия не стандартных размеров, включая объемные изделия (манекены, двери, элементы мебели, детали салона автомобиля и т. п.), или нанесение ворса на внутреннюю поверхность крупных ложементов.

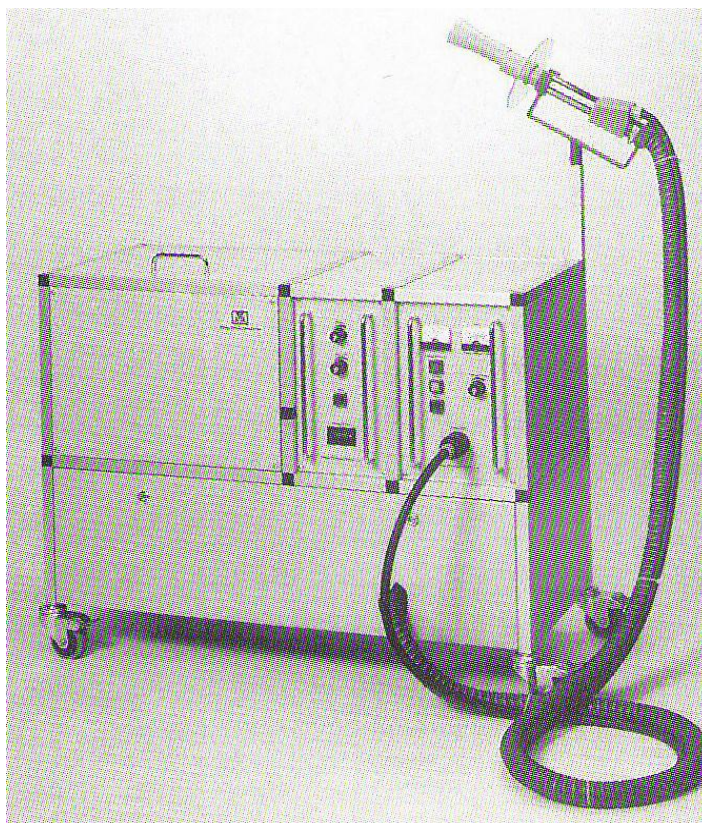


Рис. 13.6. Внешний вид электропневмофлокатора

При нанесении ворсового покрытия на внутреннюю поверхность крупных емкостей возникает проблема, связанная с тем, что напряженность электрического поля во внутренних углах емкости практически равна нулю. Это означает, что ворс, попавший туда, будет плохо ориентирован и не будет происходить перезарядка не закрепившегося ворса. Проще говоря, такие места засыпаются ворсом, который не внедряется в поверхность клеевого слоя и не закрепляется там. Решить эту проблему с помощью флокатора иного типа, например, ручного флокатора, можно лишь путем многократного нанесения ворса, что резко снижает производительность процесса.

В электропневмофлокаторе ворс поступает в зону нанесения с потоком воздуха. Это позволяет постоянно сдувать не закрепившийся ворс и наносить новый ворс. При этом надо отдавать себе отчет, что ориентация ворса на поверхности изделия будет существенно хуже, чем при использовании флокаторов других типов. Кроме того, напряжение, требуемое для работы электропневмофлокатора, значительно выше, чем для ручного флокатора. Это связано с тем, что расстояние до поверхности изделия должно быть больше, чем при работе с ручным флокатором, поскольку необходимо уменьшить влияние потока воздуха, ухудшающего ориентацию ворса. Если для работы с ручным флокатором обычно достаточно напряжения 60–70 кВ, то при использовании данного оборудования обычно требуется напряжение не менее 80 кВ.

Таким образом, флокаторы данного типа имеют ограниченную сферу применения, однако в этой области найти им замену достаточно трудно. Для нанесения ворса на большую площадь при ограниченном времени и больших габаритах изделия, например, поверхность манекена, найти замену такому устройству доста-

точно трудно. То же самое можно сказать, если речь идет о нанесении ворсового покрытия на внутреннюю поверхность ящика или подобного ему изделия.

13.3. Линии для нанесения ворса на рулонные материалы

Наиболее крупное и сложное оборудование в области технологии электрофлокирования используется при производстве рулонных флокированных материалов. К ним относятся, прежде всего, ткани. Это обивочные ткани для мебели, ткани для одежды и т. п. Такие ткани могут быть как со сплошным покрытием, так и с покрытием в виде узоров, как однотонными, так и с различной отделкой в виде многоцветных рисунков.

Но, кроме тканей, к рулонным материалам относится флокированная пленка, из которой изготавливают вкладыши с ворсовым покрытием для ювелирных и парфюмерных изделий, для столовых приборов и различных украшений. Кроме того, в качестве основы может быть использована бумага, на которую наносят ворс и получают флокированные обои.

Для производства рулонных флокированных материалов различного назначения используют технологические линии, включающие комплект различного оборудования. Схема такой линии представлена на *рис. 13.7*.

Материалы, выпускаемые на подобных линиях, могут быть различными: искусственный велюр или бархат, галантерейная замша или флокированная пленка, флокированная бумага или обои и многое др. Однако состав линии будет примерно одинаковым.

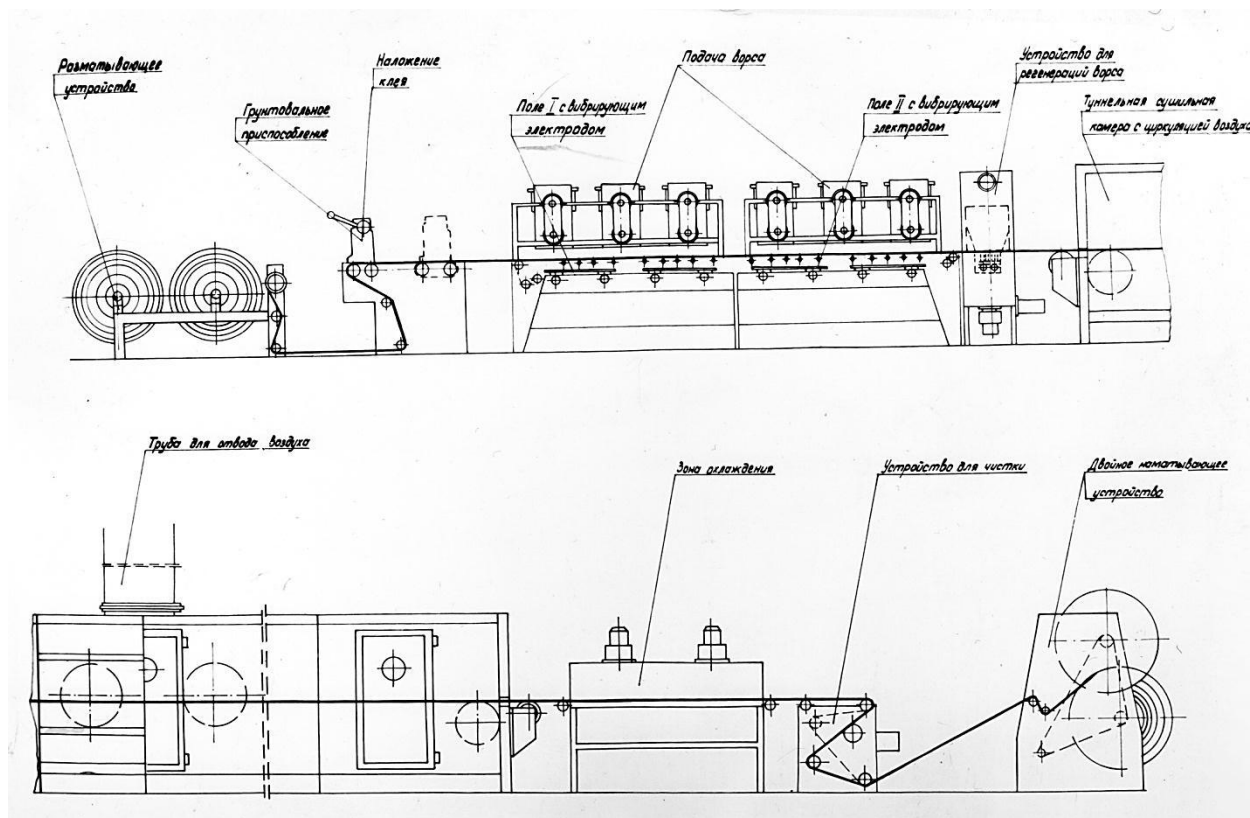


Рис. 13.7. Схема линии для нанесения ворсовых покрытий на рулонные материалы

Внешний вид флокатора для производства рулонных ворсовых материалов показан на *рис. 13.8*.



Рис. 13.8. Флокатор промышленной линии для нанесения флокированных покрытий на рулонные материалы

Линия флокирования рулонных материалов, как правило, включает:

- устройство для размотки, предусматривающее присоединение следующего рулона, когда заканчивается предыдущий;
- устройство для грунтовки материала (при необходимости);
- устройство для нанесения связующего;
- комплект флокаторов, каждый из которых может иметь один или несколько подающих бункеров (*рис. 13.8*);
- устройство для регенерации ворса (отсос не закрепившегося ворса для его последующего повторного использования);
- сушильная камера;
- охлаждающее устройство;
- устройство для очистки материала от не закрепившегося ворса;
- устройство для намотки готового материала.

Нанесение связующего может осуществляться различными способами. Применяют цилиндрические сетчатые ротационные шаблоны, в которых клей с помощью специального ножа продавливают сквозь сетку на поверхность материала. При этом клеевой слой можно наносить как в виде сплошного покрытия, так и в виде рисунка. Поверхность клеевого слоя при этом отличается высокой равномерностью.

Другой способ нанесения – распыление с помощью форсунок. При таком способе нанесения связующего две или более форсунок, распыляющих клеевой состав, движутся возвратно-поступательно поперек движения материала. Вяз-

кость клеевой композиции для этого способа существенно ниже, чем в первом варианте и, следовательно, он может применяться для материалов, не обладающих высокой впитывающей способностью.

Нанесение ворса при производстве рулонных материалов осуществляют, как правило, из бункера с сетчатым дном путем протирания ворса вращающимися щетками [9], [10], [19]. Скорость поступления ворса можно регулировать размером ячеек сетки и частотой вращения щетки. Важным моментом является необходимость обеспечения равномерной подачи по всей площади. Одним из недостатков этого способа является образование комков ворса, которые представляют собой отходы.

