жении поршень-цилиндр тракторного двигателя с воздушным охлаждением: дис. ... канд. / В.И. Четошников. – Челябинск, 1975. – 189 с.

2. Столбов М.С. Теплопередача от газов в стенки цилиндра тракторного дизеля с воздушным охлаждением / М.С. Столбов // Труды НАТИ. – М.: ОНТИ, 1968. – Вып. 198. – С. 83-87.

3. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956.

4. Петриченко Р.М. Системы жидкостного охлаждения быстроходных двигателей внутреннего сгорания / Р.М. Петриченко. – Л.: Машиностроение, 1975. – 224 с.

✦ ✦ ✦

УДК 534.2.26:620.22:677.017

А.Ф. Костюков

МОДЕЛЬ РЕГИСТРАЦИИ ПРИЗНАКОВ МНОГОСЛОЙНОЙ СТРУКТУРЫ С ПОМОЩЬЮ АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

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

Введение

При производстве, реализации, приобретении и обработке естественных волокон растительного и животного происхождения на предприятиях сельского хозяйства и комплексах первичной переработки остро стоит вопрос оценки физико-механических свойств больших объемов исходного сырья.

Уже сообщалось о разработке нового бесконтактного неразрушающего метода оценки физико-механических свойств волокна в массе [1-3]. Однако использование его осложнено отсутствием достаточно полной модели взаимодействия акустического сигнала с волокнистой массой и, вследствие этого, серьезными затруднениями при построении технологичной системы статистического отслеживания параметров волокон в динамическом режиме. Применяемые в настоящее время на предприятиях первичной переработки 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 ч, а во втором – за 8 часов. Количество образцов, взятых от кипы волокна, как правило, не превышает трех, что позволяет получить оценку значения зрелости партии волокон при 95% достоверности с точностью ±82%. При оценке по инструментальной точности ±2% достоверность результата не превышает 2,5%, т.е. результат практически не достоверен.

Между тем совершенно ясно, что оценка зрелости волокон в партии может быть получена только статистически, что при использовании существующих методов нереально. При использовании лабораторной установки Шерли или серийной чесальной машины из бесформенного волокнистого множества достаточно просто может быть получен вполне удовлетворительный, по равномерности, настил упорядоченных волокон.

В качестве исходного образца для построения модели принимается одно- и многослойный прочес волокнистого множества, когда волокна линейно ориентированы в направлении прочеса, имеют одинаковые внешние диаметры при неравенстве внутренних каналов и, соответственно, толщины стенок волокон.

Рассматривается модель взаимодействия фронта плоской акустической волны с многослойной дифракционной решеткой из цилиндрических (трубчатых) тел конечной длины с равномерным распределением толщины стенок по периметру и длине цилиндра и случайным распределением толщины стенок от цилиндра к цилиндру, ориентированных параллельно направлению перемещения относительно излучающе-воспринимающих поверхностей акустических датчиков. Предлагается методика статистической оценки физико-механических свойств материала цилиндрических тел по результатам изменения акустического сигнала после прохождения через многослойную систему тел.

1. Анализ взаимодействия акустической волны с однослойной дифракционной решеткой из цилиндрических объектов. 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 а»λ). Объект находится в зоне Фраунгофера излучателя. Внешние диаметры и линейные размеры цилиндров будем считать практически идентичными. Цилиндры расположены однонаправленно, в один слой, фронтально к направлению распространения акустических колебаний и расстояние между ними соизмеримо с диаметрами цилиндров.

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 0,2-0,3°). Иначе говоря, поглощения акустической энергии веществом цилиндров практически не будет 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. В этом случае для анализа взаимодействия фронта акустической волны с волокнистым множеством может быть использована известная теория взаимодействия акустических колебаний с дифракционной решеткой, по которой для одинарного слоя (прочеса) волокон, представленных как равномерный, ориентированный настил цилиндрических тел равного внешнего диаметра и равной длины, коэффициенты отражения, рассеяния и прохождения акустической волны могут быть представлены следующими уравнениями [3]:

$$P_0 = \frac{kL\cdot cos\,\theta}{2}\cdot\sqrt{\frac{2}{\pi kR_0}}\cdot e^{ikR_0-\frac{i\pi}{4}};\; R_0\rangle\rangle L;$$

$$P_{расс} = \sqrt{\frac{2}{\pi kR_0}}\cdot e^{ikR_0-\frac{i\pi}{4}}\cdot(2N+1)\cdot\sum_{m=-\infty}^{\infty}C_m\cdot e^{im\theta};$$

$$P_{отр} = -\frac{kL}{2}\cdot cos\,\theta\cdot e^{ikR_0-i\frac{\pi}{4}};.$$

$$A = \frac{P_{расс}}{P_{отр}} = -\frac{2}{kd}\cdot\sum_{n=-\infty}^{\infty}(-1)^n\cdot C_m\cdot e^{in\theta}; \qquad (1)$$

$$B = \frac{P_0 - P_{расс}}{P_0} = 1+\frac{(2N+1)}{kL\cdot cos\,\theta}\cdot\sum C_m\cdot e^{im\theta},$$

