

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОКОННОГО СЫРЬЯ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА

А.Ф. Костюков

В статье дается описание лабораторных установок и основных экспериментальных зависимостей, позволяющих реализовать метод статистического экспресс-контроля параметров волокон растительного и животного происхождения.

Ключевые слова: волокна, ультразвук, лабораторный экспресс-контроль, модель, экспериментальные зависимости.

Для оценки принципиальной возможности ультразвукового метода контроля технологических параметров волокон растительного и животного происхождения была разработана математическая модель взаимодействия фронта акустической волны с волокнистым множеством [1], из которой вытекают следующие выводы:

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

- 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. (здесь d – диаметр цилиндра, λ – длина волны ультразвукового колебания).

- для получения однозначных результатов контроля фазовым способом необходимо обеспечивать постоянную объемную плотность (постоянную массу образца в заданном объеме – кг/м³) волокнистого множества в зоне контроля.

- при неизменной поверхностной плотности образца (кг/м²) колебания объемной плотности образца (кг/м³) в зоне контроля для амплитуды сигнала не критично, вследствие незначительности приращения пути распространения сигнала (не более $\lambda/2$), т.к. 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 и количества волокон в навеске (по функциональной зависимости «сигнал – количество волокон») позволяет контролировать средние значения линейной плотности, тонины и разрывной прочности волокон.

- для определения свойств упорядоченного множества волокон предпочтительнее выглядят фазовые методы измерения;

- прозвучивание системы цилиндров, для получения однозначных результатов, необходимо 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 [2,3];

- 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.

Целью исследования является экспериментальное установление возможности контроля основных технологических параметров волокон с помощью ультразвука.

Задачами исследования являются:

- проверка сохранения волновых соотношений ультразвукового сигнала после прохождения волокнистого образца (если соотношения не сохраняются, то это означает, что эффекты множественных отражений и рассеяний сигнала на волокнах внутри образца делают невозможным регистрацию полезного сигнала);

КОСТЮКОВ А.Ф.

- 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;
- проверка явления квазидисперсии скорости ультразвука в волокнистом образце, позволяющее создать инструмент кон-

троля количества волокон в направлении распространения сигнала.

Для проверки перечисленных положений было разработано координатно-верньерное устройство (рисунок 1) и оригинальный усилительно-селектирующий блок (на заднем плане над измерителем фаз). Вращением винта сближали приемный датчик с излучающим сжимая закрепленными на датчиках пластинами образец. Отсчет деления 20 мкм. Изменение акустического сигнала в характерных точках мерной базы занесены в таблицу 1.

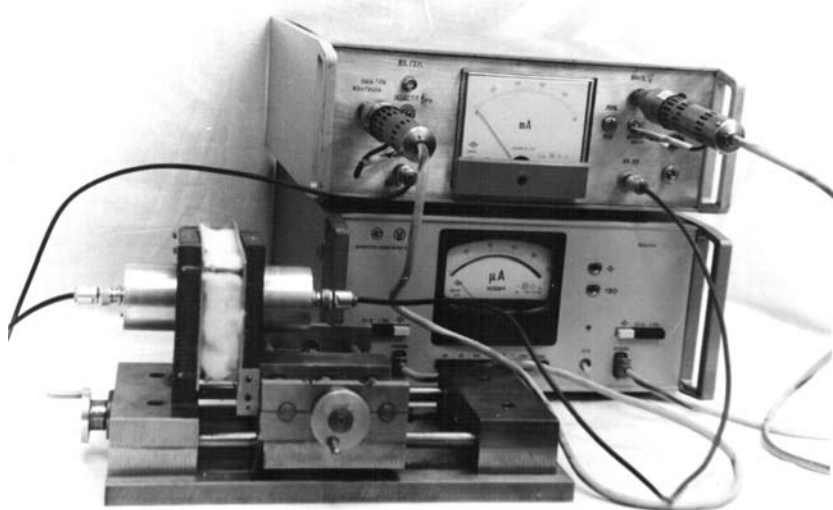


Рисунок 1 - Экспериментальная установка

С помощью поперечного микрометрического винта устанавливали приемный датчик на линию главного максимума диаграммы направленности излучающего датчика.

