

УДК 677.21.021

**ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ
ПРОЦЕССА ВЫТЯГИВАНИЯ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**VIBROACOUSTIC REGULATION
OF THE PROCESS OF FIBROUS MATERIALS EXTENSION**

S.B. ВОЛКОВ, Н.К. ПАКУЛОВА, В.В. ВОЛКОВ
S.V. VOLKOV, N.K. PAKULOVA, V.V. VOLKOV

(Пензенская государственная технологическая академия)
(Penza State Technological Academy)
E-mail: ttp@igta.ru

В статье рассмотрен вопрос применения высокочастотных акустических колебаний в качестве фактора регулирования процесса вытягивания волокнистых материалов. Показана практическая возможность целенаправленного изменения протекания процесса вытягивания посредством виброактивации волокон в узкой зоне акустического поля.

The question of high-frequency acoustic vibrations as a factor of regulation of the process of fibrous materials extension has been considered in the article. The practical possibility of purposeful change of the extension process by fibers vibro-activation in a narrow zone of an acoustic field has been shown.

Ключевые слова: волокнистый продукт, вытягивание, неровнота, ультразвук, виброакустическая активация.

Keywords: a fibrous material, extension, unevenness, ultrasound, vibro-acoustic activation.

Вибрационное воздействие на различные материалы и среды имеет в настоящее время достаточно широкое применение. Диапазон видов используемых вибраций и их амплитудно-частотных параметров также весьма велик: от нескольких Гц до ультразвука. Это объясняется тем, что воздействие колебаний вызывает изменение условий взаимодействия между физическими телами на макро- и микроуровнях и

приводит к существенно иным результатам этого взаимодействия.

В механических дисперсных системах используется эффект "виброактивации", заключающийся в снижении сил сцепления между их элементами. Аналогичный эффект наблюдается и при вибровоздействии на волокнистые материалы. Вместе с тем практическое использование подобных технологий в текстильном производстве

крайне ограничено и касается лишь отделки, крашения и других переходов [1].

Известны технические решения, позволяющие снижать силы вытягивания волокнистого продукта при его прохождении через акустическое поле ультразвукового диапазона [2]. Однако задача уменьшения силы вытягивания, как таковая, является, скорее, исключением при переработке волокнистых материалов. При вытягивании, например, технологические цели процесса достигаются контактным взаимодействием волокон при определенных усилиях вытягивания.

Другой важной задачей, решаемой при вытягивании, является снижение неровности продукта по развесу. Для этой цели применяются специальные системы автоматического выравнивания (САВ), непрерывно изменяющие скорости вытяжных пар в соответствии с толщиной продукта на входе и выходе. Главным недостатком САВ является их конструктивная сложность и высокая стоимость, что негативно отражается на экономических показателях производства. Поэтому представляет интерес решение задачи снижения неровности продукта более простым и дешевым способом.

Известно, что процесс вытягивания определяется полями сил трения между волокнами. При постоянстве вытяжки E колебания развеса на входе в вытяжной прибор (ВП) приводят к неровности продукта на выходе. К этому добавляется дополнительная неровность от вытягивания, создаваемая в самом ВП.

Таким образом, процесс вытягивания можно представить в виде:

$$n(x,t,\ell) = A\{n(0,t,\ell), B[n(x,t,\ell), t]\}, \quad (1)$$

где $n(x,t,\ell)$ – плотность передних концов волокон в точке x с длиной волокон между ℓ и $\ell+d\ell$ в момент времени t ; A – оператор, отражающий связь между параметрами продукта и полем скоростей; B – нелинейный оператор связи скорости движения волокна $v(x, t, \ell)$ и $n(x, t)$.

На рис. 1 представлена общая схема процесса.

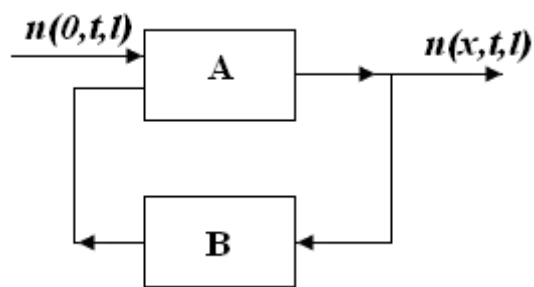


Рис. 1

Элемент B отражает обратную связь между параметрами продукта и полем скоростей волокон, которая может меняться и по причинам, не связанным с изменением параметров продукта.

