

На правах рукописи



**Костюков Анатолий Федорович**

**МЕТОД УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО ВОЛОКОННОГО СЫРЬЯ**

Специальность 05. 20. 02 – Электротехнологии  
и электрооборудование в сельском хозяйстве

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Барнаул – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова»

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор Никольский Олег Константинович (ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова»)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Худонов Анатолий Михайлович (ГОУ ВПО «Иркутский государственный университет путей сообщения»);  
кандидат технических наук, доцент Меновщиков Юрий Александрович (ФГОУ ВПО «Новосибирский государственный аграрный университет»);

Ведущая организация: ГНУ Научно-исследовательский институт садоводства Сибири им. М.А. Лисавенко Сибирского отделения РАСХН

Защита диссертации состоится «30» марта 2012 года в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д 212.004.02 при ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, факс (8–3852) 36–71–29. <http://www.altstu.ru>, e-mail: elnis@inbox.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного технического университета им. И. И. Ползунова.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенные печатью Вашего учреждения просим направлять в адрес ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «29» февраля 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д. т. н., профессор



Л. В. Куликова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одной из важнейших задач сельскохозяйственного производства является обеспечение текстильной промышленности отечественной сырьевой базой, ликвидация зависимости от хлопкосеющих стран. Наиболее перспективным в этом направлении представляется использование волоконного сырья – льна-долгунца, ненаркотической конопли и т.д. Целевой программой МСХ РФ «Развитие льняного комплекса России на 2008-2010 годы» предусматривается существенное увеличение валового сбора льноволокна и обеспечение его урожайности до 9,2ц/га.

Повышение эффективности производства льнопродукции и снижение её себестоимости можно достичь не только с помощью модернизации уборочного цикла и применения современных технических средств, но и путем совершенствования системы контроля качества растительного сырья.

В настоящее время качество продукции текстильных предприятий формируется на основе сортировок сырья, когда в исходное волокно, например, отборного или первого промышленного сорта добавляется строго дозированное количество волокна более низких сортов. Использование такой технологии переработки волоконного сырья предполагает наличие эффективного способа контроля качества продукции.

Однако существующие методы оценки и контроля физико-механических и метрологических параметров исходного сырья не позволяют с необходимой точностью формировать требуемые сортировки и на этой основе оптимизировать выпускаемый продукт по стоимости и потребительским свойствам (прочности, растяжимости, проницаемости, сминаемости, окрашиваемости и т.д.).

Представляется наиболее перспективным применение известной технологии неразрушающего контроля качества материалов и адаптации этой технологии для получения объективной оценки свойств и количественных характеристик волоконного сырья.

Работа выполнена в соответствии с Государственной программой «Развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2008-2012 годы» и «Концепцией обеспечения предприятий льняного комплекса техникой и технологическим оборудованием по выращиванию, уборки льна и его глубокой переработке на 2008-2012 годы и на период до 2020 года», утвержденной МСХ РФ в 2008г.

**Целью работы** является повышение качества сельскохозяйственного волоконного сырья для текстильной промышленности, путём разработки и использования системы УЗ-контроля и Оценки физико-механических, метрологических параметров льна, ненаркотической конопли и др. волокон растительного происхождения.

**Идея** новой технологии оценки качества волокна заключается в нахождении инструмента контроля, с помощью которого в заданной массе сырья регистрируется количество волокон и по нему определяется их вес, зрелость, разрывная прочность, линейной плотность.

### **Задачи исследования:**

1. Анализ методов и средств контроля физико-механических и метрологических параметров волоконного сырья, используемого в текстильной промышленности.

2. Разработка математической модели процесса взаимодействия ультразвуковой волны с волоконной массой.

3. Обоснование метода ультразвукового контроля параметров волоконного сырья.

4. Разработка ультразвукового устройства оперативного контроля параметров волоконного сырья.

5. Экспериментальные исследования, производственные испытания и оценка технико-экономической эффективности устройств ультразвукового контроля качества волоконного сырья.

**Объект исследования.** Методы и средства контроля параметров сельскохозяйственного волоконного сырья.

**Предмет исследования.** Процессы взаимодействия ультразвукового сигнала с массой волоконного сырья растительного происхождения.

**Методы исследования.** Теория линейной и нелинейной акустики, методы неразрушающего контроля материалов, теория многофакторного анализа, теоретические основы электротехники, теория вероятностей и математическая статистика, теория систем.

