

СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В ВОЛОКОННОЙ СРЕДЕ

Ключевые слова: скорость ультразвука, волоконная среда, шаблон, волновое число, линейная плотность, объемная плотность, объем, степень сжатия.

Известно, что ультразвуковые (УЗ) колебания с некоторой скоростью проходят в различных средах [1-3]. Поэтому контрольно-измерительные приборы, которые основаны на скорости распространения УЗ колебаний, находят применение для контроля параметров технологических процессов в сельскохозяйственном производстве. Скорость ультразвука в волоконных средах зависит от объемной плотности материала. Зависимость скорости от плотности материала может быть определена, если известно количество волокна в заданном при прозвучивании объеме. В датчике постоянство объема обеспечивается постоянным поперечным сечением формирующего канала и постоянной длиной прозвучиваемого участка. Но, контролируя ленту в формирующем канале, невозможно установить точно участок продукта, соответствующий каким-то конкретным показаниям. Невозможно также обеспечить повторность измерений, так как изделие может деформироваться, вытягиваться и при этом изменять плотность волокон по сечению продукта.

Для проведения многократных измерений, подтверждения повторяемости результатов изготавливался контрольный образец, представляющий собой отрезок ленты определенной длины и известной массы. С целью сохранения структуры и массы волокна при многократных испытаниях образец размещался в шаблоне, показанном на рисунке 1. Шаблон имеет форму параллелепипеда, боковые стенки 2 и 1 которого выполнены из тонких сеток и стальных пластин соответственно. Одна из сеток может откидываться для замены испытуемых образцов. Выбор размеров стенок 1 и 2 может быть произвольным. Но так как скорость распространения ультразвука зависит от объемной плотно-

сти материала, а характеристикой изделия является линейная плотность, поперечное сечение, которое имеет лента в шаблоне, целесообразно установить таким, чтобы было наиболее просто переводить одни параметры в другие. Поэтому поперечное сечение шаблона выбрано равным 1 см^2 , а размеры сторон, сохраняя естественное соотношение размеров поперечника изделия 2:1, установлены 14,14 мм и 7,07 мм. То есть высота прозвучиваемого слоя $h - 7,07 \text{ мм}$ (размер стороны 1). Для удобства ввода и вывода образца из зоны контроля конструкция закреплена на стержне 3 с поперечными размерами, равными поперечным размерам шаблона. Точная ориентация образца относительно оси УЗ пучка достигается тем, что боковым стенкам 1 придана слегка изогнутая форма.

Скорость ультразвука в волоконной среде наиболее просто измерить фазовым методом. Зная скорость звука в воздухе при нормальных условиях, можно зафиксировать значение фазы сигнала приемника при отсутствии в УЗ пучке материала, а затем, помещая в поле образец с известными параметрами, отмечать сдвиг фазы относительно этого фиксированного значения.

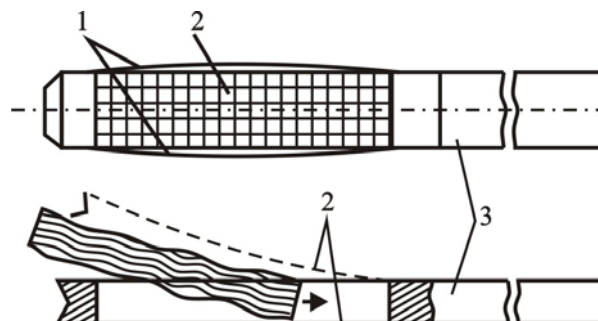


Рис. 1. Шаблоны контрольного образца волоконистой ленты

Блок-схема установки для определения зависимости фазового сдвига от линейной плотности материала изображена на рисунке 2. Выходной сигнал приемного уси-

лителя и сигнал генератора УЗ колебаний подключены ко входам У двухлучевого осциллографа с размером шкалы экрана по горизонтали 160 мм. Длительность развертки устанавливалась при экспериментах такой, чтобы смещение фазы сигнала приемника при данной линейной плотности образца происходило не менее чем на 3/4 шкалы. Цена деления шкалы в таком случае составляла не более 0,5°. Коэффициенты усиления каналов вертикального отклонения выбирались с учетом того, чтобы линии синусоидальных сигналов пересекали горизонтальные линии шкалы под углом, близким к 90°. Ширина луча осциллографа обеспечивала точность отсчета не менее половины деления шкалы. Эти условия обеспечивали погрешность измерения фазы при любой линейной плотности образца не более 0,5% от измеряемого значения. Начальная установка фазы сигнала приемника осуществлялась регуляторами горизонтального смещения лучей осциллографа. Для каждого значения линейной плотности проводилось не менее 10 измерений, по которым рассчитывалось среднее арифметическое значение фазы.