где А – коэффициент отражения;

В – коэффициент прохождения;

$P_о$ – давление падающей волны;

k – волновой коэффициент;

2N + 1 – число цилиндров в слое;

d – расстояние между осями цилиндров;

L = 2dN – площадь облучаемой поверхности цилиндров решетки;

$R_о$ – расстояние от плоскости решетки до точки наблюдения (приема);

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

δ – угол к нормали на плоскость решетки, под которым падает акустическая волна.

2. Взаимодействие фронта акустической волны с многослойной системой дифракционных решеток. Используя теорию группового излучения, принцип Гюйгенса и взаимное влияние цилиндров, однослойную дифракционную 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 [5].

В общем случае для j-того слоя уравнение коэффициента прохождения примет вид:

$$B_j = 1+\frac{P_{j\,расс}}{P_0+\sum\limits_{i=1}^{j-1}P_{i\,расс}} = 1+\frac{\sqrt{\frac{2}{\pi kR_j}}\cdot e^{ikR_j-\frac{i\pi}{4}}\cdot(2N_j+1)\cdot\sum\limits_{m=-\infty}^{\infty}C_m\cdot e^{im\theta_j}}{\frac{kL_0\cdot\cos\theta}{2}\cdot\sqrt{\frac{2}{\pi kR_0}}\cdot e^{ikR_0-\frac{i\pi}{4}}+\sum\limits_{i=1}^{j-1}\sqrt{\frac{2}{\pi kR_i}}\cdot e^{ikR_i-\frac{i\pi}{4}}\cdot(2N_i+1)\cdot\sum\limits_{m=-\infty}^{\infty}C_m\cdot e^{-im\theta}}. \qquad (2)$$

Так как межслойное интерференционное гашение рассеянных волн учитывается с помощью коэффициентов C_m бесконечного ряда (2), то часть рассеянной каждой решеткой акустической энергии, проходящей в межволоконное пространство навстречу основному потоку и снижающему амплитуду основного потока, может быть обозначена (соответственно каждому слою) как P'_1, P'_2, ..., P'_H. Следовательно, общий коэффициент прохождения через многослойную структуру определяется выражением

$$B_{SH} = \prod_{i=1}^{H} \left(1 + \frac{P_{ipacc}}{P_0 + \sum_{j=i-1}^{H-1} P_{jpacc}} \right)_i + \sum_{i=1}^{H} \prod_{l=1}^{H} \left(1 + \frac{P'_{lpacc}}{P_{jomp} + \sum_{j=l-1}^{H-1} P'_{jpacc}} \right) \quad (3)$$

Формула справедлива для количества слоев H, создающих настил, не превышающий высоту $\lambda/2$. Если толщина настила превышает указанное значение, то второе слагаемое в (3) разбивается на последовательность сумм произведений с пределами вычислений до H. Причём последний член предыдущей суммы произведений будет являться источником излучения для последующей суммы [3]. Естественным ограничением высоты настила является температурный предел оптимального коэффициента трансформации излучающих датчиков акустических колебаний.

3. Влияние основных физико-механических свойств волокон на параметры акустического сигнала. Анализ вышеизложенного позволил автору сделать следующее практическое заключение.

Как правило, канал прозвучивания при непрерывном контроле больших объемов волокна (по способу [2], когда множество волокон с помощью прочеса формируют в равномерную ленту и пропускают через канал, прозвучиваемый акустическими колебаниями) 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. Также просто определяется масса единичного цилиндрического тела. Зная это, определим количество цилиндрических тел в канале:

$$g_c = \pi \left[(a')^2 - (a'')^2 \right] \cdot h \cdot \gamma;$$

$$Q = \frac{G}{g_c}; \qquad H = \frac{Q}{\pi a^2}, \quad (4)$$

где g_c – масса единичного цилиндра;

a' – внешний радиус цилиндра;

a'' – внутренний радиус цилиндра;

γ – удельная масса вещества цилиндра;

G – масса многослойной структуры в канале прозвучивания;

Q – количество цилиндров в канале прозвучивания;

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

Из выражений (4) следует, что количество цилиндров в единице массы находится в обратной квадратичной зависимости от толщины стенок цилиндров.

Одним из основных условий модели объекта является неравенство толщины стенок различных цилиндров. Причем, цилиндры с одинаковой толщиной стенок распределены по всей многослойной структуре случайным образом.