### **Научная новизна исследований:**

- математическая модель процесса распространения ультразвуковых колебаний в массе волоконного сырья;

- метод ультразвукового контроля физико-механических и метрологических параметров волоконного сырья (патенты РФ №№ 2367947, 2398224, 2398697, 2418296, 2418297).

### **Практическая значимость работы:**

- методика расчета и результаты экспериментальных исследований ультразвукового устройства оперативного контроля параметров волоконного сырья;

- аппаратная реализация новой технологии контроля и оценки качества волоконного сырья для текстильной промышленности.

**Реализация результатов работы.** Ультразвуковое устройство контроля параметров сельскохозяйственных волокон (УЗКВ) прошло производственные испытания в сырьевой лаборатории ЗАО БМК «Меланжист Алтай».

Методические рекомендации «Ультразвуковой контроль качества сельскохозяйственного волоконного сырья льна-долгунца» одобрены Главным управлением сельского хозяйства Алтайского края и рекомендованы к использованию на перерабатывающих предприятиях региона.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод ультразвукового контроля метрологических параметров волокна.

2. Математическая модель взаимодействия ультразвуковой волны с волоконной массой, представленной в виде вероятностной многослойной дифракционной решетки.

3. Комплекс экспериментального оборудования, результаты лабораторных исследований и производственных испытаний новой технологии контроля и оценки качества волоконного сырья.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: V Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству» (АГАУ, Барнаул, март 2010 г.); VI Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – сельскому хозяйству» (АГАУ, Барнаул, февраль 2011 г.); V Всероссийской научно-практической конференции «Аграрная наука в XXI веке: проблемы и перспективы» (Саратовский ГАУ им. И.И. Вавилова, Саратов, март 2011 г.); II Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы энергетики АПК» (Саратовский ГАУ им. И.И. Вавилова Саратов, апрель 2011 г.); VIII Международной научной конференции «Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК» (Брянская ГСХА, Брянск, март 2011 г.); Международной научно-практической конференции «Аграрная наука – основа инновационного развития АПК» (Курганская ГСХА им.Т.С. Мальцева, Курган, апрель 2011 г.); Международной научно-практической конференции «Современные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции» (Сибирский Университет потребительской кооперации и Сибирское региональное отделение Российской академии сельскохозяйственных наук, Новосибирск, апрель 2011 г.); II Международной научно-практической конференции «Электроэнергетика в сельском хозяйстве» (АлтГТУ, Барнаул, июнь 2011г.); IV региональном научно-производственном семинаре «Чтения И.П. Терских», сентябрь 2011г., г. Иркутск, VII Международной конф. «Аграрная наука – сельскому хозяйству» - Барнаул: АГАУ, .февраль, 2012г.

**Публикации.** Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 21 печатных работах, в том числе: 6 работах в изданиях, рекомендованных ВАК, и 5 патентах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения, содержит 25 рисунков, 7 таблиц. Общий объем работы – 120 страниц. Библиографический список включает 118 источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, определены цель и задачи исследования, изложены основные положения, выносимые на защиту, дана общая характеристика работы.

**Первая глава** посвящена анализу и сравнительной оценке существующих способов измерения и контроля основных метрологических параметров сельскохозяйственного волоконного сырья растительного происхождения.

В настоящее время существует сырьевая зависимость России от хлопкосеющих стран. Сельскохозяйственная отрасль поставляет текстильной промышленности волоконное сырьё, как правило, низкого качества (обеспеченность качественным сырьём не превышает 40%).

Сельскохозяйственное волоконное сырьё в своей массе (множестве волокон) обладает типично анитропными свойствами по степени созревания вследствие существенных отличий почв, освещенности, места произрастания, сроков посева, уборки и других факторов. Поэтому объективные

контролируемые параметры в пределах партии волокна могут быть получены лишь статистически. Тогда, на основе метрологических показателей, данная селекционная партия волокна может быть отнесена к тому или иному промышленному сорту. Ошибка в оценке на одну единицу градации промышленного сорта дает расхождение стоимости партии волокна в 10 – 30%. В случае завышения сортности ущерб несет покупатель партии волокна, а в случае заниженной оценки – продавец.

