

УДК 677.026.4

**МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ЗАРЯЖЕННОГО ВОРСА  
В ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОФЛОКИРОВАНИЯ**

*О.М. ИВАНОВ*

(Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна)  
E-mail: rector@sutd.ru

*На основе сформулированных исходных положений предложена модель, позволяющая связать параметры используемого ворса и условия флокирования с ключевой технологической характеристикой процесса – максимальной скоростью подачи ворса. На основе модели получен важный вывод о взаимосвязи максимальной скорости подачи ворса только с его геометрическими и электрофизическими параметрами.*

*The model allowing the establishing of the link between the parameters of the used fleece and the flocking conditions with the key technological feature of the process – the maximum speed of the fleece feeding – is offered on the base of the stated source data. The important conclusion about the unique interrelation of the maximum speed of the fleece feeding and its geometrical and electrophysical parameters is made.*

**Ключевые слова:** электрофлокирование, скорость осаждения ворса, коэффициент зарядки ворса, напряженность электрического поля, параметры ворса.

Технологию, реализующую ориентированное осаждение коротких заряженных волокон в электрическом поле, называют технологией электрофлокирования [1], [2]. Широкие возможности этой технологии применяют в разных отраслях промышленности и, в первую очередь, это текстильная промышленность: искусственные замша и бархат, обивочные материалы, декоративные материалы с флокированными рисунками, флокированные нити, напольные покрытия, отделка одежды, скатертей, салфеток, портьер и т.п.

Для повышения эффективности процесса флокирования необходимо иметь модель, позволяющую связать свойства ворса и параметры электрического поля со

скоростью осаждения волокон. Такая физическая модель необходима для управления процессом осаждения заряженного ворса, выбора технологического режима работы оборудования и прогнозирования качества материала, на основе знания свойств используемого ворса.

Известна зависимость плотности ворсового покрова  $n$  от времени  $t$  [1]:

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

Это соотношение позволяет рассчитать плотность ворсового покрова или время, необходимое для получения заданной плотности, то есть производительность процесса.

Одной из характеристик процесса, определяющих производительность, является скорость подачи ворса  $P$  (1), то есть количество ворса (кг), поступающего на площадь материала  $1 \text{ м}^2$  за 1 с. Экспериментально измерить эту характеристику сложно, так как она не совпадает со скоростью подачи без напряжения. На начальном этапе флокирования, когда практически весь ворс, поступающий из бункера, внедряется в клеевой слой, мы имеем однонаправленный поток заряженного ворса. По мере заполнения поверхности материала ворсом нарастает встречный поток волокон, имеющих заряды противоположной полярности. Однако определяющим для скорости флокирования, является именно начальный этап.

Для оценки максимальной скорости осаждения ворса необходимо определить факторы, ограничивающие ее. Важнейшим из них следует считать объемный заряд ворса, находящегося между электродами [2], [3], поскольку его рост препятствует проникновению нового ворса в зону флокирования и неизбежно на определенном уровне устанавливается динамическое равновесие. Это подтверждается тем, что скорость подачи ворса  $P$  без напряжения гораздо больше, чем при наличии напряжения на электродах [2].

Сначала необходимо выбрать характеристику процесса, которая связана со скоростью осаждения ворса и одновременно с параметрами ворса и условиями его нанесения. Такая характеристика – плотность тока  $j$ , создаваемая движущимся заряженным ворсом [3], [4]. Она связана со скоростью подачи ворса через средний заряд  $q$  и массу  $m$  ворсинки [2], [3]:

$$P = j m/q.$$

Таким образом, необходимо получить зависимость плотности тока от напряженности электрического поля, свойств ворса и других технологических параметров процесса при отсутствии механических ограничений скорости подачи. Имея эту зависимость, мы получим соотношение для скорости подачи ворса.

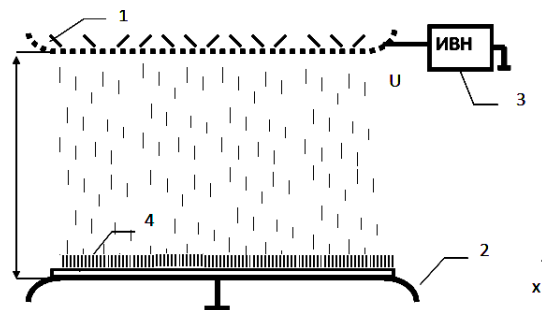


Рис. 1

Сначала надо сформулировать положения, на которых базируется модель.

