

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ВОЛОКНА

А.Ф. Костюков

В статье рассматривается модель взаимодействия фронта плоской акустической волны с многослойной дифракционной решеткой из цилиндрических тел (волокон) конечной длины. Предлагается методика статистической оценки свойств материала.

Ключевые слова: математическая модель, свойства волокон, неразрушающий контроль, физико-механические параметры.

Как известно, существует серьезное противоречие между современными технологическими методами производства, культивирования и переработки волокнистого сельскохозяйственного сырья растительного и животного происхождения и метрологической оценкой физико-механических параметров и технологических свойств этого сырья.

При оценке свойств, скажем, лубяных волокон превалируют такие внесистемные понятия и определения как «горсть», «доставочная длина», «лентистость», «тяжеловесность», «хорошее» или «нехорошее» волокно. При оценке качества других видов волокон – шерсти, пуха, минерального волокна – критерии качества не лучше. Иначе говоря, при всем технологическом прогрессе в переработке волокнистого сырья его метрологическое сопровождение остановилось на рубеже XIX века.

Вследствие этого, актуальность и неотложность создания системы метрологических характеристик основных видов сельскохозяйственного волокнистого сырья не вызывает сомнения.

Метрологическое обеспечение любого материала, вещества, изделия – процесс длительный, трудоемкий, требующий больших усилий коллективов специалистов самого различного профиля, и потому, вне всяких сомнений, не может быть реализован в индивидуальном порядке.

Значительно проще дело обстоит при разработке методов контроля требуемых параметров, когда зарегистрированные результаты контроля соотносятся с параметрами, принятыми за эталонные. В этом случае уже не имеет значения насколько длительно, сложно и трудоемко получение эталонных значений. Главное, чтобы они были в наличии.

Совершенно ясно, что разработка методов контроля – первый шаг на пути создания метрологического обеспечения параметров исследуемого объекта.

В связи с этим возникают особые требования к методу контроля.

Контроль должен быть:

- неразрушающим с тем, чтобы любой контролируемый образец мог быть проконтролирован многократно с обеспечением возможности статистической обработки результатов контроля;

- оперативным, позволяющим получать необходимый массив данных в приемлемые сроки;

- не требовал сложных, многократных технологических переходов.

Анализируя известные методы неразрушающего контроля [1] приходим к следующему заключению.

По свойствам используемых физических полей и характеру взаимодействия с исследуемым объектом неразрушающие методы контроля можно разделить на ряд групп и подгрупп. Это: все виды электромагнитного излучения – низкочастотные ($0-10^3$ Гц), радиоволны (10^4-10^{10} Гц), инфракрасное ($10^{11}-4 \cdot 10^{14}$ Гц), видимое ($4 \cdot 10^{14}-7,5 \cdot 10^{14}$ Гц), ультрафиолетовое ($7,5 \cdot 10^{14}-3 \cdot 10^{16}$ Гц), рентгеновское ($3 \cdot 10^{16}-3 \cdot 10^{20}$ Гц) и гамма-лучи ($3 \cdot 10^{19}-3 \cdot 10^{22}$ Гц); радиоактивное излучение (альфа- и бета-лучи); электростатические поля – емкостные методы; магнитные методы; акустические поля-инфразвуковое ($0-16$ Гц), звуковое ($16-2 \cdot 10^4$ Гц), ультразвуковое ($2 \cdot 10^4-10^7$ Гц) и гиперзвуковое (10^7 Гц и выше) излучения; пневматические и гидравлические потоки.

Сразу же необходимо заметить, что низко-, средне-, и высокочастотные электромагнитные колебания (до $3 \cdot 10^7$ Гц), магнитные методы неприемлемы для цели определения физико-механических параметров волокон вследствие чрезвычайно низкой разрешающей способности. Дело в том, что волокна, являясь диэлектриками, не обладают ощутимыми электрическими и магнитными свойствами и, вследствие этого, практически не взаимодействуют с электромагнитными излу-

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ВОЛОКНА

чениями указанного диапазона. Ясно, что при отсутствии или незначительности взаимодействия выявление каких-либо свойств волокон невозможно.