Известные динамометрический и полярографический методы контроля могут использоваться лишь в арбитражных случаях между поставщиком и покупателем сырья вследствие его высокой трудоемкости и длительности анализа (от 3 до 8 часов на один образец массой 40 мг). Количество образцов, взятых из кипы 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%. Полученные таким образом метрические градации свойств волокна (зрелость, разрывная прочность, и т.д.) не могут быть использованы указанным способом для контроля качества волокон всей партии. Из-за невозможности получения объективных данных для оценки качества сырья в настоящее время в текстильной промышленности контроль волокна проводится, обычно, органолептически.

Исследования, проведенные Г.Н.Кукиным, А.Н.Соловьевым, И.И.Перепечко, С.С.Ивановым, Е.Г.Эйгес, Л.П.Ладыниной, В.В. Клюевым, П.Н. Бобровым, М. Магитт, К. Эсау, показали принципиальную возможность создания устройств контроля качества волокна с использованием инфракрасного, ультрафиолетового и видимого СВЧ-излучения, акустического прозвучивания, пневматического воздействия.

Однако перечисленные способы имеют ряд существенных недостатков: низкая статистическая точность полученных результатов, трудоемкость, высокая стоимость используемой аппаратуры, привлечение высококвалифицированного персонала.

Проведенный в диссертации анализ работ показал, что вопросы контроля и оценки качества волоконных масс сельскохозяйственного сырья не достаточно полно отражены в отечественных и зарубежных публикациях.

Выполненные нами исследования позволили установить, что одним из наиболее перспективных способов повышения контроля и оценки качества волоконного сырья для текстильной промышленности является ультразвуковой неразрушающий метод диагностики. Суть этого метода заключается в том, что при прохождении УЗ-волны через многослойный волоконный образец происходит модификация акустического сигнала: амплитуда меняется вследствие отражения и рассеяния волны от излучателя к приемнику; изменение фазы вызывается дифракцией и величина её искажения зависит от количества волокон в образце.

Высокая поглощающая способность ультразвука волоконными массами позволяет значительно повысить разрешающую способность контроля. Проникающий ультразвук малой мощности дает возможность исследовать внутреннюю структуру волоконной массы, не воздействуя на нее активно, т.е. не разрушая целостность волокон. Поэтому при использовании неразрушающего проникающего маломощного акустического излучения

появляется возможность количественно оценить свойства волоконной массы, что, в свою очередь позволяет определить средний вес отдельных единичных волокон.

**Во второй главе** приведены разработанные автором физическая и математическая модели для обоснования требований к ультразвуковому устройству контроля параметров волокна.

В качестве физической модели принят равномерный многослойный прочёс волоконной массы, представленный в виде цилиндров, имеющих одинаковую длину и внешний диаметр. Толщина стенок цилиндров различна, в зависимости от зрелости волокон. Волокна одинаковой зрелости распределены по волоконной массе случайным образом.

Введено допущение о том, что плотность вещества волокон на четыре порядка превышает плотность окружающей воздушной среды, а скорость распространения ультразвуковых колебаний в веществе волокна в пять раз выше, чем в газовой среде. Тогда, волокна в данной среде для акустических колебаний будут представлять собой абсолютно жесткие тела (угол Брюстера не превышает  $0,2^\circ$ - $0,3^\circ$ ). Поэтому, распространение акустических колебаний через слой волокон будет происходить только за счёт дифракции (огибания). Исходя из этого, один слой прочеса волокна можно рассматривать как дифракционную решетку.

Показано, что, на основании теории группового излучения и принципа Гюйгенса, однослойная дифракционная решётка представляется как излучатель плоской монохроматической волны. Это положение справедливо и для ближней зоны излучения, т.е. фронт волны, прошедшей первый слой прочеса, представляется как результат действия группы неидентичных, равномерно распределенных синфазных излучателей, суммарное излучение которых определяется волновыми соотношениями между элементарными источниками (межволоконными промежутками). В этом случае, многослойный прочёс волокон можно также изобразить в виде многослойной дифракционной решетки. Поскольку при прохождении каждого последующего слоя физическая модель не меняется, можно считать, что фазовые искажения сигнала, прошедшего многослойный образец, будут ничтожны.