Наибольшую сложность представляет устранение коротковолновой неровности с длиной волн меньше разводки зоны вытягивания, что связано с быстроедействием и инерционностью САВ, а также особенностями движения волокон в зоне вытягивания. В то же время коротковолновая неровность продукта на входе попадает в диапазон наибольшего увеличения неровности от вытягивания (эффект вытяжных волн), то есть способствует росту общего уровня неровности.

Из кинематической модели [3] процесса вытягивания известны основные зависимости для кривых утонения по числу волокон в сечении $N(x)$, по развесу $M(x)$ и плотности передних концов волокон $n(x)$. Например:

$$N(x) = n_1 \int_0^{\infty} \varphi(\ell) d\ell \int_x^{x+1} [v(x,\ell)]^{-1} dx, \quad (2)$$

где $\varphi(\ell)$ – функция распределения волокон по длинам ℓ ; n_1 – число волокон на входе в ВП.

Из формулы (2) следует, что характер процесса вытягивания определяется штапельной диаграммой продукта на входе и видом функции распределения скоростей в поле вытягивания.

Однако удобные допущения о постоянстве поля скоростей волокон редко соответствуют реальным процессам. Поэтому, несмотря на большую сложность, целесообразно придерживаться более адекватно-

го подхода, при котором процесс считается нестационарным и не только по отношению функции $v(x, t)$. Более того, оказалось, что никаких иных способов выравнивания продукта для валичного ВП не существует, кроме использования нестационарности процесса. Важно отметить также, что нестационарность функции перехода обычно больше влияет на неровноту, чем изменение скорости. То есть часть общей неровноты продукта, являющаяся следствием нестационарности точки перехода, равна:

$$\Delta n_2(t) = -n_2 \frac{\varepsilon(t)}{v_1} - \frac{E-1}{v_2} \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \quad (3)$$

где ε – координата точки перехода на новую скорость $(E-1)v_2^{-1}$; n_2 – число волокон на выходе ВП.

Или через передаточные функции:

$$\Delta \bar{n}_2(S) = W_{\text{en}}(S) \varepsilon(S); \quad (4)$$

передаточная функция от координаты точки перехода к плотности передних концов:

$$W_{\text{en}}(S) = -\frac{S}{v_2} (E-1). \quad (5)$$

Таким образом, неровнота по плотности передних концов (первая предельная схема) уменьшается с увеличением диапазона функции перехода:

$$A(j\omega) = W_{\text{en}}(j\omega) = -(E-1) \frac{\omega}{v_2} |W_{v_2 n}(j\omega)|. \quad (6)$$

Из (3) и (6) видно, что влияние смещения точки перехода на неровноту может быть более значительным, чем изменение скорости вытягивания.

Из сказанного вытекает, что существует принципиальная возможность регулирования процесса вытягивания с целью снижения колебаний развеса на выходе за счет соответствующего изменения координат точки перехода ε .

Очевидно, что

$$\Delta \varepsilon(t) = -k \Delta \bar{N}(R, t), \quad (7)$$

где k – параметр, связывающий координату точки перехода с числом быстро движущихся волокон.

Выражение (6) по сути отражает положительную обратную связь между $\Delta \varepsilon$ и βN :

$$\Delta \varepsilon'(S) = -W_{\text{ne}}(S) \Delta N'(S). \quad (8)$$

Остается только учесть особенности движения волокон в зоне вытягивания: до зоны перехода основная масса волокон движется со скоростью питающей пары v_1 , а переход на скорость выпуска v_2 происходит в точках перехода за весьма малые промежутки времени. Как уже отмечено выше, увеличение зоны перехода волокон на скорость v_2 является выравнивающим фактором (при известных оговорках).

Таким образом, если при вытягивании утолщенного участка обеспечить более ранний переход части волокон на новую скорость (то есть их относительное смещение), то это будет сопровождаться выравниванием продукта путем перераспределения "лишних" волокон на большей длине. Оставаясь в рамках стандартных настроек ВП, указанный эффект можно получить за счет плавающих волокон при изменении параметров поля сил трения в зоне питающей пары.