С помощью радиоволн СВЧ диапазона ($3 \cdot 10^7 - 10^{10}$ Гц) возможен контроль параметров диэлектрических тел (диэлектрической проницаемости, плотности вещества и проч.), но объект измерения, при этом, должен представлять из себя монолитное тело. Известно также использование СВЧ - излучения для определения влажности аморфных и сыпучих масс. Это связано с наличием широкополосной вращательной релаксации полярных водяных молекул в области СВЧ, вызывающих поглощение и рассеяние радиоволн. Информацию о влажности может нести амплитуда, фаза и угол поворота плоскости поляризации электромагнитной волны. Однако, ни прямое, ни косвенное определение основных технологических параметров зрелости, линейной плотности, разрывной прочности - с помощью радиоволн СВЧ диапазона невозможно.

Имеется ряд публикации об использовании инфракрасного излучения для целей текстильного материаловедения. В основном, ИК-излучение используется для анализа структуры и конфигурации молекул, образующих волокна, а также определения состава смеси волокон, тканей по различному спектру и интенсивности поглощения инфракрасного излучения волокнами различной природы. В частности, с помощью инфракрасной спектроскопии возможно определение степени кристаллизации (по интенсивности поглощения) и ориентации макромолекул в волокне (по составу спектра). Нужно сказать, что, в связи с молекулярным характером поглощения, проникающая способность ИК-излучение довольно ограничена и сопровождается вторичным явлением – нагреванием облучаемого объекта.

Пневмо – и гидротоки применять для этой цели не целесообразно вследствие низкой точности, вызванной активным технологическим воздействием инструмента (потока) на объект контроля.

Наиболее приемлемым видом зондирующего воздействия, с позиции поставленной задачи, являются акустические колебания.

Традиционно принято считать, что волокнистые массы являются высокодемпфирующей средой для акустических (ультразвуковых) колебаний и потому неперспективны для цели контроля. Однако, высокая поглощающая способность исследуемого объекта одновременно является несомненным досто-

инством, обеспечивающим хорошую разрешающую способность зондирующего сигнала.

Целью исследования является разработка метода оперативного контроля свойств волокон как в процессе их роста, так и на момент сбора урожая, а также при приемке волоконного сырья предприятиями перерабатывающей промышленности.

Задачами проводимой работы являются:

- разработка физической и математической моделей взаимодействия фронта ультразвуковой волны с волокнистым множеством;

- выявление принципиальной возможности существования (после прохождения ультразвуковым сигналом контролируемого волокнистого образца) стоячей волны регистрируемой амплитуды, что является необходимым условием реализации метода;

- теоретическое обоснование наиболее оптимального для решения данной задачи инструмента контроля;

- выявление принципиальной возможности статистического контроля основных параметров волокон (разрывной прочности, линейной плотности, тонины и средней длины волокон) с необходимой точностью и достоверностью в приемлемые сроки;- определение необходимых требований к объекту исследования и зондирующему сигналу.

Понятно, что сельскохозяйственное волокнистое сырье, на момент сбора, не может быть равномерным, по определению, по своим потребительским параметрам, вследствие существенных отличий почв, освещенности, места произрастания, сроков посева и уборки и прочих факторов (для растительного сырья), а также породы, условий питания, режима содержания, здоровья животного и других условий (для волокон животного происхождения).

На практике, как и века назад, превалирует органолептическая оценка свойств волокна, субъективность которой не требует пояснений.

Применяемые в настоящее время на предприятиях – производителях сельскохозяйственного волоконного сырья, а также в текстильной промышленности динамометрический (ГОСТ 3274.1-72) и полярографический (ГОСТ 3274.2-72) методы оценки зрелости волокна позволяют исследовать, выборочно взятый из партии образец массой 40 мг, в первом случае за 3 часа, а во втором – за 8 часов. Количество образцов, взятых от партии волокна, как правило, не превышает трех, что позволяет получить оценку значения зрелости партии волокон при 95% достоверности с точностью $\pm 41\%$. При оценке по

инструментальной точности $\pm 2\%$ достоверность результата не превышает 2,5%, т.е. результат, практически, не достоверен.