Как видно из рисунка 1, основной поток ультразвукового излучения, прошедшего в приемник, представляет собой «шум», вызванный множественными отражениями и наложениями ультразвуковых волн от волокон-цилиндров. Векторы прямого излучения  $S_1, S_2, S_3$  и др. доходят только до второго-третьего слоя волокон-цилиндров  $d_1 \div d_7$  и превращаются в отраженные. Сохранение волновых соотношений в проходящем акустическом сигнале возможно только при соблюдении полуволновых расстояний между волокнами-цилиндрами. Таким образом, приемника достигает только малая часть ультразвуковых колебаний, сохранивших волновые соотношения и несущих информацию. Как показано на рисунке 2, эти колебания касательно огибают волокна-цилиндры из-за возникающей дифракции.

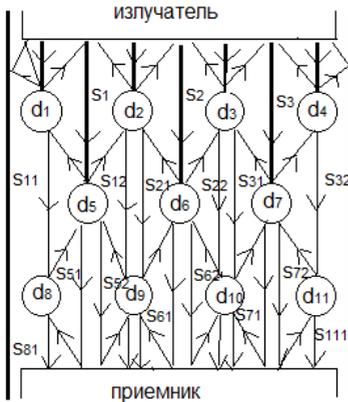


Рисунок 1. Схема отражений и наложений УЗ-сигнала в волоконной массе

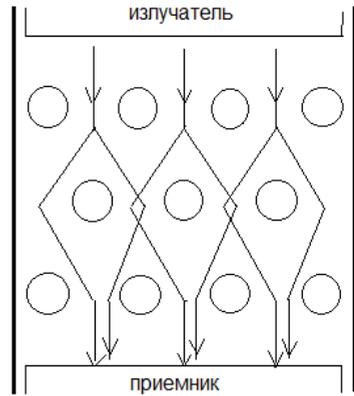


Рисунок 2. Схема прохождения УЗ-сигнала через волоконную массу

Как правило, применяемый канал прозвучивания имеет простую геометрическую конфигурацию (цилиндр или куб в случае дисковых или прямоугольных датчиков), что позволяет легко определять объем и массу многослойной структуры. Аналогично может быть определена средняя масса единичного волокна. Учитывая это, может быть найдено количество волокон в канале:

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

где  $g_c$  - масса единичного волокна,  $a$  - радиус канала прозвучивания с дисковыми датчиками,  $a'$  - внешний радиус волокна,  $a''$  - радиус пустотного канала волокна,  $\gamma$  - удельная масса вещества волокна,  $h$  - средняя длина единичного волокна,  $G$  - масса многослойной структуры в канале прозвучивания,  $Q$  - количество волокон в канале прозвучивания,  $H$  - количество слоев волокон в канале прозвучивания (при дисковых датчиках).

Одним из основных условий построения модели является учет неравенства массы различных волокон, обусловленное их различной зрелостью. Необходимо учитывать также, что волокна с одинаковой массой (одинаковой зрелости) распределены по всей многослойной структуре случайным образом.

В этом случае выражения (1) приобретают следующий вид

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

где  $M_g$ ,  $M_a$ ,  $M_Q$  и  $M_H$  - соответственно математические ожидания массы единичного волокна, толщины его стенки, количества волокон в канале прозвучивания, количества слоев волокон в нём.

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

$$B_{SH} = \prod_{i=1}^{M_H} \left( 1 + \frac{P_{i\text{ pacc}}}{P_0 + \sum_{j=i-1}^{M_H-1} P_{j\text{ pacc}}} \right) + \sum_{i=1}^{M_H} \prod_{l=1}^{M_H} \left( 1 + \frac{P'_{l\text{ pacc}}}{P_{j\text{ omp}} + \sum_{j=l-1}^{M_H-1} P'_{j\text{ pacc}}} \right) \quad (3)$$

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

где  $B_{SH}$  – вероятностный коэффициент прохождения,  $P_0$ ,  $P_{\text{pacc}}$ ,  $P'_{\text{pacc}}$  и  $P_{\text{otr}}$  – соответственно амплитуды давления падающей, рассеянной, противодавления рассеянной и отраженной волн,  $k$  – волновой коэффициент,  $2N+1$  – число волокон в слое,  $m$  – целочисленный номер отражающего волокна,  $l$  – целочисленный номер слоя волокна,  $L=2dN$  – площадь облучаемой поверхности волокон решетки,  $R_0$  – расстояние от плоскости решетки до точки наблюдения (приема),  $C_m$  – коэффициенты, учитывающие возможные взаимодействия между волокнами в результате множественных отражений,  $\theta$  – угол к нормали на плоскость решетки, под которым падает акустическая волна.