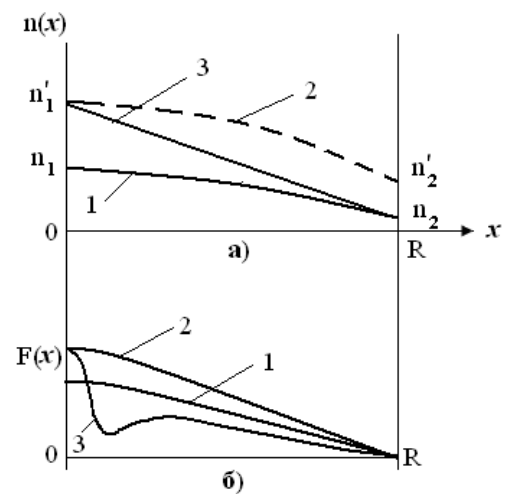


Рис. 2

Графическая иллюстрация сказанного представлена на рис. 2 (графики процесса вытягивания: а) кривые утонения (1 – для номинального участка $f_1(x)$, 2 – для утолщенного участка $f_2(x)$, 3 – при выравнивании утолщенного участка $f_3(x)$); б) кривые тормозящих сил (1 – для номинального участка $F_{T1}(x)$, 2 – для утолщенного участка $F_{T2}(x)$, 3 – при выравнивании утолщенного участка $F_{T3}(x)$)).

Между кривыми утонения существует определенная зависимость, которую можно выразить, например, на основе формального анализа функций (1)...(3):

$$\int_0^R f_3(x) = \int_0^R f_1(x) + \left[\int_0^R f_2(x) - \int_0^R f_1(x) \right] C, \quad (9)$$

где $C < 1$.

В случае линейности функции $f_3(x)$, используя представление ее по типу уравнения в отрезках (при этом $n_2 = 0$), получаем:

$$f_3(x) = \left[1 - \frac{x}{R} \right] \cdot \frac{1}{n_1}. \quad (10)$$

Тогда в исходных координатах имеем:

$$f_3(x) = \left[1 - \frac{x}{R + \frac{n_2 R}{n_1 - n_2}} \right] \cdot \frac{1}{n_1 + n_2}. \quad (11)$$

Кривая утонения 3 при выравнивании утолщения получается модификацией кривой утонения 2 путем местного уменьшения сил трения между волокнами в результате вибровоздействий:

$$F = \mu p(x), \quad (12)$$

где μ – коэффициент трения; $p(x)$ – давление в контакте.

Основная сложность анализа связана с тем, что μ зависит как от давления, так и от скорости относительного движения волокон. Силы, тормозящие переход волокон на новую скорость, определяются как

$$F_T(x) = \beta \int_{x-1}^x F_1(x) m_1(x) dx, \quad (13)$$

где $F_1(x)$ – силы трения покоя; β – среднее число контактов у одного волокна; $m_1(x)$ – доля медленно движущихся волокон.

Воздействие высокочастотных вибраций изменяет коэффициент μ и давление в контакте $p(x)$, поэтому местное снижение сил трения между волокнами может быть значительным. Уменьшение тормозящих сил в зоне питающей пары приводит к тому, что плавающие волокна начинают смещение задолго до подхода к основной зоне перехода у вытяжной пары. При этом характер движения контролируемых волокон не изменяется.

Следует отметить, что задача точного аналитического определения параметров вибровоздействия для получения требуемых характеристик полей сил трения в продукте является пока неразрешимой. Это связано не только с вероятностным характером движения и взаимодействия волокон, но и с тем, что виброакустические процессы удовлетворительно моделируются в масштабе одного волокна или в случае условного волокнистого слоя с заданными характеристиками. В реальности оказывается, что технологические давления в волокнистом слое слишком малы (за исключением давления в зажимах вытяжных пар), чтобы вести расчет как для стандартного случая вязкоупругого материала. Модели же для дисперсных сред оказываются некорректными из-за высокой анизотропии волокнистого слоя и влияния значительной протяженности волокон.

Указанные сложности в значительной степени все же можно преодолеть, если рассматривать зону акустического воздействия как узкую полосу (луч) и оптимизировать параметры волокнистого потока в данной зоне по геометрии поперечного сечения и давлению в месте контакта с излучателем.