1. Рассматривается процесс между бесконечными плоскостями: распределение потенциала  $U$  в зоне флокирования (рис. 1 – схема установки для электрофлокирования: 1 – верхний бункер-электрод с ворсом; 2 – нижний заземленный электрод; 3 – источник высокого напряжения; 4 – образец с ворсом) зависит только от координаты  $x$ :

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

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

$$\frac{\partial^2 U(x)}{\partial x^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_0}, \quad (2)$$

где  $\rho(x)$  – объемная плотность заряда, находящегося в межэлектродном пространстве, Кл/м<sup>3</sup>;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная, Ф/м.

3. Рассматривается однонаправленное движение ворса – вдоль оси  $x$ , то есть, как было сказано выше, начальный момент флокирования. Плотность тока  $j$ , переносимого заряженным ворсом от верхнего электрода к нижнему, будет

$$j = \rho(x)v(x) = \text{const}, \quad (3)$$

где  $v(x)$  – скорость ворса в точке "x".

4. Напряженность электрического поля  $E_0$  около электродов с учетом заряда ворса между ними, имеющего поверхностную плотность  $Q$ :

$$E_0 = E(x=0) = U/h - Q/2\varepsilon_0,$$

$$E(x=h) = U/h + Q/2\varepsilon_0 = 2U/h - E_0. \quad (4)$$

5. Заряд всех ворсинок  $q$  одинаков и определяется напряженностью  $u$  поверхности заряжающего электрода:  $q = k E_0$ , где  $k$  – коэффициент зарядки ворса.

6. Выполняется закон сохранения энергии для каждой ворсинки:

$$\frac{mv^2(x)}{2} + \int_0^x C v(x) dx = qU(x), \quad (5)$$

где  $C = 1,11 \ell$  ( $d = 9,3 \cdot 10^{-6}$ ) – коэффициент пропорциональности для силы аэродинамического сопротивления [1] движению ворсинки  $F_c = Cv$ ,  $\ell$  – длина ворсинки, м;  $d$  – диаметр ворсинки, м;  $m$  – масса ворсинки, кг.

Продифференцируем дважды уравнение закона сохранения энергии (5) и воспользуемся уравнением Пуассона (2) и соотношением (3):

$$mv \frac{d}{dx} \left( v \frac{dv}{dx} \right) + Cv \frac{dv}{dx} = \frac{qj}{\varepsilon_0}. \quad (6)$$

Решением этого уравнения является функциональная зависимость

$$v = \sqrt{\frac{2jqx}{\varepsilon_0 C}}. \quad (7)$$

Подставив эту функцию в (5), легко получить распределение потенциала между электродами:

$$U(x) = \frac{jm}{\varepsilon_0 C} x + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2jC}{\varepsilon_0 q}} x^{2/3}. \quad (8)$$

Зная распределение потенциала, можно получить и распределение напряженности в зоне флокирования:

$$E(x) = -\frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{jm}{\varepsilon_0 C} \sqrt{\frac{2jCx}{\varepsilon_0 q}}. \quad (9)$$

Отсюда, учитывая граничные условия (4), получаем величину напряженности на поверхности электродов:

$$E(x=0) = E_0 = -\frac{jm}{\varepsilon_0 C}, \quad (10)$$

$$E(x=h) = -\frac{jm}{\varepsilon_0 C} - \sqrt{\frac{2jCh}{\varepsilon_0 q}}.$$

Из полученных соотношений можно выразить величину плотности тока.

$$j = \frac{2\varepsilon_0 q}{Ch} \left( \frac{U}{h} - E_0 \right)^2. \quad (11)$$

Дальнейшие преобразования позволяют получить значение напряженности электрического поля на поверхности заряжающего электрода:

$$E_0 = C \sqrt{\frac{h}{2mk}} - \frac{U}{h}. \quad (12)$$

С использованием последнего соотношения можно записать выражение для плотности тока в форме, удобной для анализа и расчетов:

$$j = \frac{\varepsilon_0 C E_0}{m} = \frac{\varepsilon_0 C}{m} \left( \frac{U}{h} - C \sqrt{\frac{h}{2mk}} \right)^2. \quad (13)$$

Это выражение важно, так как показывает связь плотности тока, создаваемого заряженным движущимся ворсом с его параметрами ( $m$ ,  $k$ ,  $C$ ,  $\ell$ ,  $d$ ) и условиями флокирования ( $U$ ,  $h$ ).