Из выражений (3) следует, что амплитуда сигнала, прошедшего через исследуемый образец, находится в выраженной нелинейной (экспоненциальной) зависимости от количества волокон на пути распространения ультразвуковой волны.

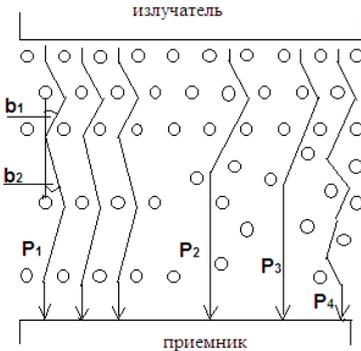


Рисунок 3 – Модель влияния поверхностной и объемной плотностей волоконной массы на амплитуду и фазу УЗ-сигнала  
здесь  $b_1$  и  $b_2$  – углы дифракционного отклонения УЗ-волны соответственно при высокой и низкой объемной плотности волокон в образце,  $P_1, P_2, P_3, P_4$  – векторы амплитуды УЗ-давления.

Представим, с этих позиций, влияние волоконной массы на фазу ультразвукового сигнала, прошедшего через образец в виде схемы (рисунок 3).

При сжатии волокон в образце в направлении прозвучивания путь распространения волны увеличивается, так как  $\sec b_1 > \sec b_2$ . Необходимо также учитывать здесь высокий уровень «шума», вызванного множественными отражениями и рассеяниями сигнала. Показано, что наибольшее рассеяние будет иметь часть фронта ультразвуковой волны, выражаемая вектором  $P_4$ . Преобладающее влияние на приемный датчик оказывают фрагменты фронта прошедшей волны, определяемые векторами  $P_2, P_3$ , т.е. при неравномерной поверхностной плотности образца основное акустическое давление на приемный датчик будет оказывать сигнал, прошедший через «прослабленный» участок образца.

Введем допущение, что: а) интервалы от излучателя до и после образца до

приемного датчика не влияют на закономерность взаимодействия фронта волны со структурой волокон, б) количество волокон-цилиндров на пути распространения сигнала является случайной величиной. Тогда, с учётом выражений (3), уравнение приращения пути распространения ультразвукового сигнала за счет дифракции запишется следующим образом

$$M_x = \sum_{i=1}^{M_H} d_i \cdot \sec b_i \quad (4)$$

где  $b_i$  - угол огибания случайного цилиндра акустической волной,

$d_i$  – эффективный диаметр случайного цилиндра.

Исходя из ранее введенного допущения о равномерности прочёса волоконной массы, будем считать, что расстояния между волокнами одинаковы и равны эффективным диаметрам волокон. Тогда, углы огибания волны  $b_i$  не будут превышать  $45^\circ$  и, соответственно, приращение пути при прохождении одного ряда волокон будет равно  $\sec b_i = 1,12$ . Зарегистрировать столь малые приращения пути распространения сигнала возможно лишь фазовыми методами.

Полученные результаты теоретических исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Основным фактором, влияющим на изменение ультразвукового сигнала, является количество волокон на пути распространения акустической волны от излучателя к приемнику.

2. Изменение фазы сигнала прямо пропорционально количеству волокон.

3. Для получения однозначных результатов контроля фазовым способом, необходимо обеспечивать в зоне контроля сырья постоянную объемную плотность (постоянную массу образца в заданном объеме –  $\text{кг/м}^3$ ).

4. Снижение амплитуды сигнала происходит из-за множественных отражений и рассеяния колебаний в волокнах массы.

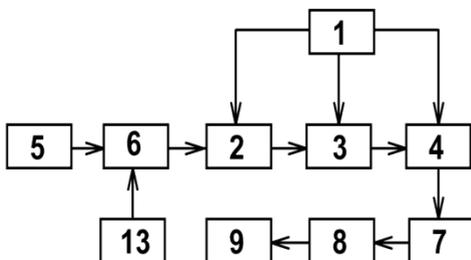
5. При наращивании количества волокон в направлении прозвучивания узлы и пучности акустических колебаний будут сдвигаться к излучателю, из-за увеличения пути распространения сигнала, вызванного огибанием волокон, что позволяет определить их количество в образце при оценке качества сырья.