С помощью продольного микрометрического винта отгоняли каретку до упора в брус и помещали между сетчатыми пластинами образец, сближения производился по мерной линейке, с миллиметровыми делениями и

нониусу микрометрического винта, с ценой деления 20 мкм. Данные Таблицы 1 убедительно показывают сохранение всех волновых соотношений сигнала после прохождения волокнистого образца. Сжатие образца, т. е. изменение его объемной плотности, практически не сказывается на амплитуде сигнала, что соответствует выводу, полученному при анализе математической модели [1].

Таблица 1 - Амплитуда сигнала при уменьшении мерной базы

Расст. в мм	71,4	68,4	66,4	64,4	61,4	58,4	56,4	53,4	51,4
Сигн, вольт	0,48	0,03	0,48	0,03	0,48	0,04	0,48	0,04	0,50
Расст. в мм	48,4	46,4	43,4	41,4	38,4	36,4	33,4	31,4	
Сигн, вольт	0,04	0,50	0,04	0,52	0,04	0,59	0,05	0,60	

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОКОННОГО СЫРЬЯ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА

Поскольку основной мерой, определяющей изменение сигнала, является количество волокон в направлении распространения фронта ультразвуковой волны, то возникает необходимость в использовании, в качестве контролируемого параметра, не массовые единицы – поверхностная плотность ($\text{кг}/\text{м}^2$) и объемная плотность ($\text{кг}/\text{м}^3$), а количественные меры – поверхностная количественная плотность ($1/\text{м}^2$) и объемная количественная плотность ($1/\text{м}^3$).

В качестве объекта исследования было взято короткое элементарное волокно льна-кудряша.

Для определения воздействия поверхностной количественной плотности волокон

Таблица 2 - Влияние поверхностной плотности на фазу сигнала

K_p	$11.4 \cdot 10^6$			$44.9 \cdot 10^6$			$65.3 \cdot 10^6$			$93.8 \cdot 10^6$		
L	мак	мин	мак	мак	мин	мак	мак	мин	мак	мак	мин	мак
	69.7	66.3	64.7	69.6	66.1	64.6	69.4	66.1	64.4	69.3	66.8	64.3
U	2.00	1.24	2.00	1.60	0.90	1.60	1.45	0.61	1.45	0.78	0.04	0.79
λ	5.0 мм			5.0 мм			5.0 мм			5.0 мм		

Данные таблицы 2 четко отображают сдвиг узлов и пучностей стоячей волны по мере роста количества волокон в направлении излучающего датчика, что полностью соответствует выводам теоретической модели [1] о наличии явления квазидисперсии скорости ультразвука в волокнистом образце. Изменения длины волны, при этом, не наблюдались.

Таким образом, в основу фазового метода положено явление квазидисперсии скорости ультразвука в контролируемом образце, когда при наращивании количества волокон в образце в направлении зондирования, первая пучность стоячей волны, непосредственно после образца, со стороны приемного датчика, смещается в направление излучателя, создавая иллюзию дисперсии (рассеяния) скорости ультразвука в образце (как известно, $c=f \lambda$, где c – скорость распространения ультразвука в среде, f – частота излучаемых колебаний, λ – длина волны колебаний, а т.к. f и λ жестко задаются излучателем, то изменяться может только скорость распространения колебаний, что невозможно в принципе, т.к. сигнал проходит в той же воздушной среде, что и вне образца и эффект возникает вследствие того, что ультразвук распростра-

на колебательный сигнал, между датчиками помещали постепенно наращиваемый пакет прочесанных слоев волокнистого эталона. После каждого добавления очередного слоя в образец, производилось сближение датчиков, аналогичное ранее описанному. Объем, занимаемый образцом, при каждом добавлении слоя поддерживался неизменным.

Частичные результаты замеров, на интервале одного периода стоячей волны, занесены в таблицу 2

где K_p – количественная поверхностная плотность $1/\text{м}^2$,

L – длина базы измерения мм, λ – длина волны мм,

U – величина сигнала Вольт.