Другой вариант дозирования ворса – посредством вибрации бункера. При этом регулировка скорости подачи, помимо размера ячеек сетки, осуществляется изменением частоты вибрации. Следует обратить внимание, что вибрация бункера может быть горизонтальной, вертикальной, а также круговой или эллиптической. Данный способ реализуется преимущественно в лабораторных установках, поскольку оказывается затруднительно обеспечить одинаковую скорость подачи ворса по всей площади бункера при его значительных размерах.

Еще один способ подачи ворса – это пневмодозирование – ворс подают в потоке воздуха. Этим способ похож на описанную выше работу электропневмофлокатора. В настоящее время этот метод для рулонных материалов практически не применяется. Применение этот способ находит при нанесении ворса на штучные изделия в потоке. Речь может идти, например, о флокировании деталей отделки автомобиля.

Сушильная камера является одним из важнейших узлов линии флокирования. Она намного превосходит все остальное оборудование по энергопотреблению и, фактически, именно она определяет производительность всей линии. Это связано с тем, что акриловые клеевые композиции, применяемые для флокирования текстильных изделий, являются водными дисперсиями. Процесс сушки включает несколько этапов: нагрев клеевого слоя от комнатной температуры до температуры 90–95 °С и фиксация этой температуры в течение определенного времени (при этом происходит испарение воды, содержащейся в связующем), нагрев до температуры примерно 130–140 °С и поддержание ее для осуществления термофиксации (сшивка полимера, входящего в клеевую композицию). При этом нежелательно на первом этапе доводить температуру до температуры кипения, так как это может разрушить клеевую пленку и снизить стойкость ворсового покрова к истиранию. Второй этап необходим, так как в противном случае материал не будет обладать стойкостью к мокрому истиранию.

Все это ведет к тому, что время сушки оказывается весьма значительным (до 10 мин) и длина сушильной камеры должна достигать нескольких десятков метров.

Способы сушки могут применяться различные, но чаще всего это сушка горячим воздухом. Возможно применение для сушки инфракрасных излучателей. Это позволяет в 2–3 раза сократить время термофиксации связующего, но требует точного выбора мощности и длины волны излучателя, а также интервала времени сушки. При этом время сушки будет зависеть от природы и цвета

ворса. Возможна сушка микроволновым излучением, но при этом существенно возрастает стоимость оборудования, а технология применения этого способа для флокированных материалов недостаточно отработана.

На *рис. 13.9* показан результат использования такой линии для получения однотонных флокированных тканей и флокированных обоев.



Рис. 13.9. Флокированные обои

13.4. Оборудование для нанесения ворса на объемные изделия

Формирование ворсового покрова на поверхности объемных изделий, строго говоря, не относится к области текстильной промышленности. Однако возможности технологии столь широки, что позволяют создавать ворсовое покрытие на самых разнообразных объемных изделиях сложной формы. Сюда относится отделка различных изделий и деталей автомобиля (перчаточный ящик, уплотняющие профили, обшивка потолка салона, обивка сидений, обивка багажного отделения, обивка дверей и приборная панель, подголовники), элементы мебели (коробки для столовых приборов, металлические части мебели, пластиковая мебель и элементы мебели, вешалки), а также различные декоративные изделия и т. д.

Для нанесения покрытий на перечисленные изделия используют либо электропневмофлокаторы (для отделки крупногабаритных объектов, см. *рис. 13.6*), либо камеры флокирования. Пример подобной камеры представлен на *рис. 13.10*. Другой вариант камеры для флокирования объемных изделий, использующей электропневмофлокаторы, показан на *рис. 13.11*.



Рис. 13.10. Камера для нанесения ворса на объемные изделия



Рис. 13.11. Камера с использованием электропневмофлокатора для нанесения ворса на объемные изделия

13.5. Оборудование для нанесения связующего

Выбор оборудования для нанесения связующего зависит, в первую очередь, от вида материала основы и характеристики используемого клеевого состава. Для текстильных материалов, как правило, используют водные дисперсии полимеров. Как правило, это акриловые клеевые композиции. Их вязкость может отличаться в достаточно широких пределах. Для нанесения на рулонные текстильные материалы чаще всего используют ротационные сетчатые шаблоны. Шаблон представляет собой цилиндр из металлической сетки, и внутри такого шаблона расположен ракельный нож, который продавлиывает клеевой состав на поверхность материала. С помощью таких шаблонов можно наносить как сплошной клеевой слой, так и в виде узора или рисунка. Такой способ обеспечивает достаточно тонкую и ровную по толщине клеевую поверхность. Аналогичный способ используют для нанесения клеевого слоя в виде рисунка или надписи при отделке штучных изделий, но шаблоны используют плоские.

Другой способ нанесения, применяемый реже, – это распыление с помощью форсунокдвигающихся возвратно поступательно поперек движению материала. Обычно используются не менее двух форсунок,двигающихся в противофазе, и их скорости должны быть согласованы со скоростью движения материала для обеспечения ровного клеевого слоя.

При отделке не текстильных материалов и изделий часто приходится использовать связующие на основе органических растворителей типа эпоксидных или полиуретановых смол. Это вынужденная мера, поскольку адгезия акриловых клеевых композиций ко многим пластикам, стеклу и металлу недостаточна. В этом случае для нанесения на рулонные материалы используют способ распыления, а на объемные изделия можно использовать для нанесения кисти или способ «окунания».

Применение таких связующих, как было сказано, вынужденная мера, сопряженная с необходимостью фильтрацией воздуха вследствие опасности для персонала, серьезной пожарной опасностью и удалением вредных отходов.

Внешний вид оборудования здесь не приводится, поскольку оно, в зависимости от назначения и вида связующего, весьма разнообразно и не имеет прямого отношения к технологии флокирования.

13.6. Оборудование для термофиксации связующего

Сначала необходимо отметить, что процесс термофиксации в данной технологии является самым энергоемким и он, в значительной степени, определяет производительность технологического процесса.

Процесс термофиксации или сушки связующего зависит от многих факторов. Это технология производства (рулонные материалы или штучные изделия), вид применяемого связующего, материал основы и т. п.

Сушка рулонных текстильных материалов обычно осуществляется в туннельных камерах конвективным способом (горячим воздухом). Температуру в каждой секции устанавливают в зависимости от технических характеристик клеевого состава и стадии сушки (удаление влаги – 90–95 °С, обеспечение сшивки полимера – 120–140 °С). При этом обязательно должна быть обеспечена приточно-вытяжная вентиляция для удаления влажного воздуха. Использование связующего с органическими растворителями ведет к необходимости обеспечения пожарной безопасности и очистке воздуха, поступающего из сушильной камеры.

Возможно применение для термофиксации инфракрасных излучателей. Это позволяет ускорить процесс сушки, что немаловажно для увеличения производительности технологического процесса. Однако при этом возникает ряд сложностей: необходимо выбирать излучатели, имеющие спектр, хорошо поглощаемый клеем, но проходящим сквозь ворс и материал основы. Кроме того, необходимо учитывать цвет ворса – ворс темных цветов нагревается значительно сильнее, чем светлых.

Сушку штучных флокированных изделий можно осуществлять в стандартных термокамерах, обеспечивающих нужный диапазон температур и вместимость. Количество и емкость термокамер должны быть согласованы со временем, необходимым для качественной термофиксации клея, и объемом выпуска изделий.

Для сушки штучных изделий могут быть использованы инфракрасные излучатели, но со всеми оговорками, отмеченными выше.

Отдельно следует обратить внимание на сушку изделий с основой, имеющей низкую температуру плавления. В этом случае выбирают подходящий вид связующего и соответствующий режим сушки.

14. МЕТОДЫ ДЕКОРАТИВНОЙ ОТДЕЛКИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ В ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОФЛОКИРОВАНИЯ

В данном разделе будут кратко рассмотрены некоторые возможности технологии электрофлокирования для отделки материалов и изделий.

Одним из перспективных и весьма интересных направлений технологии электрофлокирования является создание способов получения многоцветных ворсовых рисунков. Задача получения одноцветных ворсовых рисунков была решена давно. Для этого вполне достаточно использовать сетчатые шаблоны для нанесения клеевого слоя в виде рисунка. Для нанесения клеевого рисунка при производстве рулонных материалов оказалось возможным использовать как плоские, так и цилиндрические шаблоны.

Для получения многоцветных рисунков в настоящее время используют преимущественно два принципиально отличающихся метода печати: краской и ворсом. Другие способы либо являются вариантами или комбинацией этих двух, либо по разным причинам не получили широкого распространения.

14.1. Отделка плоских материалов и изделий флокированными узорами

Производство многоцветных флокированных рисунков с помощью печати красками [9], [94], [95]

Эта технология принципиально не отличается от печати красками по ткани. Печать красками по ворсу предполагает, что клей наносят на всю поверхность материала, флокируют белым или иным светлым ворсом, затем материал высушивают и чистят. Далее осуществляют печать красками. Для этого с помощью сетчатых шаблонов наносят пасты на основе различных красителей и высушивают их.

По этой технологии в настоящее время выпускают практически все рулонные флокированные материалы с многоцветными рисунками. Это связано с её высокой производительностью.

Однако такая технология не лишена и весьма существенных недостатков. Для нанесения рисунка необходимо дополнительное дорогостоящее оборудование для печати (часто в несколько цветов), дополнительный расход сырья в виде красителей и энергии для сушки. Кроме того, использование красителей связано с очисткой сточных вод. Качество получаемого материала также имеет недостатки, поскольку при любых вариантах печати не удастся достичь полного окрашивания ворсинок, что снижает устойчивость окраски к различным воздействиям.