Сделаем ряд предварительных замечаний, устанавливающих пределы области рассмотрения и физического состояния взаимодействующих объектов. Если это специально не оговорено, то в качестве источника акустических колебаний используется поршневой излучатель в форме диска, удовлетворяющий условию создания плоской монохроматической волны (радиус излучателя много больше длины излучаемой волны, т.е. $a \gg \lambda$).

Внешние диаметры и линейные размеры цилиндров (волокон) будем считать, практически, идентичными.

Цилиндры расположены однонаправлено, в один слой, фронтально к направлению распространения акустических колебаний и расстояние между ними соизмеримо с диаметрами цилиндров.

При использовании лабораторной установки Шерли, серийной чесальной машины, прибора Жукова, а то и при многократном ручном прочесе испытуемого образца с помощью гребня, из бесформенного волокнистого множества достаточно просто может быть получен вполне удовлетворительный, по равномерности, настил упорядоченных волокон. В этом случае может быть принята за основу известная теория прохождения акустического сигнала через многослойную дифракционную решетку [2], состоящую из множества, волокон линейно ориентированных в направлении прочеса, имеющих одинаковые внешние диаметры.

Будем считать, что плотность вещества цилиндра на четыре порядка превышает плотность окружающей среды, а скорость распространения колебаний в веществе в пять раз выше скорости распространения в окружающей среде. Таким образом, для акустических колебаний цилиндры в газовой среде будут представлять собой абсолютно жесткие тела (угол Брюстера не превышает $0,2^\circ - 0,3^\circ$). Иначе говоря, поглощения акустической энергии веществом цилиндров, практически, не будет происходить вследствие резкого отличия волнового сопротивления вещества цилиндров от волнового сопротивления окружающей среды. На основании этого можно утверждать, что распространение акустических колебаний через слой цилиндрических тел будет происходить только за счёт дифракции. Используя теорию группового излучения, принцип Гюйгенса и взаимное влияние цилиндров, однослойную дифракци-

онную решётку можно представить как излучатель плоской монохроматической волны.

В данном случае это положение справедливо и для ближней зоны излучения, т.е. фронт прошедшей волны представляется как результат действия группы неидентичных, равномерно распределенных синфазных излучателей, суммарное излучение которых определяется волновыми соотношениями между элементарными источниками [2].

Как правило, канал прозвучивания имеет простую геометрическую конфигурацию (цилиндр – в случае дисковых датчиков, параллелепипед или куб – в случае прямоугольных датчиков), что позволяет легко определять объем и массу многослойной структуры в канале. Так же просто определяется масса единичного цилиндрического тела. Зная это, определим количество цилиндрических тел в канале

$$g_c = \pi \cdot a'^2 h \cdot \gamma / 2, \\ Q = \frac{G}{g_c}, \quad H = 2 \frac{Q}{\pi a^2}, \quad (1)$$

где g_c – масса единичного цилиндра,

a – радиус канала прозвучивания с дисковыми датчиками,

a' – внешний радиус цилиндра,

γ – удельная масса вещества цилиндра,

h – средняя длина единичного цилиндра,

G – масса многослойной структуры в канале прозвучивания,

Q – количество цилиндров в канале прозвучивания,

H – количество слоев цилиндров в канале прозвучивания (при дисковых датчиках).

Разумеется, экспериментально решение находится в обратном порядке – определяется G , затем Q (по величине ультразвукового сигнала), а затем значения g_c и H .

Одним из основных условий модели объекта является неравенство массы различных цилиндров. Причем, цилиндры с одинаковой массой распределены по всей многослойной структуре случайным образом. Иначе говоря, для оценки свойств образца правомерны только статистические методы контроля.

В этом случае выражения (1) приобретут следующий вид

$$M_g = \pi \cdot M_a'^2 h \cdot \gamma / 2, \\ M_Q = \frac{G}{M_g}, \quad M_H = 2 \frac{M_Q}{\pi a^2} \quad (2)$$

где M_g – математическое ожидание массы

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ВОЛОКНА

единичного цилиндра,

M_a - математическое ожидание радиуса единичного цилиндра

M_Q - математическое ожидание количества цилиндров в канале прозвучивания,

M_H - математическое ожидание количества слоев цилиндров в канале прозвучивания.