Используя связь плотности тока со скоростью подачи ворса и связь заряда ворса с напряженностью поля (п. 5), получаем:

$$P = \frac{\varepsilon_0 C}{k}.$$

Это означает, что максимальная скорость подачи ворса зависит только от па-

раметров ворса и не зависит от условий флокирования. Это очень существенно для разработанной модели и было обосновано экспериментально [2]. Сравнение расчетов, сделанных на основе модели, с результатами экспериментов для плотности тока и скорости подачи ворса представле-

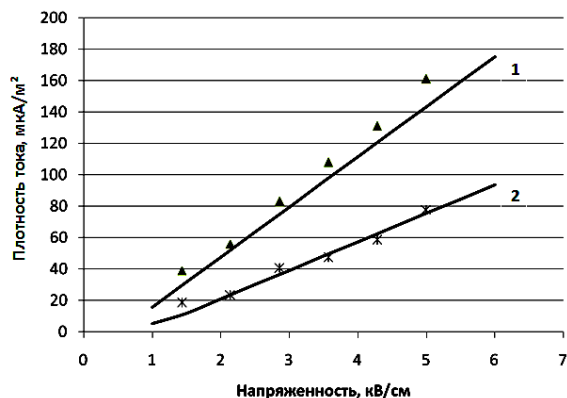


Рис. 2

Таким образом, скорость подачи ворса при флокировании можно увеличить только до определенного предела, определяемого лишь свойствами ворса.

## ВЫВОДЫ

1. Предложены исходные положения, на основе которых создана физическая модель процесса осаждения заряженного ворса, позволяющая рассчитывать технологические параметры процесса для различных условий и свойств ворса.

2. Полученные соотношения показали, что максимальная скорость подачи ворса, непосредственно влияющая на производительность процесса, определяется только геометрическими и электрофизическими характеристиками ворса.

3. Экспериментальная проверка подтвердила адекватность модели как в отношении плотности тока, так и скорости подачи ворса.

но на рис. 2 – влияние напряженности электрического поля на плотность тока, создаваемую заряженным ворсом: 1 – для ворса  $\ell = 1$  мм,  $T = 0,33$  текс; 2 – для ворса  $\ell = 2$  мм,  $T = 2,2$  текс, и рис. 3 – зависимость скорости подачи ворса от напряженности электрического поля.

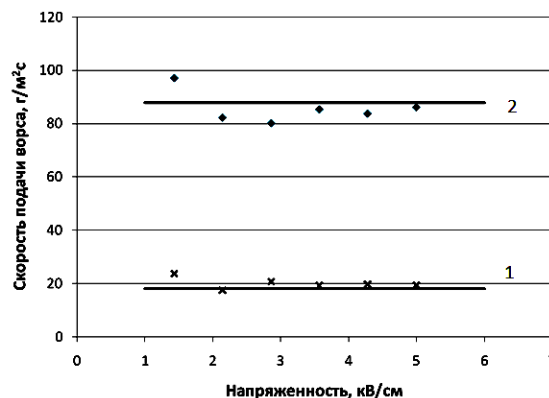


Рис. 3

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бершев Е.Н. Электрофлокирование (нанесение ворса в электрических полях): Монография. – М.: Легкая индустрия, 1977.
2. Иванов О.М. Теоретические аспекты технологии электрофлокирования: Монография. – СПб.: СПГУТД, 2004.
3. Иванов О.М. Модель поведения потока волокон в электростатическом поле при производстве флокированного материала // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. – 2007, № 13. С.30...35.
4. Иванов О.М., Бершев Е.Н. Определение предельных характеристик процесса флокирования // Электронная обработка материалов. – 1988, № 4. С.34...37.

Рекомендована кафедрой технологии прядения нетканых материалов. Поступила 02.12.09.