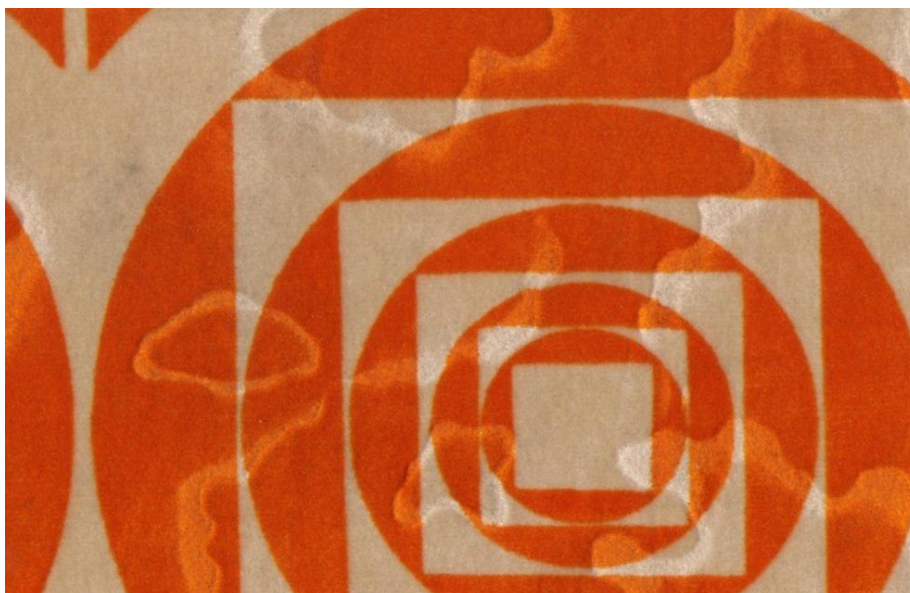


Рис. 14.1. Флокированные материалы с отделкой способом печати красками и тиснением

Тиснение по ворсовой поверхности

Вместо печати красками по ворсовой поверхности не редко для отделки материала используют тиснение. Такой способ позволяет создавать ткани с интересными эффектами. Принцип создания подобных узоров с использованием гравированных валов показан на *рис. 14.2.*

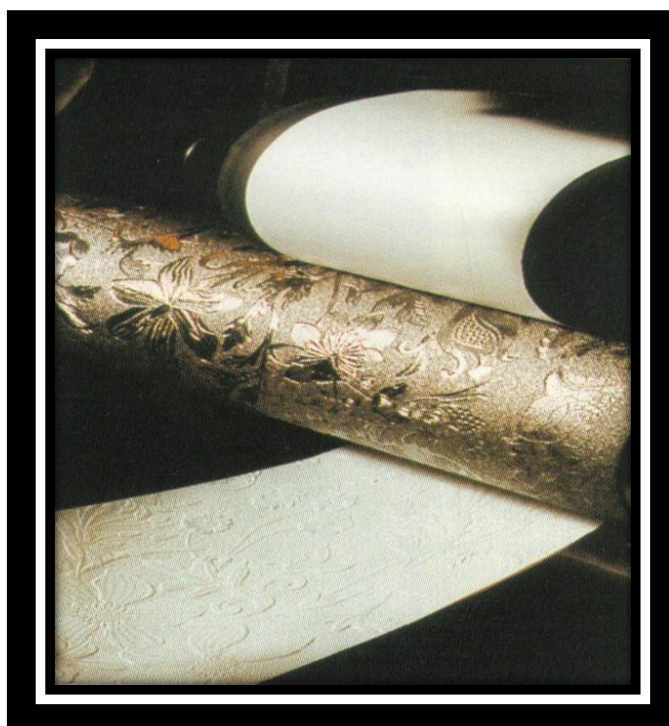


Рис. 14.2. Гравированные валы для тиснения

Процесс заключается в том, что после нанесения однотонного ворсового покрытия материал поступает к устройству, снабженному гравированным валом с рисунком, который и переносится на флокированную поверхность.

Образцы подобных материалов представлены на *рис. 14.3.*

Raphael



908 Claret

Medici



510 Walnut

Romana



403 Gold

Bellini



306 Conifer

Рис. 14.3. Рулонные флокированные материалы с тиснением по ворсу

Получение многоцветных флокированных рисунков посредством печати ворсом [19], [94], [95]

Идея, заложенная в технологию печати ворсом, проста и не очень оригинальна. При нанесении ворса оставлять открытыми только те места клеевого

рисунка, куда должен быть нанесен ворс данного цвета. Т. е. сначала покрывают клеем всю площадь будущего ворсового рисунка, а затем по очереди наносят ворс нужных цветов. Чтобы нанести ворс на нужные места, флокирование ведут через специальные ограничительные сетчатые шаблоны, последовательно заполняя площадь рисунка [19], [94]. Высота шаблона над поверхностью примерно 1 мм, а границы разных шаблонов при перемещении столика с материалом должны совпадать с точностью 0,1–0,2 мм. Для этого применяют сложное оборудование, выпускаемое в Германии. Существующие карусельные установки имеют диаметр от 3 до 5 м и требуют высочайшей точности изготовления.

Для одно- и многоцветной печати штучных изделий наиболее распространены ротационные установки карусельного типа со столиками, поочередно останавливающимися перед оператором [19], [94], [95]. Для ворса каждого цвета используется свой узел флокирования. Перед началом работы, кроме операций по регулировке клеенаносящего узла, загрузки бункеров ворсом и закрепления флокируемого материала, необходимо тщательно регулировать положение шаблонов для клея и ворса относительно друг друга. Эта операция проводится каждый раз при смене шаблонов.



Рис. 14.4. Установка для нанесения многоцветных ворсовых рисунков на текстильные изделия путем печати ворсом

В качестве примера на *рис. 14.4* показана автоматическая установка фирмы *MAAG FLOCKMASCHINEN GmbH* (Германия) диаметром 5 м. Она имеет шесть печатных столов, смонтированных на карусельной платформе. Каждый печатный стол юстируется отдельно фиксаторами дополнительно к центральному юстировочному устройству в подъемной стойке машины. Установка оборудована четырьмя флокаторами и четырьмя печатными узлами и дает возможность получать многоцветные флокированные рисунки и печатать комбинировано красками и ворсом. Пример такого рисунка представлен на *рис. 14.5*.



Рис. 14.5. Флокированное изделие, полученное путем печати ворсом разных цветов

Технология печати ворсом также имеет свои недостатки. Самый значительный из них – это очень высокие требования к точности изготовления установки, а следовательно, её высокая стоимость. С этим же связан и другой недостаток – высокая точность совмещения шаблонов требует сложной и достаточно длительной настройки при замене шаблонов как для ворса, так и для нанесения клея. Кроме того, производительность процесса ограничивается тем, что ворс наносят сквозь сетчатые шаблоны.

Получение ворсовых узоров на основе эффекта сепарации ворса

С точки зрения технологии электрофлокирования, этот способ представляется наиболее интересным, поскольку основан целиком на особенностях данной технологии. Эффект сепарации заключается в том, что неоднородное электрическое поле на волокна с разными зарядами оказывает различное воздействие, заставляя двигаться их по разным траекториям. Неоднородное электрическое поле во флокаторе создается введением дополнительного электрода (см. рис. 12.1), состоящего из отдельных проводников, который помещается непосредственно над флокируемой поверхностью [19], [91], [95], [112], [115].

Ворсинки, имеющие меньшее сопротивление, обладают большими зарядами и в неоднородном электрическом поле сильнее отклоняются и занимают место на основе с клеем между проводами промежуточного электрода. Волокна, имеющие большее сопротивление, отклоняются меньше и занимают место ближе к проекциям проводников электрода. Таким образом, происходит разделение (сепарация) при нанесении разноокрашенных волокон и образование

цветных рисунков на основе, вид которых определяется формой промежуточного электрода (рис. 14.6).

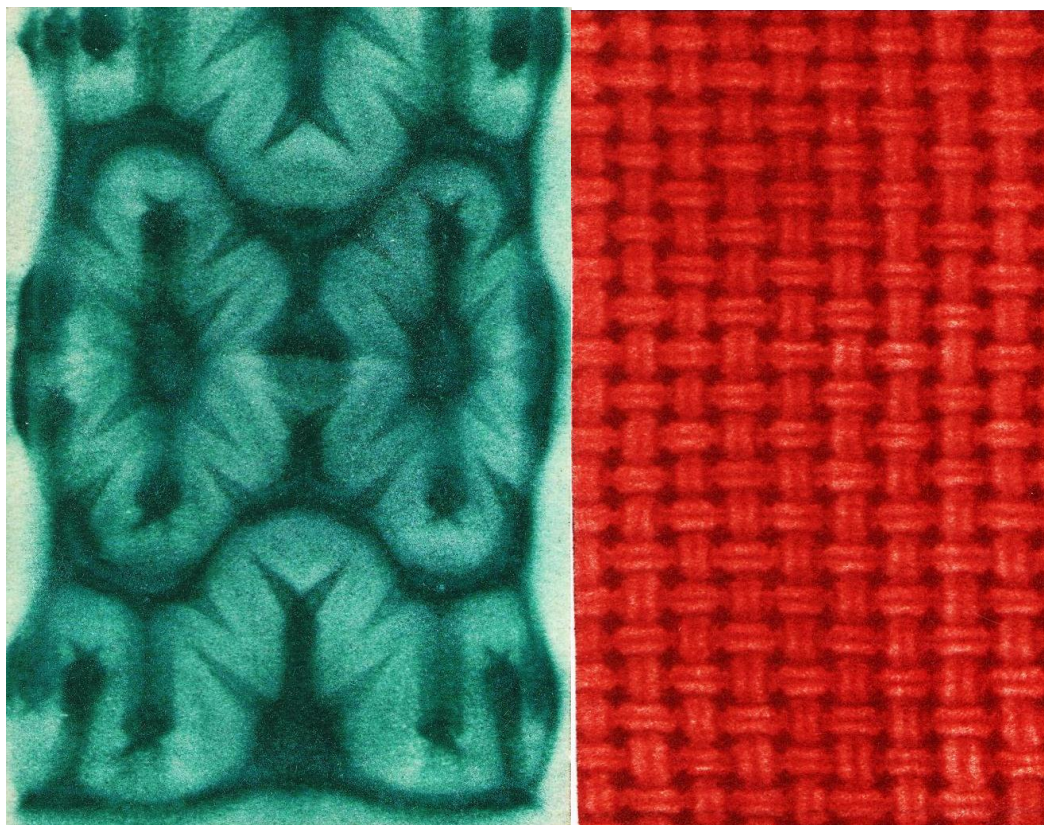


Рис. 14.6. Ворсовые узоры, полученные на основе эффекта сепарации ворса

Отличие от обычного процесса производства электрофлокированного материала состоит в том, что из бункера с сетчатым электродом наносится смесь волокон двух групп, имеющих разную окраску и разную электропроводность. Как было сказано ранее (разд. 12), для получения рисунков по этому способу необходимо, чтобы пара ворсов имела определенные электрофизические свойства. При этом для получения рисунка разность электрических сопротивлений должна быть не менее двух порядков, также желательно небольшое различие в длине волокон.

Получение ворсовых узоров на основе последовательного нанесения ворса в неоднородном поле

Эта технология похожа на предыдущий вариант, но отличается несколькими существенными моментами [102]–[104], [112], [115]. В этом случае ворс разных цветов наносят последовательно с использованием промежуточных электродов различной формы. Последнее нанесение осуществляют без промежуточного электрода в обычном режиме, заполняя площадь рисунка, не занятую ранее нанесенным ворсом. Такой подход открывает много новых возможностей для отделки текстильных изделий. Можно использовать до 4–5 ворсов разного цвета, цветовой узор можно легко изменять так же, как и цветное ре-

шение. Для реализации технологии можно использовать различные виды флокаторов. Образцы флокированных рисунков представлены на *рис. 14.7*.