Тогда, коэффициент прохождения ультразвукового сигнала через многослойную упорядоченную волокнистую систему будет выражен следующим вероятностным уравнением

$$B_{SH} = \prod_{i=1}^{M_H} \left(1 + \frac{P_{i\text{расс}}}{P_0 + \sum_{j=1}^{M_H-1} P_{j\text{расс}}} \right) + \sum_{i=1}^{M_H} \prod_{l=1}^{M_H} \left(1 + \frac{P_{i\text{расс}}}{P_{j\text{отп}} + \sum_{j=1}^{M_H-1} P_{j\text{расс}}} \right)$$

$$P_0 = \frac{kL \cdot \cos \theta}{2} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi k R_0}} \cdot e^{ikR_0 - \frac{i\pi}{4}};$$

$$P_{\text{расс}} = \sqrt{\frac{2}{\pi k R_0}} \cdot e^{ikR_0 - \frac{i\pi}{4}} \cdot (2N + 1) \cdot \sum_{m=-\infty}^{\infty} C_m \cdot e^{im\theta};$$

$$P_{\text{отп}} = -\frac{kL}{2} \cdot \cos \theta \cdot e^{ikR_0 - \frac{i\pi}{4}}; \quad (3)$$

где B -коэффициент прохождения,

P_0 -давление падающей волны,

$P_{\text{расс}}$ - давление рассеянной волны;

$P_{\text{отп}}$ - давление отраженной волны;

k -волновой коэффициент,

$2N+1$ -число цилиндров в слое,

n -целочисленный номер отражающего цилиндра,

d -расстояние между осями цилиндров,

$L=2dN$ -площадь облучаемой поверхности цилиндров решетки,

R_0 -расстояние от плоскости решетки до точки наблюдения (приема),

C_m -коэффициенты, учитывающие все возможные взаимодействия между цилиндрами в результате множественных отражений,

θ - угол к нормали на плоскость решетки, под которым падает акустическая волна.

Из выражения (3) следует, что амплитуда сигнала, прошедшего через исследуемый образец, находится в сильной нелинейной (экспоненциальной) зависимости от количества волокон на пути распространения ультразвуковой волны, то есть практически не реально обеспечить равную инструментальную погрешность контроля при изменении,

например, средней зрелости волокон от образца к образцу.

Рассмотрим, с этих позиций, влияние волокнистого множества на фазу ультразвукового сигнала, прошедшего через образец. Акустическая волна, идущая через многослойную структуру цилиндров, получает приращение пути, вызванное дифракцией на цилиндрах, которая хорошо выражается секансоидальной зависимостью. Так, если $2a'$ - диаметр цилиндра, d - расстояние между осями цилиндров в слое, а $l = d - 2a'$ - межцилиндровый промежуток, $l' = d' - 2a'$ (где d' - межслоевое расстояние между осями цилиндров, l' - межцилиндровый промежуток между слоями), то при $d' > d$ секанс угла отклонения огибающей волны уменьшается, что снижает приращение пути огибающей волны.

То - есть, "разрежение" структуры уменьшает приращение пути распространения огибающей волны и наоборот - "уплотнение" ($d' < d$) приводит к росту пути распространения по нелинейному закону.

Тогда, можем записать, что

$$X = X' + X'' + \sum_{i=1}^H d'_i \cdot \sec \alpha_i \quad (4)$$

где X - путь, пройденный акустическим сигналом через многослойную структуру цилиндрических тел от излучателя к приёмнику,

X' - путь от излучателя до поверхности многослойной структуры,

X'' - путь от последнего слоя многослойной структуры до приёмного датчика,

α_i - угол огибания цилиндра акустическим колебанием.

Исключая интервалы X' и X'' , не влияющие на закономерность взаимодействия фронта волны со структурой волокон, и с учётом выражений (3), уравнение (4), в вероятностном смысле, запишется следующим образом

$$M_X = \sum_{i=1}^{M_H} d'_i \cdot \sec \alpha_i \quad (5)$$

Поскольку при объективно неизменном расстоянии между датчиками подобное приращение пути зависит только от количества цилиндров на интервале распространения волны, то при изменении частоты излучаемых колебаний будет наблюдаться квазидисперсия скорости распространения звука.