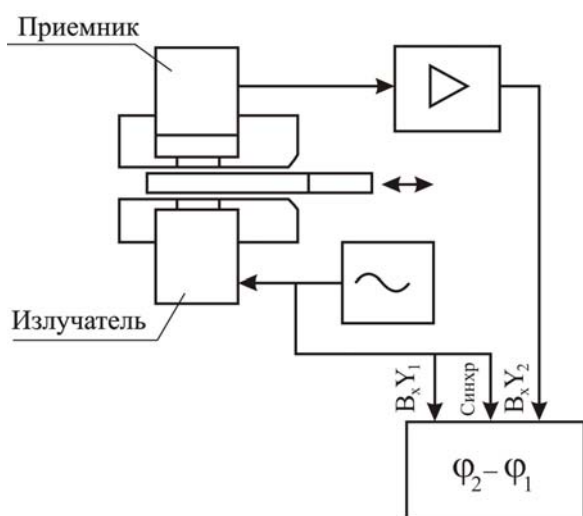


Рис. 2. Блок-схема установки для определения скорости звука в волокнистой массе

Результаты экспериментов представлены в виде графиков, изображенных на рисунке 3. Линия 1 соответствует зависимости фазы от линейной плотности хлопковой ленточной ленты, линия 2 – зависимость для хлопковой чесальной ленты, линия 3 – для лавсановой. Зависимости линейны, а удельный фазовый сдвиг для рассматриваемых материалов составляет 14, 13, 1,07 град/кТекс соответственно.

Очевидно, что графики для хлопколавсановых смесей с любым соотношением компонентов будут находиться в интервале, ограниченном прямыми 1 и 3.

Разность фаз сигналов, определяемая данным методом, равна:

$$\Delta\varphi = k_1 h - kh, \quad (1)$$

где k и k_1 – волновые числа УЗ колебаний в воздухе и в материале соответственно;

h – толщина слоя материала.

Из выражения (1) имеем:

$$k_1 h = \Delta\varphi + kh$$

или с учетом того, что $k = 2\pi f / c$,

$$2\pi fh \frac{1}{c_1} = \Delta\varphi + 2\pi fh \frac{1}{c}. \quad (2)$$

Откуда:

$$c = c \frac{kh}{\Delta\varphi + kh} = c \left(1 + \frac{\Delta\varphi}{kh} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где c – скорость звука в воздухе;

c_1 – скорость звука в волокнистой среде.

Выражение (3) показывает, что скорость звука в волокнистой среде меньше скорости звука в воздухе. Зная фазовый сдвиг, создаваемый контрольным образцом известной линейной плотности, можно вычислить зависимость скорости звука от объемной плотности материала. Зависимость фазы сигнала от линейной плотности образца, полученную по результатам экспериментов, можно записать:

$$\Delta\varphi = \varphi_T \cdot T, \quad (4)$$

где φ_T – удельный фазовый сдвиг.

На основании выражений (3) и (4) получаем:

$$c_1 = c \left(1 + \frac{\varphi_T T}{kh} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Соотношение между объемной ρ_v и линейной плотностью T образца, находящегося в шаблоне, легко получить, если учесть, что 1 кТекс численно равен 1 г/м. При длине контролируемого участка в 1 см прозвучиваемый объем составит 1 см³, а соотношение запишется следующим образом:

$$\rho_v = 10^{-2} T. \quad (6)$$

Здесь единица измерения линейной плотности T – кТекс.

Для номинальной линейной плотности $T = 4$ кТекс, например, объемная плотность составит $\rho_v = 40$ мг/см³.

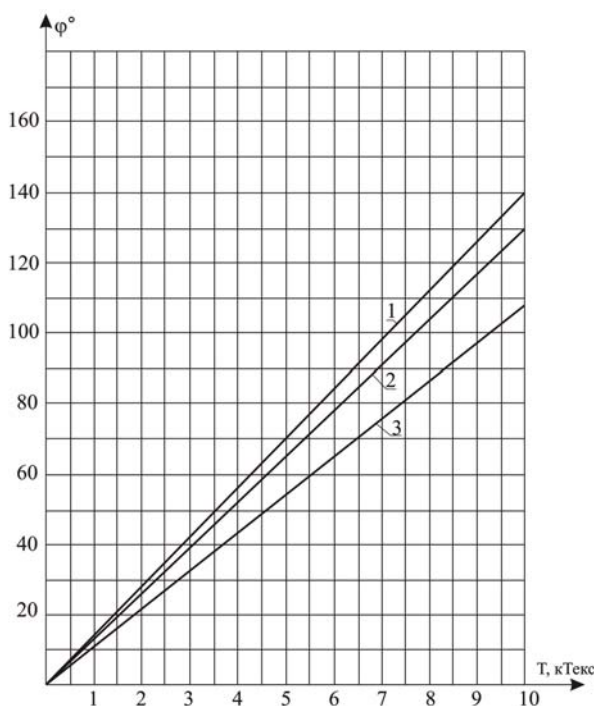


Рис. 3. Зависимость фазы сигнала приемника от линейной плотности волоконистой ленты

Зависимость скорости звука от плотности материала представлена в виде графиков, изображенных на рисунке 4. Ось абсцисс показана в масштабах линейной и объемной плотностей.