Рис. 14.7. Ворсовые узоры, получаемые с применением неоднородного электрического поля

Технология получения термопереводных ворсовых рисунков

Еще одна возможность нанесения ворсовых рисунков на текстильные изделия – это термопереводные ворсовые рисунки [94]. Этот вариант технологии предназначен для применения, например, на небольших швейных предприятиях, не имеющих собственного оборудования для флокирования. Суть классического варианта технологии заключается в следующем. Дешевую основу, например, плотную бумагу покрывают «временным» клеем, в электрическом поле покрывают ворсом и проводят предварительную сушку. «Временный» клей позволяет закрепить ворсовый покров, но прочность закрепления незначительна. После этого на поверхность ворсового покрова наносят клеевой рисунок, узор или надпись, используя уже качественный клей с высокой адгезией к ворсу. Поверхность этого клеевого рисунка покрывают термопластичным связующим в виде мелкодисперсного порошка и высушивают. После этого полуфабрикат готов к применению. Чтобы его использовать, необходимо вырезать выбранный рисунок или надпись, наложить на него текстильное изделие, на которое предполагается его перенести и поместить на столик для термопереноса, установив необходимую температуру и время. Описанное устройство для переноса представлено на *рис. 14.8*.

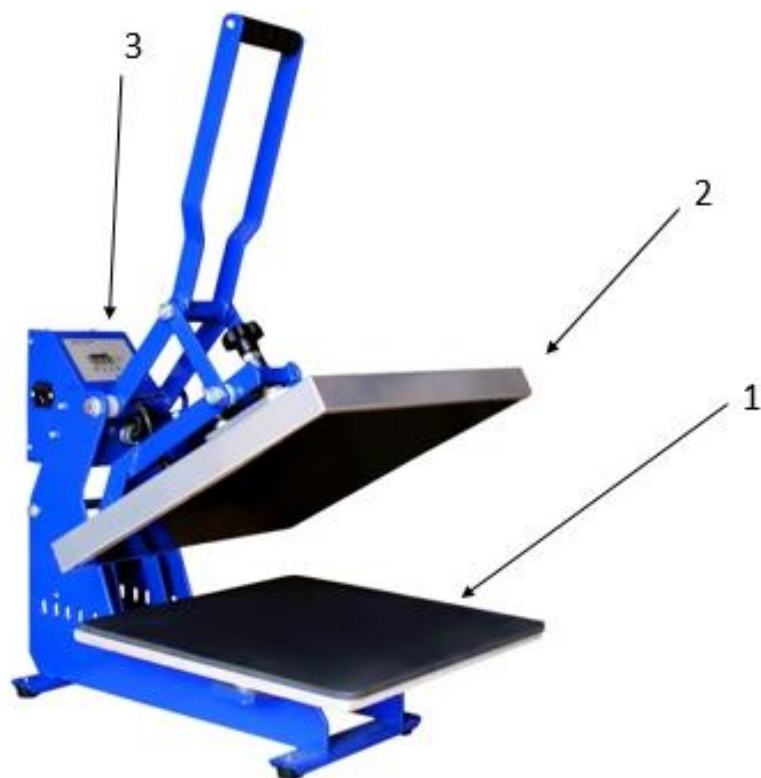


Рис. 14.8. Термопресс *PressTec PT3804B* 40 × 50 см:
1 – столик для образца; 2 – нагревательный элемент;
3 – установка температуры и времени прессования

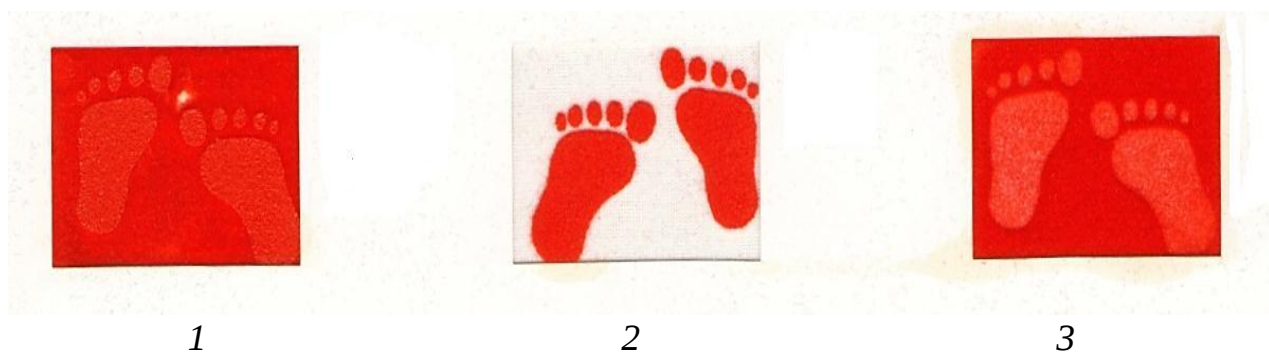


Рис. 14.9. Схема получения термопереводных рисунков:
1 – исходный полуфабрикат рисунка; 2 – ворсовый рисунок
перенесенный на ткань; 3 – полуфабрикат с вынутым ворсом

В настоящее время существуют и иные варианты подобной технологии. Так, например, используют термопластичную пленку с ворсовым покрытием (рис. 14.10).



Рис. 14.10. Пленка для термопереноса (термопластичная пленка)

Пленки для термопереноса (или термопленки) не похожи на обычные самоклеящиеся пленки для рекламы. Основное различие заключается в методе нанесения пленки на рабочую поверхность. Надежный способ удержания пленки на ткани – это сварка (не всякие клеи способны прочно удерживать изображение на текстильной поверхности), поэтому пленки для текстиля имеют особый термоактивируемый клеевой слой. При нагреве он плавится и прочно связывает плетеную структуру ткани или иного материала с пленкой.

Поскольку в холодном состоянии клей не активен и не мешает работе, он наносится на внешнюю, не защищенную подложкой сторону. Подложка, в свою очередь, несет не функцию защиты клея, как у обычных самоклеящихся пленок, а предназначена только для удобства раскроя на плоттере и скрепления готового изображения (одновременно она защищает внешнюю, рабочую сторону материала).

14.2. Технология нанесения ворса на объемные изделия

Получение одноцветного ворсового покрытия

Технология нанесения покрытия на изделия сложных форм включает следующие операции: нанесение связующего, нанесение ворса, сушка изделия и его очистка от не закрепившегося ворса. В разд. 13.4 показаны образцы камер для нанесения ворса на объемные изделия. На *рис. 14.11* и *14.12* показаны образцы изделий технического назначения, а на *рис. 14.13* – образцы декоративных изделий. Процесс формирования ворсового покрытия на объемном изделии предусматривает его вращение или повороты на определенный угол.



Рис. 14.11. Образцы технических объемных флокированных изделий



Рис. 14.12. Детали интерьера автомобиля

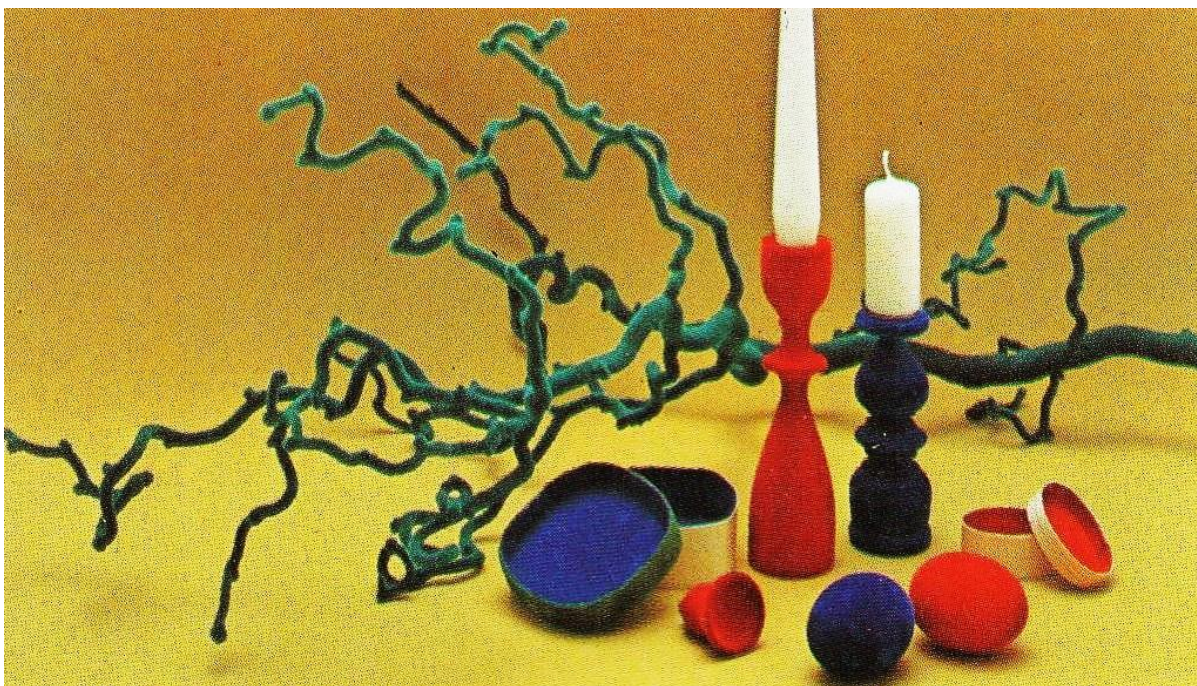


Рис. 14.13. Декоративные объемные флокированные изделия

Необходимо отметить, что простота технологии в данном случае только кажущаяся. Связующее должно иметь высокую адгезию к материалу изделия и ворсу, температура сушки клеевого состава должна быть ниже температуры размягчения материала (это, в первую очередь, важно для изделий из пластика). Вязкость клея должна соответствовать способу его нанесения: распыление, нанесение кистью или путем погружения. В процессе нанесения ворса изделие необходимо поворачивать в разных плоскостях, обращая особое внимание на труднодоступные для ворса места, которые требуют большего времени для формирования качественного покрытия. Сушка подобных изделий также имеет свои особенности. Особенно это относится к изделиям из пластика, имеющего низкую температуру деформации. Поскольку в данной технологии обычно приходится использовать связующее на основе органических растворителей, необходимо предусмотреть приточно-вытяжную вентиляцию с последующей очисткой воздуха.