няется в образце не прямолинейно, а зигзагообразно за счет дифракционного огибания волокон);

Фиксация квазидисперсии возможна двумя способами: а) изменением мерной базы и ее регистрацией; б) изменением частоты излучаемых колебаний, когда при неподвижных датчиках и образце, пучность в заданной точке возникает с помощью подбора длины волны и, в этом случае, о значении сигнала судят по величине отклонения зондирующих колебаний от исходного значения частоты.

Практическое подтверждение явления квазидисперсии дает возможность регистрировать количественную поверхностную плотность волокнистого образца в направлении прозвучивания по изменению базы измерения ближайшей к образцу пучности прошедшего колебания, т.е. подстройкой расположения приемного датчика [2], либо подстройкой частоты излучаемых колебаний (при неизменной базе измерения), добиваясь, тем самым, пучности колебаний в точке измерения [3]. Наличие явления квазидисперсии позволяет значительно повысить разрешающую способность и точность контроля и предопределяет фазовый метод как основной инструмент контроля. На основе выводов теоретической модели и полученных экспери-

ментальных материалов было разработано экспериментальное устройство «Звук» (рисунок 2) оперативного контроля параметров волокнистых материалов, сельскохозяйственного происхождения (лен, шерсть, хлопок, пенька, козий пух и др.) производимых для предприятий текстильной промышленности.

Предлагаемый метод позволяет произвести контроль нескольких десятков образцов в час, что дает возможность оценивать требуемый параметр статистически. Устройство позволяет оценивать качество волокон с применением статистической обработки результатов контроля как на конечном этапе производства (перед и после сбора урожая), так и на промежуточных этапах созревания волокон, что существенно может повысить качество агротехнических работ и культуры животноводства. Экспериментально устанавливались не только зависимости «сигнал – разрывная прочность», и «сигнал – линейная плотность», но и оценивалось влияние дестабилизирующих факторов – температуры, относительной влажности и барометрического давления окружающей среды – на результаты контроля. Для этого был проведен четырехфакторный пассивный эксперимент ПФЭ 24 с образцами волокон льна, козьего пуха и хлопка. По алгоритму Йейтса было составлено уравнение регрессии для каждого вида волокна. В качестве исследуемых факторов были приняты: зрелость волокон, которая была выражена через разрывную прочность (X_1), влажность окружающей среды (X_2), температура окружающей среды (X_3), барометрическое давление (X_4). Для тонковолокнистого селекционного сорта хлопка «5904» размах указанных статистически обработанных параметров составил: $X_1 = 41 \frac{\text{мН}}{\text{вол}}$

$X_2 = 53 \frac{\text{г}}{\text{м}^2} 62 \%$, $X_3 = 22,5 \frac{\text{г}}{\text{м}^3} 26,5$
°С, $X_4 = 984 \frac{\text{мм}}{\text{Па}} 1011 \text{ кПа}$. Подготавливалось по 10 образцов каждого промышленного сорта. Измерение каждого образца производилось восьмикратно, каждый раз с новой ориентацией прочеса в плоскости, перпендикулярной направлению прозвучивания. Полное уравнение регрессии, в этом случае, имеет вид: $Y = 21,53 + 2,31X_1 + 1,22X_2 + 0,41X_1X_2 + 2,67X_3 + 0,59X_1X_3 + 0,09X_2X_3 + 0,17X_1X_2X_3 + 1,8X_4 + 0,32X_1X_4 + 0,12X_2X_4 + 0,07X_1X_2X_4 + 0,23X_3X_4 + 0,18X_1X_3X_4 + 0,15X_2X_3X_4 +$

$0,06X_1X_2X_3X_4$. Как видно из уравнения регрессии, сигнал находится в линейной зависимости от всех значимых факторов. Все межфакторные взаимодействия не значимы. Уравнения регрессии для льна и пуха имеют следующий вид: лен: $Y = 11,32 + 2,72X_1 + 1,74X_2 + 3,02X_3 + 1,95X_4$.