Самым существенным является то, что распределение энергии звуковых колебаний через волокнистый слой представляет собой сложный многофакторный пере-

менный процесс, сопровождающийся явлениями расхождения, рассеивания и поглощения. Расхождение волны вызвано увеличением волнового фронта. В результате интенсивность волны уменьшается пропорционально квадрату расстояния, амплитуда – пропорционально первой степени расстояния (толщины слоя). Поэтому изначально было понятно, что толщина продукта должна быть ограниченной (несколько мм).

Рассеяние звуковых волн связано с дифракцией на неоднородностях среды, то есть на волокнах, различающихся по плотности и сжимаемости. В результате создается сложное акустическое поле, сопровождаемое наложением первичных и вторичных волн, а также многократное рассеяние. Следует также учесть, что в данном случае размеры неоднородностей находятся в диапазоне длин волн внешнего излучения. А частоты собственных колебаний могут находиться в зоне резонансного возбуждения. Поэтому интенсивность волны при ее прохождении через данную среду существенно изменяется не только в зависимости от расстояния от источника излучения (то есть поперек продукта), но и по мере прохождения волокнистого потока с новым набором параметров через зону акустического поля, так как постоянно изменяется коэффициент поглощения β и число рассеивающих центров α .

$$J_x = J_0 \exp\left(-2\frac{\beta}{c}x\right), \quad (14)$$

где J_0 – начальная интенсивность; c – скорость звука.

И

$$\frac{dJ}{dx} = -\alpha\theta J, \quad (15)$$

где θ – сечение рассеивания.

При этом имеется в виду достаточно узкая зона (1...3 мм), за которой происходит резкое затухание акустического излучения. Только для этой зоны при наличии достаточных внутренних давлений можно предполагать наличие внутреннего и объ-

емного трения. То есть в данной среде различные слои имеют неодинаковые скорости движения (даже при неподвижном продукте), что сопровождается появлением сил внутреннего трения:

$$F_\tau = \eta \frac{\partial v_1}{\partial x_1} S, \quad (16)$$

где η – сдвиговая вязкость; S – площадь соприкосновения слоев.

При колебательном процессе изменение объема V порождает объемное трение

$$F'_\tau = \eta' \frac{1}{V} \frac{\partial v}{\partial t}, \quad (17)$$

где η' – объемная вязкость.

В общем виде для сил трения через тензор вязких напряжений [4] имеем:

$$\sigma_{ik} = \eta \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ik} \frac{\partial v_1}{\partial x_1} \right) + \eta' \delta_{ik} \frac{\partial v_1}{\partial x_1}, \quad (18)$$

где $\sigma_{ik} = \begin{cases} 0 & \text{при } i \neq k \\ 1 & \text{при } i = k \end{cases}$ – единичный тензор.

Первое слагаемое отражает явления сдвиговой вязкости, а второе определяет внутреннее трение за счет объемной вязкости.

Из-за отсутствия прямых методов определения коэффициентов объемной вязкости невозможно точное аналитическое нахождение параметров поглощения среды. Данную задачу можно решить, если учесть, что аналитически неопределимая часть поглощения соответствует релаксационным процессам термодинамических переходов, для которых требуется определенное время. Вследствие малости времени нахождения волокнистой среды в зоне облучения явления релаксации не успевают развиться, и поэтому данную составляющую процесса можно не учитывать. То есть нас в первую очередь интересует механический эффект вибровоздействия на воздушно-волокнистую среду. В функции Лагранжа появляется дополнительный

член $H(t)$ потенциальной энергии, пропорциональный смещению и силе:

$$L = \frac{m\dot{x}^2}{2} - \frac{kx^2}{2} + xH(t). \quad (19)$$

Соответствующее уравнение движения имеет вид:

$$H(t) = (\ddot{x} + \omega_0^2 x) m, \quad (20)$$

где ω_0 – частота собственных колебаний системы.

Кроме того, следует отметить, что резкое изменение характера протекания колебательных процессов в продукте может быть связано с попаданием в околорезонансные зоны отдельных волокон и их групп. Максимальная амплитуда наблюдается при частоте $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$. Для средне-частотного ультразвукового диапазона $\beta < \omega_0$, с учетом $\omega \approx \omega_0$, получаем для интенсивности излучения:

$$J(\Delta\omega) = \frac{F_0^2}{4m} \frac{\beta}{\beta^2 + \Delta\omega^2}. \quad (21)$$

С помощью выражений (20) и (21) можно примерно оценить параметры колебательного процесса (внешнего возбуждения) в зависимости от параметров волокнистой среды, в первую очередь, от β .