6. Оценку свойств и качества волокна следует проводить с помощью фазового метода измерения гармонического (синусоидального) сигнала.

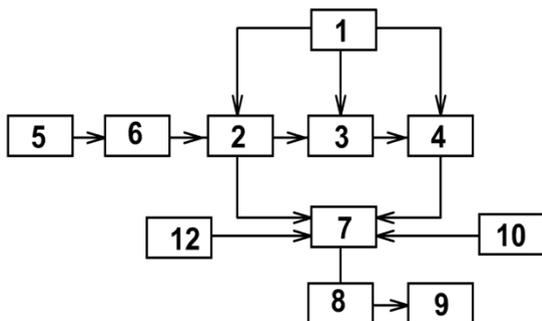
**В третьей главе** дано обоснование метода ультразвукового контроля параметров волокна, изложена методика и программа экспериментальных исследований, приведено описание оригинального аппаратного комплекса. Для обеспечения адекватности результатов измерений в диссертации разработана технология подготовки экспериментальных образцов волокон ручным и машинным способами.

Целью экспериментальных исследований являлось подтверждение теоретических предпосылок обоснования нового метода ультразвукового контроля параметров волокна и полученных закономерностей изменения амплитуды и фазы сигнала в зависимости от количества волокон на пути распространения акустической волны.

Блок А



Блок Б



Блок В

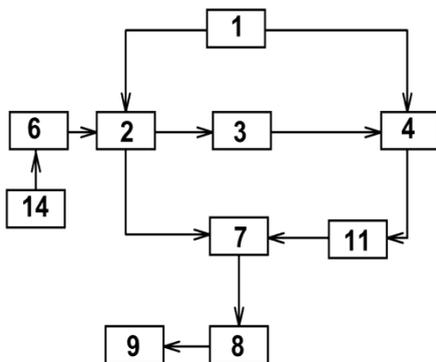


Рисунок 4 – Структурно-функциональная схема аппаратного комплекса: 1 - координатно-верньерное устройство, 2 – излучающий датчик, 3 – волоконный образец, 4 – приемный датчик, 5 – собственный генератор ВЧ-колебаний, 6 – усилитель, 7 – усилитель-селектор, 8 – счетно-решающее устройство, 9 – устройство регистрации и отображения информации, 10 – фазометр (применяемый при настройке), 11 – операционный усилитель (компаратор), 12 – частотомер, 13 – звуковой генератор, 14 – генератор качающейся частоты.

При проведении экспериментальных исследований были использованы лен–долгунец и волокно льна–кудряша, широко распространенные в льнопроизводящих хозяйствах Алтайского края. В качестве эталонного образца принято хлопковое волокно селекционного сорта 108Ф, наиболее близкое по физико-механическим и технологическим характеристикам к льну-волокну.

В диссертации разработан аппаратурно-лабораторный комплекс (патенты РФ №№ 2367947, 2398224, 2398697, 2418296, 2418297). На рисунке 4 приведена структурно-функциональная схема комплекса, содержащая в своем составе следующие блоки: амплитудного контроля (А), прямого фазового контроля (Б) и амплитудно-фазового контроля с подстройкой частоты (В).

Блок А использовался для исследования влияния поверхностной и объемной плотностей на величину амплитуды ультразвуковой волны, определения волновых соотношений в сигнале, прошедшем через волоконную массу, а также определения величины превышения полезного сигнала над уровнем шума, вызванного множественными отражениями

Блок Б предназначен для осуществления функции прямого фазового контроля. Собственный генератор 5 вырабатывает стабилизированную основную частоту ВЧ синусоидальных колебаний. Сигнал проходит на усилитель 6, работающий в режиме ограничения с выходом на излучатель 2 прямоугольных импульсов. Координатно-верньерным устройством 1 добиваются максимальной амплитуды сигнала, прошедшего через эталонный образец 3, на приемном датчике 4. На усилительно-селектирующем узле 7 амплитуда принятого сигнала усиливается до заданного ограничения. Излучаемый и принятый прямоугольные импульсы дифференцируются по переднему фронту и подаются на триггер. Полученный с триггера импульс преобразуется в счетный и запоминается в счетно-решающем устройстве 8. Затем, эталонный образец заменяется на контролируемый и процесс повторяется. По команде счетчика в узле 8 производится вычисление отношения сигналов через контролируемый и эталонный образцы, которые заносятся в сумматор. После проведения контроля необходимого количества образцов запускается счетно-решающее устройство, которое отображает и распечатывает на устройстве 9 информацию о среднем значении, дисперсии, статистической точности и достоверности результата.