Получение многоцветных ворсовых узоров на объемных изделиях

Для формирования многоцветного ворсового покрытия на объемном изделии можно использовать технологию, предполагающую использование неоднородного электрического поля при поочередном нанесении ворса разного цвета. Схематическое изображение вариантов подобных установок представлено на *рис. 12.6*. Технология предусматривает операции от выбора вида клея и способа его нанесения до сушки и очистки изделия от не закрепившегося ворса. Нанесение ворса разного цвета осуществляют последовательно в разных камерах и с промежуточными электродами разных конфигураций. Последнее нанесение ворса (формирование фона) проводят в камере флокирования типа представленных на *рис. 13.10* или *13.11*.

Примеры объемных изделий с многоцветным ворсовым узором показаны на *рис. 14.14*.



Рис. 14.14. Объемные изделия с многоцветным ворсовым покрытием

14.3. Флокированные нити и их применение

Флокированные нити используют для производства высококачественных обивочных материалов для автомобилей, морских лайнеров, мебели и т. п. Обычные флокированные ткани имеют клеевой слой на всей поверхности (при сплошном флокировании) или на большей части поверхности (при нанесении клея в виде рисунка). Это существенно снижает воздухопроницаемость ткани, которая важна для обивочных тканей.

В то же время флокированная нить в своем объеме содержит до 80 % воздуха. Как следствие этого, ткань, полученная с применением в качестве утка флокированных нитей, будет обладать низкой теплопроводностью и высокой воздухопроницаемостью.

Получаемые ткани, благодаря структуре флокированных нитей и различным переплетениям, обеспечивают широкие возможности в дизайне тканей, которые обеспечиваются за счет использования флокированных нитей разного цвета и линейной плотности, а также различных переплетений. Все это, в сочетании с высокой износостойкостью, делает их незаменимыми там, где необходимо сочетать высокую долговечность при интенсивной эксплуатации с привлекательным внешним видом. На *рис. 14.15* показаны флокированные нити разного цвета и ткань, полученная из них.



Рис. 14.15. Флокированные нити и изделия из них

На *рис 14.16* представлена одна из областей применения ворсовых нитей – это автомобильная промышленность. Такие нити, например, использовали для обивки сидений автомобиля. Как уже было сказано, такие ткани, при эффектном внешнем виде, обладают высокой воздухопроницаемостью и стойкостью к истиранию.



Рис. 14.16. Отделка автомобиля тканью с флокированными нитями в качестве утка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В основе данной монографии лежат работы, изданные ранее по данной тематике, а также научные статьи и доклады на конференциях.

Нельзя не отметить значительный вклад в разработку теории и технологии электрофлокирования, который внесли как зарубежные, так и наши ученые. Среди отечественных ученых можно выделить работы академика В. И. Попкова, А. Т. Наги-Заде, М. И. Глазова и других из Московского энергетического института имени Г. М. Кржижановского, Е. Н. Бершева, П. Г. Шляхтенко, В. А. Семёнова и многих других, работавших в Ленинградском институте текстильной и легкой промышленности им. С. М. Кирова.

В данной монографии, преимущественно, изложены представления автора по теоретическим вопросам технологии электрофлокирования, основанные на анализе процессов и экспериментальных исследованиях. В работе предложены новые подходы к ряду существенных моментов, имеющих большое значение для понимания процессов, протекающих при формировании ворсового покрытия в электрическом поле. Сюда можно отнести следующие предлагаемые подходы к описанию процесса электрофлокирования:

- теоретическое и экспериментальное обоснование существенного влияния объемного заряда ворса на процесс его осаждения в электрическом поле и динамику роста плотности ворсового покрытия при электрофлокировании;
- предложен новый подход к оценке максимального заряда ворса в зависимости от геометрических характеристик ворса и условий его нанесения;
- разработана обобщенная модель процесса электрофлокирования, позволяющая связать характеристики ворса и условия его нанесения с технологическими характеристиками процесса: плотностью тока, создаваемого потоком заряженного ворса и скоростью его поступления к поверхности материала;
- проведен анализ ориентации ворса на поверхности флокированного материала и на основе этого разработана новая модель формирования ворсового покрытия. Показана взаимосвязь начальной и конечной ориентации ворса на поверхности материала;
- проанализирована структура электрического поля между электродами флокатора и с учетом объемного заряда ворса – распределение напряженности, потенциала и скорости ворса в процессе движения;
- рассчитана структура неоднородного поля, используемого при получении флокированных нитей и создании многоцветных ворсовых узоров;
- предложены подходы к оптимизации технологического процесса флокирования с использованием различных критериев;
- изложены основные принципы технологического процесса производства флокированных нитей;
- показана возможность формирования многоцветных ворсовых узоров в неоднородном электрическом поле на плоских и объемных изделиях.

Материалы, представленные в монографии, конечно, не могут охватить всех значимых процессов получения ворсовых материалов и изделий с использованием технологии электрофлокирования. За рамками монографии остались

такие важные моменты, как процесс нанесения клеевого состава на поверхность материала или изделия, процесс термофиксации после нанесения ворса. Эти и ряд других вопросов требуют отдельного подробного рассмотрения. Здесь необходимо отметить, что и в рамках непосредственно процесса нанесения заряженного ворса остаются вопросы, требующие дальнейшей проработки. Сюда, например, можно отнести:

- построение физической модели движения потока заряженного ворса с учетом изменяющегося встречного потока ворса с зарядом противоположного знака;

- создание модели процесса зарядки ворса, учитывающей его электропроводность;

Эти и другие вопросы требуют серьезной проработки, и в дальнейшем это позволит более точно рассчитывать параметры технологического процесса и осуществлять его оптимизацию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сильные электрические поля в технологических процессах (Электронно-ионная технология) / под ред. акад. В. И. Попкова. – Москва: Энергия, 1969. – 240 с.
2. Наги-Заде, А. Т. Зарядка частиц удлиненной формы на плоском электроде / А. Т. Наги-Заде // Изв. АН СССР. Серия: Энергетика и транспорт. – 1966. – № 1. – С. 156–160.
3. Наги-Заде, А. Т. Зарядка волокон на плоских электродах / А. Т. Наги-Заде // Изв. АН СССР. Серия: Энергетика и транспорт. – 1966. – № 4. – С. 81–89.
4. Попков, В. И. Биполярное заряджение волокон на электродах, способ обнаружения и предельная величина заряда / В. И. Попков, А. Т. Наги-Заде // Изв. АН СССР. Серия: Энергетика и транспорт. – 1968. – № 1. – С. 43–48.
5. Наги-Заде, А. Т. Силовое воздействие однородного электрического поля на одиночное волокно / А. Т. Наги-Заде // Известия вузов. Серия: Электромеханика. – 1967. – № 1. – С. 21–28.
6. Ориентация волокон в электростатическом поле / М. И. Глазов [и др.] // Изв. АН СССР. Серия: Энергетика и транспорт. – 1969. – № 6. – С. 80–86.
7. Попков, В. И. Кинетика зарядки и динамика волокон в электрическом поле / В. И. Попков, М. И. Глазов. – Москва: Наука, 1976. – 123 с.
8. Бершев, Е. Н. Исследование перемещения волокон в однородном электростатическом поле с учетом аэродинамического сопротивления / Е. Н. Бершев, Г. П. Шаглин // Электронная обработка материалов. – 1976. – № 5. – С. 46–50.
9. Бершев, Е. Н. Электрофлокирование (нанесение ворса в электрических полях) / Е. Н. Бершев. – Москва: Легкая индустрия, 1977. – 232 с.
10. Бершев, Е. Н. Физические основы технологии электрофлокирования / Е. Н. Бершев. – Ленинград: Изд-во ЛГУ, 1984. – 232 с.
11. Иванов, О. М. Технология отделки материалов методом электрофлокирования: учебное пособие / О. М. Иванов, Н. А. Бабина. – Санкт-Петербург: ФГБОУВО «СПбГУПТД», 2016. – 88 с.
12. Berschev, E. N. Elektrostatisches Beflocken / E. N. Berschev, U. Lieb-scher. – Leipzig, VEB Fachbuchverlag, 1983. – 328 s.
13. Leman, O. Was bei der Drucksiebherstellung für der Flockdruck zu beachtenist / O. Leman // Handbuch 5 Internationales Flockseminar, München. – 1978.
14. Дмитриев, В. В. Химическая подготовка ворса в электрофлокировании / В. В. Дмитриев. – Ленинград: Изд-во ЛГУ, 1986. – 216 с.
15. Бершев, Е. Н. Способы оценки электрофизических свойств ворса для электрофлокирования / Е. Н. Бершев, О. М. Иванов, Г. П. Шаглин // Электронная обработка материалов. – 1989. – № 6.
16. Мюллер, И. Флок – технология с тысячами применений / И. Мюллер // II Международная Флок-конференция: Флок-96. – Санкт-Петербург: СПГУТД. – 1996, 6–7 мая.
17. Семенов, В. А. Теория и практика электрофлокирования / В. А. Семенов. – Москва: Изд-во ВЗПИ, 1992. – 174 с.

18. Fred Luderer. Sicherheitstechnische Anforderungen an elektrostatische Beflockungssysteme – Flock 87, 1997.
19. Иванов, О. М. Теоретические аспекты технологии электрофлокирования: монография / О. М. Иванов. – Санкт-Петербург: СПбГУТД, 2004. – 165 с.
20. Bershev, E. N. Bestimmung der maximalen Dichte des Faserflors bei elektrostatischer Beflockung / E. N. Bershev, V. A. Semenov // Technische Textilien. – 1979. – № 2. – S. 110–112.
21. Семенов, В. А. Максимальная плотность ворсового покрова, достигаемая методом электрофлокирования / В. А. Семенов // Текстильная промышленность. – 1981. – № 12. – С. 39–40.
22. Семенов, В. А. Динамика образования плотности ворсового покрова при электрофлокировании / В. А. Семенов // Электронная обработка материалов. – 1983. – № 5. – С. 69–72.
23. Semenov, V. A. Maximum Fiber Packing Density in Electrostatic Flocking / V. A. Semenov, S. P. Hersh, B. S. Gupta // Textile Research Journal. – 1981. – № 11.
24. Бершев, Е. Н. Сравнение эффективности нанесения ворса на текстильный материал при электрофлокировании различными способами / Е. Н. Бершев, О. М. Иванов, И. О. Редькин // Известия вузов. Серия: Технология текстильной промышленности. – 1987. – № 4. – С. 35–38.
25. Иванов, О. М. Определение технологических характеристик процесса флокирования на основе анализа динамики изменения плотности ворсового покрова от времени / О. М. Иванов, С. Ю. Иванова // Известия вузов. Серия: Технология легкой промышленности. – 2009. – № 4. – Т. 6. – С. 30–33.
26. Иванов, О. М. Модель процесса формирования ворсового покрова в технологии флокирования с учетом изменения скорости подачи ворса / О. М. Иванов, Е. С. Павлова, С. Ю. Иванова // Известия вузов. Серия: Технология легкой промышленности. – 2010. – № 1. – Т. 10. – С. 66–70.
27. Иванов, О. М. Процесс формирования ворсового покрова в технологии электрофлокирования / О. М. Иванов, Н. А. Бабина, С. Ю. Иванова // Известия вузов. Серия: Технология легкой промышленности. – 2014. – № 2. – С. 64–67.
28. Иванов, О. М. Анализ процесса электрофлокирования с использованием новых технологических параметров / О. М. Иванов, В. В. Безносова // Известия вузов. Серия: Технология легкой промышленности. – 2015. – № 3. – С. 66–69.
29. Иванов, О. М. Оценка технологических параметров процесса электрофлокирования на основе измерения электропроводности ворса / О. М. Иванов, В. В. Безносова, Т. А. Анисимова // Известия вузов. Серия: Технология легкой промышленности. – 2016. – № 3. – С. 48–51.
30. Иванов, О. М. Сравнение процесса формирования ворсового покрытия при разных способах флокирования / О. М. Иванов, А. А. Мороков, И. А. Касир // Известия вузов. Серия: Технология легкой промышленности. – 2020. – № 2. – С. 69–73.
31. К вопросу о перезарядке волокон при электростатическом нанесении ворса / Е. Н. Бершев [и др.] // Известия вузов. Серия: Технология текстильной промышленности. – 1971. – № 2. – С. 25–29.