В целом рассматриваемая система имеет n степеней свободы, собственных частот и форм нормальных колебаний. Амплитуда вынужденных колебаний зависит от амплитуды колебаний рабочей поверхности излучателя и соотношения частот вынужденных и собственных колебаний среды. Таким образом, подбором частот внешнего излучения можно добиваться приближения к околорезонансным зонам (для большой доли волокон), что увеличивает эффект виброактивации даже при относительно невысоких интенсивностях излучения порядка $2 \div 3$ Вт/см².

Основная особенность данной системы состоит в том, что она работает в следящем режиме без всякой дополнительной

автоматики, так как использует зависимость удельного потока энергии акустических колебаний в слое продукта от величины давления σ в нем:

$$q = \frac{\sigma^2}{\zeta}. \quad (22)$$

Акустический импеданс системы:

$$\zeta = \sqrt{\left(\omega_b M - \frac{\delta}{\omega_b}\right)^2 + \mu^2}, \quad (23)$$

где ω_b – частота вынужденных колебаний; μ – коэффициент трения; δ – коэффициент упругости; M – масса колеблющейся системы.

Изменение массы проходящего участка продукта мало влияет на значение ζ , но существенно влияет на q , так как q квадратично зависит от скачка давления σ между излучателем и продуктом, возникающего при прохождении утолщенного участка. При этом увеличение q сопровождается виброактивацией волокон именно в утолщении и создает условия для более раннего смещения плавающих волокон в зоне вытягивания. Таким образом, происходит сглаживание пиков неровноты продукта без изменения скоростей вытяжных пар и вообще без использования САВ.

Прохождение тонких мест сопровождается снижением давления в слое продукта в месте контакта с излучателем и соответственно резким падением потока энергии колебаний. Плавающие волокна остаются сцепленными с другими волокнами и транспортируются без смещения до зоны основного вытягивания.

Наиболее удобна установка излучателя в предварительной зоне вытягивания, где скорость перемещения продукта сравнительно невелика. Расчет режимов работы данной системы выравнивания достаточно сложен, однако, как показали проведенные исследования, практическая ее настройка не представляет особых трудностей. Необходимы лишь соответствующий датчик развеса и средства индикации к нему. Отметим, что современные машины оснаще-

ны средствами индикации и контроля, что еще более упрощает применение данной системы.

ВЫВОДЫ

1. Предложен и практически проверен более простой способ снижения неровноты волокнистого продукта путем местного уменьшения сил сцепления между волокнами при прохождении утолщенных участков через зону ультразвукового поля.

2. Установлено, что эффект местной виброактивации волокон может быть достигнут в широком диапазоне частот колебаний, начиная от нескольких кГц и до сотен кГц, в зависимости от параметров продукта и скорости его движения. С ростом скорости перемещения продукта необходимо увеличивать амплитуду колебаний излучателя без снижения рабочего диапазона частот (16...30 кГц для хлопка) во избежание снижения интенсивности колебаний.

3. Особое значение для эффективности работы системы имеет оптимальный профиль поверхности излучателя, контактирующий с волокном. От этого зависит не только характер протекания виброакустических процессов в рабочей зоне, но и до-

ля виброактивированных плавающих волокон, а значит и эффективность выравнивания.

4. Предложенным способом возможно снижение пиков неровноты на $20 \div 50\%$ и более. Эффективность системы может быть повышена за счет применения соответствующих элементов автоматики для более качественного реагирования на изменение параметров продукта.

5. Создан ряд патентоспособных технических решений регуляторов неровноты, работающих с использованием высокочастотной виброактивации волокон.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Фаерман В.Т.* Применение ультразвука для обработки текстильных материалов. – М.: Легкая индустрия, 1969.
2. А.с. СССР №1467100. Вытяжной прибор текстильной машины. Оpubл. 23.03.89. Бюл. №11.
3. *Гинзбург Л.Н., Хавкин В.П. и др.* Динамика основных процессов прядения. – Ч.2. – М.: Легкая индустрия, 1972.
4. *Шутилов В.А.* Основы физики ультразвука. – Л.: ЛГУ, 1980.

Рекомендована кафедрой теоретической и прикладной механики. Поступила 08.11.12.