В этом случае выражения (4) приобретут следующий вид:

$$M_g = \pi \left[(a')^2 - M_{a''}{}^2 \right] \cdot h \cdot \gamma; \quad M_Q = \frac{G}{M_g}; \quad M_H = \frac{M_Q}{\pi a^2}, \quad (5)$$

где M_g – математическое ожидание массы единичного цилиндра;

$M_{a''}$ – математическое ожидание внутреннего радиуса единичного цилиндра;

M_Q – математическое ожидание количества цилиндров в канале прозвучивания;

M_H – математическое ожидание количества слоев цилиндров в канале прозвучивания.

И, соответственно, уравнение (3) изменит свою форму:

$$B_{SH} = \prod_{i=1}^{M_H} \left(1 + \frac{P_{i\,pacc}}{P_0 + \sum_{j=i-1}^{M_H-1} P_{j\,pacc}} \right) + \sum_{i=1}^{M_H} \prod_{l=1}^{M_H} \left(1 + \frac{P'_{l\,pacc}}{P_{jomp} + \sum_{j=l-1}^{M_H-1} P'_{j\,pacc}} \right). \quad (6)$$

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. Иначе говоря, «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

$$X = X' + X'' + \sum_{i=1}^{H} d_i' \cdot \sec\alpha_i, \quad (7)$$

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.

С учётом выражений (5), уравнение (7) запишется следующим образом:

$$M_X = X' + X'' + \sum_{i=1}^{M_H} d_i' \cdot \sec\alpha. \quad (8)$$

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, так как с ростом частоты излучаемых колебаний фазовое запаздывание относительно периода колебания при прохождении одного и того же множества цилиндров будет возрастать.

Все вышеизложенное относится к случаю, когда вся система находится в статике. Если из системы цилиндров (волокон) с общей заданной массой сформировать замкнутую ленту, имеющую равномерную поверхностную и объемную плотность по всей длине, и пропустить ее с постоянной скоростью через канал прозвучивания, то, используя этот несложный прием, можно произвести статистическую оценку физико-механических свойств любого разумного множества цилиндров (волокон) [2].

Однако сдвиг системы цилиндров в плоскости, параллельной поверхностям излучающе-воспринимающих датчиков, приводит к росту secα_i и дисперсии σ^2, но так как скорость распространения акустических колебаний на 2-3 порядка превышает скорость смещения ленты, рост углового отклонения и дисперсии будет незначителен. Кроме того, смещение ленты равномерно-прямолинейное, что позволяет корректировать их постоянными коэффициентами.

Если принять систему цилиндров, сформированных в замкнутую ленту, за непрерывный сигнал, а интервал ленты в канале прозвучивания (для дисковых датчиков – 2а) за период сигнала, то, по аналогии с критерием Котельникова-Найквиста, для адекватного преобразования математических ожиданий по множеству (срезов) в математическое ожидание по времени необходимо производить не менее двух отсчётов за период.

Выводы

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

Изменение сигнала имеет прямо пропорциональный характер от количества цилиндров (волокон) при условии d < 0,l λ. При d > 0,l λ зависимость приобретает нелинейный характер.

Количество цилиндров в единице массы находится в обратной квадратичной зависимости от математического ожидания массы единичных цилиндров (от зрелости и, соответственно, механической прочности волокон).

Прозвучивание системы цилиндров для получения однозначных результатов необходимо производить гармоническим сигналом.

Для определения свойств компактного множества цилиндров предпочтительнее выглядят угловые методы измерения.

Определение параметров системы цилиндров амплитудным методом возможно только в статическом режиме (например, способом [3]), так как для достаточно точного определения коэффициентов C_m необходимо решение матриц системы уравнений 50-70-го порядка, что в динамическом режиме в настоящий момент нереально.

Бесконтактное, с помощью акустических колебаний, массоизмерение компактного множества волокон без определения математического ожидания количества волокон в единице массы невозможно.

Практически все потребительски значимые виды волокон растительного и животного происхождения, производимые сельским хозяйством, имеют прямую зависимость физико-механических показателей от массы единичных волокон и, следовательно, могут контролироваться предлагаемым способом.

Библиографический список

1. Костюков А.Ф. Новый способ определения зрелости хлопковых волокон / А.Ф. Костюков. // Текстильная промышленность. – 1979. – № 2.
2. Костюков А.Ф. Способ определения зрелости хлопковых волокон / А.Ф. Костюков // БИ. – 1979. – № 8. – а.с. № 650000.
3. Костюков А.Ф. Способ определения зрелости хлопковых волокон / А.Ф. Костюков, В.А. Козубенко // БИ. – 1980. № 48. – а.с. № 792127.
4. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики / Е.Л. Шендеров. – Л.: Судостроение, 1972.
5. Тюлин В.Н. Введение в теорию излучения и рассеяния звука / В.Н. Тюлин. – М.: Наука, 1976.