32. Никифорова, Н. В. Измерение заряда волокон при электрофлокировании / Н. В. Никифорова, Е. Н. Бершев // Электронная обработка материалов. – 1975. – № 2. – С. 69–73.
33. Шляхтенко, П. Г. Контактная зарядка ворса на электродах флокатора / П. Г. Шляхтенко // Известия вузов. Серия: Технология текстильной промышленности. – 1987. – № 1. – С. 42–47.
34. Шляхтенко, П. Г. Исследование поведения синтетического ворса при контактной зарядке его на плоском электроде электрофлокатора / П. Г. Шляхтенко // Известия вузов. Серия: Технология текстильной промышленности. – 1978. – № 5. – С. 27–31.
35. Bershev, E. N. Untersuchung der Umladungskinetik und der Flockverankerung bei der elektrostatischen Beflockung / E. N. Bershev, P. G. Schljachtenko // Flock. – 1979. – № 14. – S. 27–31.
36. Schljachtenko, P. G. Zur Verteilung der Ladungen auf Kurzen Fasern bei der elektrostatischen Beflockung / P. G. Schljachtenko, E. N. Bershev // Flock. – 1981. – S. 7–12.
37. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика: учебное пособие: в 10 т. Т. 8. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 4-е изд., стереот. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 656 с.
38. Иванов, О. М. Расчет заряда ворса в технологии электрофлокирования при нелинейном распределении плотности заряда / О. М. Иванов, Н. А. Бабина, В. В. Безносова // Известия вузов. Серия: Технология легкой промышленности. – 2013. – № 3. – С. 8–12.
39. Иванов, О. М. Анализ процесса зарядки ворса в технологии электрофлокирования / О. М. Иванов, Н. А. Бабина // Известия вузов. Серия: Технология легкой промышленности. – 2013. – № 2. – С. 32–36.
40. Иванов, О. М. Оценка максимального заряда ворса в технологии электрофлокирования / О. М. Иванов, С. Ю. Иванова // Известия вузов. Серия: Технология текстильной промышленности. – 2015. – № 2(356). – С. 11–13.
41. Тамм, И. Е. Основы теории электричества / И. Е. Тамм. – Москва: Наука, 1966. – 624 с.
42. Иванов, О. М. Определение предельных характеристик процесса флокирования / О. М. Иванов, Е. Н. Бершев // Электронная обработка материалов. – 1988. – № 4. – С. 34–37.
43. Иванов, О. М. Модель поведения потока волокон в электростатическом поле при производстве флокированного материала / О. М. Иванов // ВЕСТНИК Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. – 2007. – № 13. – С. 30–35.
44. Иванов, О. М. Модель процесса осаждения заряженного ворса в технологии электрофлокирования / О. М. Иванов // Известия вузов. Серия: Технология текстильной промышленности. – 2010. – № 1 (322). – С. 77–80.
45. Теоретический анализ влияния заряда ворса в технологии электрофлокирования / О. М. Иванов, Т. А. Анисимова, В. В. Безносова, И. А. Кассир // Химические волокна. – 2020. – № 2. – С. 16–20.
46. Бершев, Е. Н. Ориентация удлиненных частиц в однородном электрическом поле / Е. Н. Бершев, В. А. Семенов // Электричество. – 1978. – № 4. – С. 20–24.

47. Бершев, Е. Н. Модель заполнения поверхности ориентированными волокнами при электрофлокировании / Е. Н. Бершев, П. М. Панкратов // Известия вузов. Серия: Технология текстильной промышленности. – 1983. – № 4. – С. 44–48.
48. Иванов, О. М. Влияние ориентации ворса на динамику роста поверхностной плотности ворсового покрова в технологии электрофлокирования / О. М. Иванов, Н. А. Бабина // Известия вузов. Серия: Технология легкой промышленности. – 2014. – № 2. – С. 77–80.
49. 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.
50. Иванов, О. М. Влияние ориентации ворса на формирование ворсового покрова флокированного материала / О. М. Иванов, Т. А. Анисимова, С. Ю. Иванова // Известия вузов. Серия: Технология легкой промышленности. – 2020. – № 1. – С. 68–73.
51. Иванов, О. М. Теоретический анализ формирования ворсового покрова в технологии электрофлокирования на основе модели ориентации ворса / О. М. Иванов, Т. А. Анисимова // Известия вузов. Серия: Технология текстильной промышленности. – 2021. – № 2 (392). – С. 46–50.
52. Бершев, Е. Н. Статистическое рассмотрение ориентации удлиненных частиц в электростатическом поле / Е. Н. Бершев, В. В. Кириллов // Журнал технической физики. – 1973. – № 4. – Т. XIII.
53. Иванов, О. М. Ориентация ворса при движении между электродами в процессе электрофлокирования / О. М. Иванов, В. В. Безносова // Известия вузов. Серия: Технология легкой промышленности. – 2013. – № 4. – С. 19–22.
54. Иванов, О. М. Структура электрического поля и объемного заряда ворса при его осаждении на поверхность основы / О. М. Иванов // ВЕСТНИК Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. – 2009. – № 2(17). – С. 65–70.
55. Иванов, О. М. Изменение структуры электрического поля и объемного заряда ворса с ростом поверхностной плотности ворсового покрова / О. М. Иванов, Е. С. Павлова, Л. В. Кочетова // Известия вузов. Серия: Технология легкой промышленности. – 2011. – № 3. – С. 25–29.
56. Шляхтенко, П. Г. О движении заряженных волокон в неоднородном электрическом поле / П. Г. Шляхтенко, Е. Н. Бершев, Е. И. Фирсов // Электронная обработка материалов. – 1984. – № 6. – С. 54–55.
57. Шляхтенко, П. Г. Движение коротких заряженных волокон в неоднородном электрическом поле / П. Г. Шляхтенко, В. Е. Щадилов, Л. А. Буркова // Электронная обработка материалов. – 1988. – № 5.
58. Шляхтенко, П. Г. Движение заряженных волокон в неоднородном электрическом поле / П. Г. Шляхтенко, О. И. Мещерякова // Электричество. – 1991. – № 2. – С. 54–58.
59. Никульча, И. П. Расчет и исследование поля коронного разряда для системы электродов ряд проводов между плоскостями / И. П. Никульча, В. И. Доровских // Электронная обработка материалов. – 1980. – № 2. – С. 47–50.

60. Влияние коронного разряда на выбор оптимальных параметров технологического процесса флокирования нитей / О. М. Иванов, Е. Н. Бершев, Н. Ф. Перепечко, Г. П. Шаглин // Электронная обработка материалов. – 1988. – № 5. – С. 48–50.

61. Иванов, О. М. Анализ влияния технологических параметров процесса флокирования на его производительность / О. М. Иванов, Е. С. Павлова // Известия вузов. Серия: Технология текстильной промышленности. – 2010. – № 7. – С. 41–45.

62. Иванов, О. М. Оптимизация технологического процесса электрофлокирования / О. М. Иванов, Е. С. Павлова, С. Ю. Иванова // Известия вузов. Серия: Технология легкой промышленности. – 2011. – № 3. – С. 35–42.

63. 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. – 2017. – № 3. – С. 133–137.

64. Иванов, О. М. Выбор схемы подключения электродов и режимов нанесения ворса в технологии флокирования нитей / О. М. Иванов // Международная научно-техническая конференция «Современные технологии и оборудование текстильной промышленности», 27–28.11.2007. – Москва: МГТУ им. А. Н. Косыгина.

65. А. с. № 1240461 СССР, МКИ В 05 В 5/00, D 04 Н 11/00. Способ получения электрофлокированного объемного изделия: заявл. 04.01.1985: опубл. 03.07.1986 / О. М. Иванов, С. В. Пендюрина и др. (СССР). – Бюл. № 24.

66. Цумштайн, А. Теоретическое рассмотрение флокированной пряжи (Швейцария) / А. Цумштайн // Флок. – 1980. – № 17.

67. А с. № 1416198 СССР. МКИ В 05 В 5/02. Устройство для электростатического нанесения ворса на нити: опубл. 15.08.1988 / О. М. Иванов, Г. П. Шаглин, Е. Н. Бершев. – Бюл. № 30.

68. А. с. № 1612411 СССР. МКИ В 05 В 5/08. Устройство для электростатического нанесения ворса на нити: заявл. 10.10.1988: опубл. 08.08.1990 / О. М. Иванов, Г. П. Шаглин, Е. Н. Бершев. – Бюл. № 29.

69. Патент № 242680 Австралия, МКИ D 01 b. Способ и устройство для нанесения ворса на нитеобразный материал: заявл. 21.01.1960: опубл. 16.01.1963 / Линнеборн В. (Германия).

70. Патент № 291907 Австралия, МКИ G 06 с 11/00. Способ электростатического флокирования нитей: заявл. 11.09.1968: опубл. 10.08.1971 / Линнеборн В. (Германия).