С ростом частоты излучаемых колебаний фазовое запаздывание относительно периода колебания при прохождении одного и того же множества цилиндров будет возрастать. Отсюда следует, что для получения од-

нозначных результатов прозвучивание необходимо производить гармоническими колебаниями. При этом, изменение амплитуды сигнала, практически, не влияет на инструментальную точность контроля.

Из всего вышесказанного вытекают следующие выводы.

Основным фактором, влияющим на изменение сигнала, является количество цилиндров (волокон) на пути распространения акустических колебаний от излучателя к приемнику.

В связи с этим представляется целесообразным при проведении контроля заменить массовые величины, применяемые в настоящее время, «поверхностная плотность – $\text{кг}/\text{м}^2$ » и «объемная плотность – $\text{кг}/\text{м}^3$ » на «единичная поверхностная плотность – $1/\text{м}^2$ » и «единичная объемная плотность – $1/\text{м}^3$ ».

Изменение фазы сигнала имеет прямо пропорциональный характер от количества цилиндров (волокон) при условии $d < 0,1\lambda$. При $d > 0,1\lambda$ зависимость приобретает слабый нелинейный характер.

Для получения однозначных результатов контроля фазовым способом необходимо обеспечивать постоянную объемную плотность (постоянную массу образца в заданном объеме – $\text{кг}/\text{м}^3$) волокнистого множества в зоне контроля. При неизменной поверхностной плотности образца ($\text{кг}/\text{м}^2$) колебания объемной плотности образца ($\text{кг}/\text{м}^3$) в зоне контроля для амплитуды сигнала не критично, вследствие незначительности приращения пути распространения сигнала (не более $\lambda/2$). Как следует из выражения (3) основные потери амплитуды сигнала происходят из-за множественных отражений и рассеяния колебаний на цилиндрах. Количество цилиндров в единице массы находится в обратной квадратичной зависимости от математического ожидания массы единичных цилиндров (от зрелости и, соответственно, механической прочности волокон). Знание массы образца волокон, длины образца в направлении прочеса в канале прозвучивания и количества волокон в навеске (по функциональной зависимости «сигнал – количество волокон») позволяет контролировать средние значения линейной плотности (тонины) и разрывной прочности волокон (по функциональной зависимости «масса волокна – разрывная прочность»). Для определения свойств компактного множества цилиндров предпочтительнее выглядят фазовые методы измерения. При этом, прозвучивание системы цилиндров, для получения однозначных результатов, необхо-

димо производить гармоническим (синусоидальным) сигналом.

При наращивании количества волокон в направлении прозвучивания узлы и пучности акустических колебаний будут сдвигаться к излучателю вслед за первыми узлом и пучностью, вследствие квазидисперсии распространения сигнала в образце, что позволяет использовать это явление в качестве меры количества волокон в образце [3,4].

При этом, волновое расстояние между последующими узлами и пучностями будут оставаться неизменными и равными длине излучаемой волны,

Контроль фазовым методом необходимо производить с использованием относительных значений сигнала, с целью нейтрализации дестабилизирующих климатических факторов (температуры, барометрического давления и относительной влажности среды распространения ультразвуковых колебаний).

Бесконтактное, с помощью акустических колебаний, массоизмерение компактного множества волокон, без определения математического ожидания количества волокон в единице массы, невозможно вследствие того, что в образцах равной массы, но с волокнами различной зрелости количество волокон в навеске будет различным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 18353-73 Контроль неразрушающий. Классификация методов.
2. Шендеров, Е.Л. Волновые задачи гидроакустики / Е.Л. Шендеров. - Л.: Судостроение, - 1972.
3. Патент 2380697 Российская Федерация, МПК7 G01N29/00. Способ контроля средних параметров компактного множества волокон./ Заявитель и патентообладатель Костюков А.Ф.
4. Патент 2367947 Российская Федерация, МПК7 G01N29/00. Способ контроля физико-механических параметров волокон в массе./ Заявитель и патентообладатель Костюков А.Ф.

Костюков А.Ф., соискатель ученой степени кандидата технических наук при кафедре «Электрификация производства и быта» АлтГТУ им. И.И. Ползунова, ст. преподаватель кафедры «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства» ФГОУ ВПО АГАУ, E-mail: kostjukovaf@mail.ru, тел.: 8(3852) 62-84-49