Блок В, предназначенный для амплитудно-фазового контроля с подстройкой частоты, работает следующим образом. Генератор качающейся частоты 14 выдает плавно перестраиваемую последовательность ВЧ-колебаний. Подстройкой узла 1 на эталонном образце добиваются максимальной амплитуды сигнала с приемного датчика 4 на начале перестраиваемого диапазона и фиксируют с помощью узлов 12 и 10 эту частоту в памяти узла 8. Далее заменяют эталонный образец на испытуемый. С помощью компаратора 11 по всплеску амплитуды принятых колебаний, фиксируют контрольную частоту в узле 8. Счетно-решающее устройство узла 8 выделяет разностную частоту и передает ее в сумматор. Конечный результат находится и отображается так же, как и при прямом фазовом контроле.

В диссертации рассматривались количественные характеристики поверхностной ( $1/m^2$ ) и объемной ( $1/m^3$ ) плотностей, позволяющие установить

соотношение величины ультразвукового сигнала с количеством волокон различной зрелости в исследуемых образцах.

Показано, что регистрация фазового искажения сигнала через волоконную массу может быть осуществлено: а) путем прямого измерения временного запаздывания сигнала, б) механической подстройкой (сближением) приемного датчика в ближайшую (к контролируемому образцу) пучность стоячей волны, в) за счет регулирования излучаемой частоты сигнала для получения эффекта пучности волны на приемном датчике.

Вариант (б) предполагает сложную прецизионную подстройку и измерение перемещения приемного датчика.

Наиболее простыми и точными способами регистрации фазового сдвига сигнала являются варианты (а) и (в), апробация которых была проведена на лабораторном стенде (рисунок 4, блоки «Б» и «В»).

**В четвертой главе** приведены результаты экспериментальных исследований, разработано устройство ультразвукового контроля параметров волокна и дана оценка его технико-экономической эффективности.

В диссертации рассмотрено влияние волоконной массы на диаграмму направленности излучающего датчика, воздействие поверхностной и объемной плотности волокон на амплитуду и фазу акустического сигнала, а также воздействие дестабилизирующих факторов (температуры, относительной влажности и барометрического давления окружающей среды) на результаты контроля.

Для этого, был проведен четырехфакторный пассивный эксперимент с образцами волокон льна и хлопка. По алгоритму Йейтса было составлено уравнение регрессии для каждого вида волокна. В качестве исследуемых факторов были приняты: зрелость волокна, которая была выражена через разрывную прочность ( $X_1$ ), влажность окружающей среды ( $X_2$ ), температура ( $X_3$ ), барометрическое давление ( $X_4$ ). Установлено, что параметры акустического сигнала находятся в линейной зависимости от всех значимых факторов. Значимость климатических факторов сравнима со значимостью измеряемого параметра, что обуславливает применение относительных единиц измерения.

Исследовалось влияние волоконной массы на диаграмму направленности излучающего датчика путем смещения подвижной каретки с приемным датчиком координатно-верньерного устройства относительно соосной линии датчиков на 15 мм. В качестве излучающего и принимающего элемента использовались дисковые датчики диаметром  $D = 32$  мм. При отклонениях центров датчиков относительно друг друга на 11 мм сигнал, прошедший через образец, превышает по амплитуде сигнал, распространяющийся в отсутствие поглощающей волоконной массы. Полезный сигнал, прошедший через волокно, может быть зарегистрирован на оси диаграммы в пределах отклонения от оси до  $\pm 11$  мм с превышением над шумом в 5 – 10%. Тогда, на приемном датчике

будет регистрироваться не суммарный сигнал, прошедший через всю прозвучиваемую область, а сигнал  $P_2 - P_3$ , имеющий максимальную амплитуду превышения над шумом (рисунок 3).

Для определения воздействия поверхностной плотности сырья на колебательный сигнал между датчиками размещался наращиваемый пакет прочесанных слоев волокон. Объем, занимаемый образцом, при каждом добавлении слоя поддерживался неизменным.