71. Патент № 1635235 ФРГ, МКИ В 05 в 5/00, В 44 с 1/08. Устройство для электростатического нанесения ворса на нить и нитеподобные материалы: заявл. 13.04.1976: опубл. 04.07.1977.

72. Патент № 2839941 ФРГ, МКИ D 02 g 3/40, В 05 b 5/08. Устройство для флокирования пряжи в электростатическом поле: заявл. 14.09.1978: опубл. 27.03.1980.

73. Патент № 2726163 ФРГ, МКИ В 05 в 5/08. Устройство для электростатического осаждения флока на нитеподобные материалы: заявл. 10.06.1977: опубл. 15.12.1977.

74. Патент № 3423462 ФРГ, МКИ В 05 D 1/14, В 05 D 5/00. Способ флокирования в электростатическом поле нитей или пряжи и устройство для его осуществления: заявл. 26.06.1984: опубл. 02.01.1986 / Goerens R. L., Uniroyal Englebert Textilcord S. A. (ФРГ).

75. Патент № 3438616 ФРГ, МКИ В 05 D 1/14, В 05 C 19/00. Способ изготовления ворсовых нитей и устройство для его осуществления: заявл. 20.10.1984: опубл. 24.04.1986 / Goerens R. L., Uniroyal Englebert Textilcord S. A. (ФРГ).

76. Иванов, О. М. Измерение поверхностной плотности ворса флокированной пряжи фотоэлектрическим методом / О. М. Иванов, С. Ю. Иванова, Е. Н. Бершев // Известия вузов. Серия: Технология текстильной промышленности. – 1999. – № 4 – С. 13–16.

77. Wagner, K. T-Shirts automatisch beflocken / K. Wagner // Melliand Textilberichte. – 1980. – № 7. – Bd 61.

78. Berthold, Hanneken. Quantitative Bestimmung der Flockauflage (Flockdichte) / Hanneken Berthold // Flock 88. – 1997.

79. Шляхтенко, П. Г. Способ определения плотности покрытия ворсовых материалов / П. Г. Шляхтенко, С. Ю. Иванова, Б. Н. Антонов // Текстильная промышленность. – 1986. – № 12. – С. 49–50.

80. Иванова, С. Ю. Оптический способ измерения поверхностной плотности ворса электрофлокированных нетканых материалов / С. Ю. Иванова, Е. Н. Бершев, О. М. Иванов // Известия вузов. Серия: Технология текстильной промышленности. – 1990. – № 2.

81. Ivanova, S. Die Herstellung von Verbundstoffen unter ständiger Kontrolle ihres Flächengewichts nach der Methode der optischen Durchlässigkeit / S. Ivanova, E. Bershev, O. Ivanov // 4. Internationales Textextil Symposium für technische Textilien und textilarmierte Werkstoffe. – Frankfurt am Main, 2–4 Juni 1992.

82. Ivanova, S. Elektronenoptisches Verfahren zur Prüfung der Oberflächendichte von Vliesstoffen im Produktionsprozess / S. Ivanova, E. Bershev, O. Ivanov // International Congress for the nonwovens and disposables industries. Index 93. – Geneva-Switzerland, 20–23 April 1993.

83. Иванова, С. Ю. Метод и прибор для контроля плотности нанесения ворса / С. Ю. Иванова, Е. Н. Бершев, О. М. Иванов // 2-я Международная флоконференция «Флок-96», 6–7 Мая 1996. – Санкт-Петербург, 1996.

84. А. с. № 1602176 Россия. МКИ G 01 N 21/89. Устройство для измерения плотности ворсового покрытия полотна: заявл. 12.04.1988: опубл. 22.02.1990 / С. Ю. Иванова, Е. Н. Бершев, О. М. Иванов (Россия). – Бюл. № 21.

85. А. с. № 1736252 Россия. МКИ G 01 N 21/59. Способ определения плотности ворсового покрытия: заявл. 18.07.1990: опубл. 22.01.1992 / С. Ю. Иванова, Е. Н. Бершев, О. М. Иванов (Россия). – Бюл. № 41.

86. Brokmeier, D. Neuere Erkenntnisse bei der Beflockung von textilen Flächengebilden / D. Brokmeier // Flock. – 1980. – № 20. – Dezember. – S. 12–20.

87. Gabler, K. Untersuchungen des Flugverhaltens von Flock mit Hilfe der Hochfrequenzkinematografie / K. Gabler // Flock. – 1980. – № 20. – Dezember. – S. 23–26.
88. Potente, H. Ein Beitrag zur Faserverankerung beim elektrostatischen Beflocken / H. Potente, K. Gabler // Flock. – 1979. – № 16. – Dezember. – S. 16–23.
89. Semenov, V. A. Method For Increasing the Pile Density in Electrostatic Flocking by Adding a Directing Electrode / V. A. Semenov, S. P. Hersh, B. S. Gupta // IEEE IAS Annual Meeting 5–9 October. – Philadelphia, 1981.
90. Bershev, E. N. Die Berechnung der Einrichtungsparameter für Kleberauftrag bei Flockgarnherstellung / E. N. Bershev, O. M. Ivanov // 7. Chemnitzer Textilmaschinen – Tagung, 05–06 Oktober 1999. – S. 8–12.
91. Патент № 2172905 Россия. МПК F 26 B 3/30. Устройство для сушки плоских материалов: заявл. 10.05.2000; опубл. 27.08.2001 / Иванов О. М., Бершев Е. Н., Завалищева Т. В. (Россия). – Бюл. № 24.
92. Никифорова, Н. В. Электросепарация волокон с разными свойствами / Н. В. Никифорова, Е. Н. Бершев // Известия вузов. Серия: Технология текстильной промышленности. – 1974. – № 3.
93. Бершев, Е. Н. Исследование распределения плотности нанесения ворса при создании флокированных узоров / Е. Н. Бершев, Л. В. Лобова // Известия вузов. Серия: Технология текстильной промышленности. – 1982. – № 5.
94. Бершев, Е. Н. Печать ворсом / Е. Н. Бершев, Л. В. Лобова. – Москва: Легпромбытиздат, 1989.
95. Лобова, Л. В. Электрофлокированные материалы с локальным нанесением ворса: монография / Л. В. Лобова. – Санкт-Петербург: СПбГУПТД, 2019. – 398 с.
96. А. с. № 272945 СССР, МКИ D 06 n. Электростатический способ изготовления материалов с ворсом с разноцветными полосами: заявл. 19.08.1968; опубл. 10.03.1971 / Е. Н. Бершев, Н. В. Никифорова (СССР). – Бюл. № 9.
97. Патент № 1836034. Россия. МКИ D 04 H 11/00. Способ электрической сепарации частиц: опубл. 13.10.1992 / Шляхтенко П. Г. (Россия). – Бюл. № 36.
98. Патент № 2024319. Россия. МКИ D 04 H 11/00. Устройство для электрической сепарации частиц: опубл. 15.12.1994 / Шляхтенко П. Г. (Россия). – Бюл. № 45.
99. Патент № 5246518 США. МКИ B 32 B 31/00. Способ печатания рисунков и устройство его осуществления: опубл. 23.06.1993 / Nathen Helen (США). – Легкая промышленность. – № 24.
100. А. с. № 2016154. Россия, МКИ D 04 H 11/00. Устройство для нанесения многоцветных ворсовых узоров на материал: заявл. 16.04.1991; опубл. 20.02.1995 / Е. Н. Бершев, О. Н. Раков, Л. В. Лобова и др. (Россия). – Легкая промышленность. – № 6.
101. А. с. № 1763538 Россия, МКИ D 04 H 11/00. Способ получения многоцветных рисунков на поверхности изделий: опубл. 10.09.1992 / Е. Н. Бершев, Л. В. Лобова, О. Н. Раков и др. (Россия). – Легкая промышленность. – № 35.
102. Патент № 2172367 Россия, МПК Д 04 Н 11/00 Способ получения ворсовых рисунков: заявл. 19.04.2000; опубл. 20.08.2001 / Иванов О. М., Бершев Е. Н., Козлова М. В. (Россия). – Бюл. № 23.

103. Патент № 2255154. Россия. МПК: D 04 H 11/00. Способ получения многоцветных ворсовых рисунков: заявл. 17.03.2004: опубл. 27.06.2005 / Иванов О. М., Коняева Л. В., Козлова М. В. – Бюл. № 18.
104. Патент № 2294990. Россия. МПК: D 04 H 11/00. Способ получения многоцветных ворсовых рисунков: заявл. 27.06.2005: опубл. 10.03.2007 / Иванов О. М., Кочетова Л. В., Козлова М. В. – Бюл. № 7.
105. Иванов, О. М. Методика анализа цветовых переходов на флокированных узорах / О. М. Иванов, М. В. Козлова, Л. В. Коняева // Известия вузов. Серия: Технология текстильной промышленности. – 2004. – № 5 (280). – С. 98–101.
106. А. с. № 1715906 СССР. МКИ: D 04 H 11/00 Способ электрофлокирования плоских материалов и устройство для его осуществления: заявл. 26.07.1989: опубл. 01.11.1991 / О. М. Иванов, Г. П. Шаглин, Е. Н. Бершев. – Бюл. № 41.
107. А. с. № 1484384 СССР. МКИ В 05 Д 1/06. Способ электростатического нанесения ворсового материала: опубл. 07.06.1989 / О. М. Иванов, Г. П. Шаглин, Е. Н. Бершев. – Бюл. № 21.
108. Патент № 2199398 Россия. МПК В 05 В 5/08, В 05 Д 5/06 Способ получения ворсовой поверхности на объемном изделии (варианты): заявл. 09.01.2001: опубл. 27.02.2003 / Иванов О. М., Козлова М. В. (Россия). – Бюл. № 6.
109. Корн, Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – Москва: Наука, 1973.
110. Безносова, В. Условия ориентации ворса в технологии электрофлокирования / В. Безносова // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. – 2014. – № 3. – С. 69–71.
111. Иванов, О. М. Применение неоднородных электрических полей для повышения эффективности процесса электрофлокирования / О. М. Иванов, Т. В. Завалищева, М. В. Козлова // Материалы юбилейной научно-технической межвузовской конференции. Ч. 3. 23–24.11.2000. – Санкт-Петербург, 2000. – С. 39–43.
112. Козлова, М. В. Применение эффекта сепарации ворса в неоднородном электрическом поле для получения многоцветных ворсовых рисунков / М. В. Козлова // Вестник молодых ученых. Серия: Технические науки. – 2002. – № 7.
113. Шляхтенко, П. Г. Способ определения плотности покрытия ворсовых материалов / П. Г. Шляхтенко, С. Ю. Иванова, Б. Н. Антонов // Текстильная промышленность. – 1986. – № 12. – С. 49–50.
114. Шляхтенко, П. Г. Устройство для контроля поверхностной плотности ворсового покрытия / П. Г. Шляхтенко // Известия вузов. Серия: Технология текстильной промышленности. – 1989. – № 1. – С. 137.
115. Иванов, О. М. Модель поведения ворса при использовании эффекта сепарации в электрическом поле для получения флокированных рисунков / О. М. Иванов, М. В. Козлова // Современные технологии производства нетканых, пленочных материалов, кожи и меха: межвузовский сборник научных трудов. – Санкт-Петербург: СПГУТД, 2000. – С. 5–13.
116. Бершев, Е. Н. Нанесение ворса на объемные изделия различной формы / Е. Н. Бершев, Н. В. Никифорова. – Ленинград: ЛИТЛП им. Кирова, 1987.