В результате экспериментальных исследований установлено также, что при сжатии контрольного образца в направлении прозвучивания фаза принятого сигнала остается постоянной, т.е. в условиях постоянства массы образца фаза прошедшей волны зависит только от количества волокна в столбце прозвучиваемого материала и не зависит от высоты этого столбца. Поэтому точность измерения фазы УЗ колебаний не зависит от деформации продукта в направлении распространения волны, а также от характера распределения волоконной структуры вдоль данного направления.

Так как фаза при уменьшении объема, занимаемого волокном, остается постоянной, а длина пути, который проходит звук в среде, уменьшается, то, соответственно, снижается скорость звука. Нерегулярность волоконной структуры можно рассматривать с точки зрения неравномерности сжатия материала в занимаемом объеме и, вследствие этого, становится целесообразным введение в расчетные соотношения для скорости звука параметра, характеризующего степень сжатия волокна.

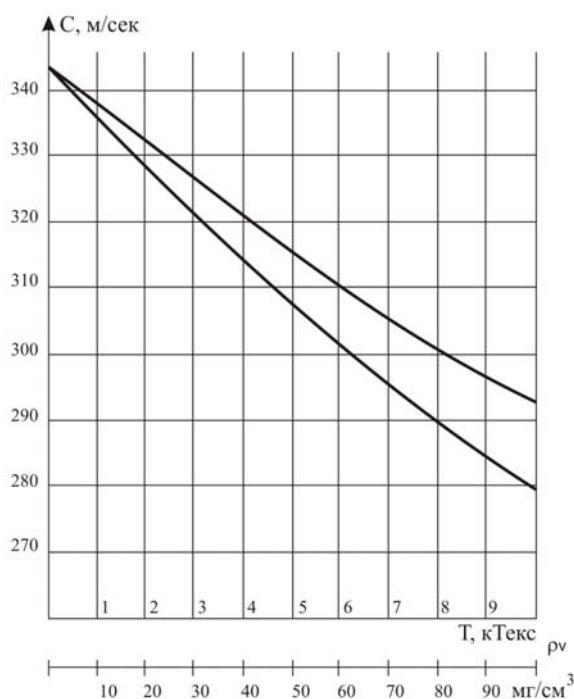


Рис. 4. Зависимости скорости звука от плотности материала:

- 1 – для чистого хлопка ленточных лент;
- 2 – для чистого лавсана чесальных лент

Из условия постоянства фазы волны, прошедшей слой материала, и на основании выражения (1) можно записать:

$$k_c h_c - k h_c = k_1 h - k h \quad (7)$$

где k_c – волновое число для сжатой среды;

h_c – толщина сжатого слоя волокна.

Введя обозначение $\varphi = h / h_c$ – степень сжатия материала и на основании выражения (7) найдем:

$$\frac{I}{c_c} - \frac{I}{c} = \varphi \left(\frac{I}{c_1} - \frac{I}{c} \right) \quad (8)$$

Отсюда:

$$c_c = \frac{c_1 \times c}{\varphi(c - c_1) - c_1} = c \left| \varphi \left(\frac{c}{c_1} - 1 \right) + 1 \right|^{-1} \quad (9)$$

Так как φ численно равно изменению объема, занимаемого волокном:

$$\varphi = \frac{V}{V_c}$$

где V и V_c – объемы до и после сжатия, то оно показывает, соответственно, и изменение объемной плотности материала:

$$\varphi = \frac{\rho_{vc}}{\rho_v}$$

Поэтому выражение (9) позволяет определять скорость звука, а следовательно, и фазу колебаний на любом участке прозвучиваемой поверхности материала, зная параметры распределения волокна в зоне контроля и скорость звука, измеренную для одного значения линейной плотности образца (например, номинального).

Библиографический список

1. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. – М.: ИИЛ, 1957. – 726 с.

2. Иливанов В.М. Исследование распространения акустических волн в твердых телах и воздушных средах: монография / В.М. Иливанов, Ю.В. Кандрин, В.А. Цымбалист. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2003. – 127 с.

3. Воробьев Н.П. Акустический контроль параметров технологических процессов: монография / Н.П. Воробьев [и др.]; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2010. – 266 с.