пух: $Y = 16,85 + 3,24X_1 + 1,68X_2 + 3,21X_3 + 2,05X_4$

Значимость климатических факторов сравнима со значимостью измеряемого параметра, что требует принятия специальных мер по их нейтрализации. С этой целью оценка значений сигнала производилась в относительных единицах – или по отношению измеренного сигнала к сигналу прошедшему через эталонный образец, или по отношению сигналов, прошедших через измеряемый образец на двух монохроматических частотах.

Малый объем статьи не позволяет изложить основные функциональные зависимости наиболее распространенных волокнистых материалов при их контроле на устройстве «Звук», поэтому ограничимся только описанием общих соотношений.

Экспериментально подтверждено, что:

- волновые соотношения ультразвукового сигнала после прохождения волокнистого образца сохраняются, т.е. наличествует, например, такое явление как стоячая волна (если бы соотношения не сохранялись, то это означало бы, что эффекты множественных отражений и рассеяний сигнала на волокнах внутри образца делают невозможным регистрацию полезного сигнала), причем, полезный волновой сигнал не превышает 3 - 10% от общей величины прошедшего на приемник сигнала, т.е. шум, вызванный дифракцией и множественными межволоконными отражениями составляет около 90%;

- экспериментально подтверждено расширение диаграммы направленности после прохождения ультразвуковых колебаний через образец – амплитуда сигнала на краях диаграммы (без образца), после помещения между датчиками волокна, в тех же точках замера, возрастает вдвое;

- изменение амплитуды сигнала от величины поверхностной количественной плотности образца носит выражено нелинейный характер;

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВОЛОКОННОГО СЫРЬЯ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКА



Рисунок 2 - Устройство «Звук»

- использование в качестве инструмента контроля амплитуды сигнала имеет то преимущество, что амплитуда сигнала, в данном случае, не зависит от климатических факторов (температуры, относительной влажности, барометрического давления);

- достоинством амплитудного метода является независимость величины сигнала от объемной количественной плотности образца;

- серьезным недостатком амплитудного метода является низкая точность, вызванная существенной нелинейностью функциональной зависимости «сигнал – количественная плотность», а также большими сложностями точного подсчета значения сигнала в точке характеристики, т.к. такие подсчеты определяются порядком вероятностной цепи Маркова, т.е. если контролируемый образец имеет 50 – 100 однорядных слоев прочеса, то точное значение сигнала может быть определено соответственно матрицей 50 – 100-го порядка, что требует соответствующего времени;

- изменение фазового сигнала от величины поверхностной количественной плотности образца носит линейный характер;

- использование в качестве инструмента контроля фазы сигнала осложняется ее зависимостью от климатических факторов, воздействие которых соизмеримо с величиной полезного сигнала, т.е. контроль возможен только с помощью относительных единиц (например, относительно эталонного образца или какой-либо другой «опорной» величины);

- другим недостатком фазового метода является зависимость сигнала от объемной количественной плотности образца, т.е. при контроле образец должен иметь постоянную объемную плотность независимо от его поверхностной количественной плотности, что технически вполне реализуемо;

- экспериментально подтверждено для различных видов волокон, что при макси-

мальном изменении контролируемого параметра фазовый сдвиг ультразвукового сигнала не превышает 180° , т.е. при использовании частотного метода контроля, изменение частоты излучаемых колебаний, для получения пучности на приемном датчике, не может быть более одной октавы;

На основании изложенного можно сделать вывод о реальности и перспективности предлагаемого метода контроля параметров волокнистых материалов, позволяющего использовать для оценки волокна приемы статистического анализа, и, таким образом, уйти от повсеместно применяемого органолептического контроля, недостоверность и субъективность которого общеизвестны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костюков, А. Ф. Модель регистрации признаков многослойной структуры с помощью акустических колебаний/ А.Ф. Костюков // Вестник АГАУ – Барнаул: Издательство АГАУ, 2010 - № 3
2. Патент 2380697 Российская Федерация, МПК⁷ G01N29/00. Способ контроля средних параметров компактного множества волокон./ Заявитель и патентообладатель Костюков А.Ф.
3. 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, тел.: 8(3852) 62-84-49, E-mail: kostjukovaf@mail.ru