117. Патент № 2199398 Россия. МПК В 05 В 5/08, В 05 Д 5/06 Способ получения ворсовой поверхности на объемном изделии (варианты): заявл. 09.01.2001: опубл. 27.02.2003 / Иванов О. М., Козлова М. В. (Россия). – Бюл. № 6.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. НАНЕСЕНИЕ ВОРСА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ.....	5
1.1. Анализ движения заряженной ворсинки в электрическом поле.....	7
2. СЫРЬЕВЫЕ КОМПОНЕНТЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ В ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОФЛОКИРОВАНИЯ.....	9
2.1. Ворс и требования, предъявляемые к нему.....	9
2.2. Обработка ворса. Последовательность операций.....	10
2.3. Методы и приборы для измерения характеристик ворса.....	12
2.4. Методы измерения характеристик флокированного материала.....	18
2.5. Требования к адгезивам в технологии электрофлокирования.....	21
3. ИЗМЕНЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ВОРСОВОГО ПОКРЫТИЯ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОФЛОКИРОВАНИЯ.....	23
3.1. Модель формирования ворсового покрытия с учетом встречного потока заряженного ворса.....	23
3.2. Сравнение моделей формирования ворсового покрытия на основе экспериментальных результатов.....	26
3.3. Процесс формирования ворсового покрытия при использовании относительных параметров.....	31
3.4. Оценка влияния режима нанесения и свойств ворса на технологические параметры процесса флокирования.....	32
4. ПРОЦЕСС ЗАРЯДКИ ВОРСА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ.....	37
4.1. Процесс контактной зарядки ворса в технологии электрофлокирования.....	39
4.1.1. Линейное распределение заряда по длине биполярно-заряженного волокна в электрическом поле.....	39
4.2. Нелинейное распределение плотности заряда вдоль ворсинки.....	42
4.3. Модели для расчета максимального заряда ворса.....	46
4.4. Анализ процесса зарядки ворса на основе результатов экспериментальных исследований.....	51
5. АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ЗАРЯЖЕННОГО ВОРСА В ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОФЛОКИРОВАНИЯ.....	56
5.1. Исходные положения для построения модели осаждения ворса.....	57
5.2. Модель процесса нанесения ворса с учетом его свойств и технологических параметров процесса.....	58
5.2.1. Анализ процесса флокирования на основе «энергетического» подхода к его математическому описанию.....	59
5.2.2. Анализ процесса флокирования на основе граничных условий зарядки ворса.....	60
5.3. Проверка адекватности модели процесса флокирования на основе результатов эксперимента.....	67
5.3.1. Методика проведения эксперимента.....	67
5.3.2. Анализ результатов измерения основных характеристик процесса флокирования.....	70
5.4. Анализ процесса флокирования на основе «кинематического» подхода к описанию движения потока ворса.....	75

6. ОРИЕНТАЦИЯ ВОРСА НА ПОВЕРХНОСТИ ФЛОКИРОВАННОГО МАТЕРИАЛА.....	81
6.1. Анализ распределения ворсинок по углам наклона к вертикали.....	82
6.2. Экспериментальное исследование распределения ворсинок по углам наклона к вертикали.....	85
6.3. Модель ориентации ворса и формирование ворсового покрытия в процессе флокирования.....	89
6.3.1. Теоретический анализ процесса ориентации ворса.....	90
6.3.2. Экспериментальное исследование процесса ориентации ворса в процессе формирования ворсового покрытия.....	92
6.3.3. Анализ процесса ориентации ворса с использованием относительных характеристик.....	95
6.4. Ориентация ворса на цилиндрической поверхности.....	99
6.5. Модель процесса внедрения нового ворса в структуру ранее нанесенного ворсового покрова при их последовательном осаждении.....	101
6.5.1. Исследование процесса внедрения нового ворса в структуру ранее нанесенного ворсового покрытия.....	102
6.5.2. Методика анализа цветовых переходов на ворсовых узорах с использованием модели проникновения ворсов при их последовательном нанесении.....	104
6.5.3. Методика компьютерного анализа зоны цветового перехода.....	105
6.5.4. Исследование распределения плотности ворса для случая параллельных ворсовых полос.....	106
6.5.5. Оценка влияния напряженности электрического поля и свойств ворса на размер зоны цветового перехода.....	109
7. ОРИЕНТАЦИЯ ВОРСА В ПРОЦЕССЕ ЕГО ДВИЖЕНИЯ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДАМИ.....	110
7.1. Оценка момента силы электростатического взаимодействия в процессе движения ворса между электродами.....	111
7.2. Оценка момента силы аэродинамического сопротивления в процессе движения ворса между электродами.....	114
7.3. Оценка критического угла потери ориентации ворсинки при движении между электродами.....	116
7.4. Возникновение неустойчивого равновесия в процессе движения ворса между электродами.....	121
7.5. Оценка координаты возникновения неустойчивого равновесия.....	124
7.6. Оценка оптимального расстояния между электродами для условий наилучшей ориентации.....	126
7.7. Оценка оптимального расстояния между электродами на основе эксперимента.....	129
8. СТРУКТУРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА И ОБЪЕМНОЙ ПЛОТНОСТИ ВОРСА В ЗОНЕ ФЛОКИРОВАНИЯ.....	132
8.1. Величина объемного заряда ворса между электродами.....	132
8.2. Структура электрического поля в объеме флокатора.....	139
8.3. Распределение ворсинок по скоростям между электродами флокатора.....	142
8.4. Распределение плотности объемного заряда ворса в зоне флокирования.....	143
8.5. Распределение напряженности и потенциала электрического поля в объеме флокатора при встречном движении ворса.....	145

9. НЕОДНОРОДНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОЛЯ В ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОФЛОКИРОВАНИЯ.....	148
9.1. Неоднородное электрическое поле параллельных проводников и его применение в технологии флокирования.....	148
9.1.1. Поле одного цилиндрического проводника между плоскими электродами.....	148
9.1.2. Анализ электрического поля ряда параллельных проводников между заряженными плоскими электродами.....	153
9.2. Применение неоднородного электрического поля для сокращения вылета ворса из зоны флокирования.....	156
9.3. Применение неоднородного электрического поля для формирования многоцветных ворсовых узоров.....	161
9.3.1. Обоснование возможности создания ворсовых узоров в неоднородном электрическом поле.....	162
10. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ ВОРСА НА ПЛОСКИЕ ТЕКСТИЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	166
10.1. Влияние условий нанесения ворса на параметры технологического процесса.....	169
10.2. Влияние заряда ворса на производительность процесса флокирования.....	172
10.3. Оценка оптимального заряда ворса для минимизации продолжительности флокирования.....	173
10.4. Выбор оптимального режима флокирования для обеспечения максимальной прочности закрепления ворса.....	177
10.5. Выбор оптимального расстояния между электродами флокатора.....	179
11. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ФЛОКИРОВАННЫХ НИТЕЙ.....	184
11.1. Выбор схемы подключения электродов для нанесения ворса на нити.....	185
11.2. Выбор режима флокирования нитей на основе описания поля параллельных проводников.....	189
11.3. Влияние электропроводности нити с клеевым слоем на процесс флокирования.....	192
11.3.1. Модель влияния проводимости нити с клеевым слоем на скорость изменения плотности ворса на нити.....	192
11.3.2. Экспериментальная оценка влияния проводимости клеевого слоя на динамику возрастания плотности ворса на нитях.....	196
11.4. Влияние основных технологических параметров на процесс флокирования нитей.....	199
11.5. Конструктивное решение узла нанесения ворса на нити.....	205
12. ТЕХНОЛОГИЯ ОТДЕЛКИ МАТЕРИАЛОВ МНОГОЦВЕТНЫМИ ВОРСОВЫМИ УЗОРАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕОДНОРОДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ.....	210
12.1. Формирование ворсовых узоров в неоднородном электрическом поле.....	211
12.2. Влияние потенциала промежуточного электрода на ширину ворсовых полос.....	211
12.3. Влияние основных конструктивных характеристик установки и условий флокирования на процесс формирования ворсового рисунка.....	214

12.4. Технологический процесс и схемы подключения электродов для получения многоцветных ворсовых узоров.....	219
12.5. Формирование ворсовых узоров с использованием стандартных форм промежуточного электрода. Прогнозирование вида узора.....	223
12.6. Технология получения многоцветных ворсовых узоров на объемных изделиях.....	226
13. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ВОРСА НА РАЗЛИЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ.....	231
13.1. Ручные электрофлокаторы.....	232
13.2. Электропневмофлокаторы.....	235
13.3. Линии для нанесения ворса на рулонные материалы.....	237
13.4. Оборудование для нанесения ворса на объемные изделия.....	241
13.5. Оборудование для нанесения связующего.....	242
13.6. Оборудование для термофиксации связующего.....	243
14. МЕТОДЫ ДЕКОРАТИВНОЙ ОТДЕЛКИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ В ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОФЛОКИРОВАНИЯ.....	244
14.1. Отделка плоских материалов и изделий флокированными узорами.....	244
14.2. Технология нанесения ворса на объемные изделия.....	252
14.3. Флокированные нити и их применение.....	255
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	257
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	259

Научное издание

Иванов Олег Михайлович

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ПРИМЕНЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОФЛОКИРОВАНИЯ**

Монография

Издательский редактор Н. А. Ерина

Учебное электронное издание сетевого распространения

Системные требования:
электронное устройство с программным обеспечением
для воспроизведения файлов формата PDF

Режим доступа: http://publish.sutd.ru/tp_get_file.php?id=2022160, по паролю.
– Загл. с экрана.

Дата подписания к использованию 04.10.2022 г. Рег. № 160/22

ФГБОУВО «СПбГУПТД»
Юридический и почтовый адрес:
191186, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 18.
<http://sutd.ru/>