Таблица 1. Влияние поверхностной плотности волокон на фазовый сдвиг сигнала.

Поверхн.коли ч.плотн.1/м <sup>2</sup>	11,4×10 <sup>6</sup>			44,9×10 <sup>6</sup>			65,3×10 <sup>6</sup>			93,8×10 <sup>6</sup>		
Макс. и мин. стояч. волны	макс	мин	макс									
Расстояние между датч. мм	69,7	68,3	64,7	69,6	66,1	64,6	69,4	67,7	64,4	69,3	67,0	64,3
Сигнал, относит. единиц	2,00	1,24	2,00	1,60	0,90	1,60	1,45	0,61	1,45	0,78	0,04	0,77
Длина волны(мм)	5,0			5,0			5,0			5,0		

Согласно полученным данным (таблица 1), установлено четкое отображение сдвига узлов и пучностей стоячей волны по мере роста количества волокон в направлении излучающего датчика. Результаты эксперимента соответствуют теоретическим выкладкам о приращении пути распространения фронта ультразвуковой волны при дифракционном огибании волокон в направлении распространения на интервалы, соизмеримые с длиной полуволны излучаемых колебаний, что подтверждает возможность реализации способа контроля количества волокон в массе.

В диссертации приведены экспериментальные исследования зависимости амплитуды и фазы ультразвуковых колебаний через волоконную массу (блоки А, Б и В, рисунок 4).

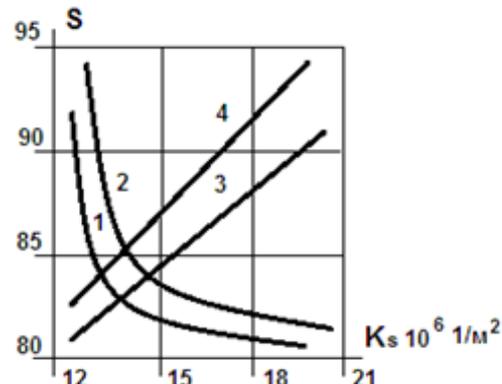


Рисунок 5 – Зависимость сигнала от плотности волокон на м<sup>2</sup>

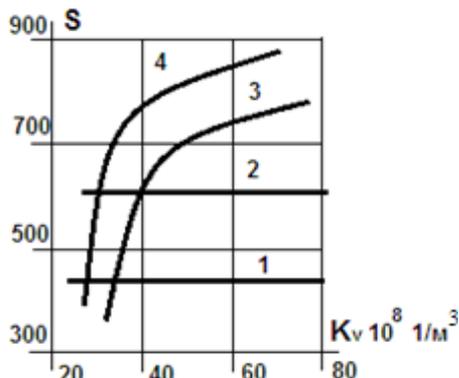


Рисунок 6 – Зависимость сигнала от плотности волокон на м<sup>3</sup>

Как видно из рисунка 5, амплитуда сигнала находится в выраженной нелинейной зависимости от поверхностной плотности волоконной массы (1 – хлопок, 2 – лён). Поэтому, имеет место недопустимый разброс погрешности измерения при контроле волокон различной зрелости. В то же время, фаза сигнала имеет линейную зависимость (3 – хлопок, 4 – лён) от поверхностной плотности в заданном объеме.

Характеристики (рисунок 6) показывают влияние объемной плотности волоконной массы на амплитуду и фазу ультразвукового сигнала. Установлено, что амплитуда сигнала находится в линейной зависимости от колебания в объемной плотности контролируемого образца (1 – хлопок, 2 – лён), а фаза сигнала имеет явно выраженную нелинейность (3 – хлопок, 4 – лён). Поэтому, контроль количества волокон в направлении прозвучивания следует проводить по регистрации изменения фазы принимаемого сигнала. Для обеспечения допустимой погрешности регистрации фазы во всем диапазоне контроля необходимо сохранить постоянную объемную плотность контролируемого образца.

Сравнительные испытания двух методов фазового контроля (блоки Б и В, рисунок 4) показали технологические преимущества прямого фазового контроля как более простого, оперативного и точного. Этот метод позволяет применять в качестве излучающих и приемных датчиков пьезокерамику (цирконат титаната свинца, ниобат лития, и др.), имеющую острорезонансную характеристику и обеспечивающую, тем самым, стабильность гармонических колебаний.

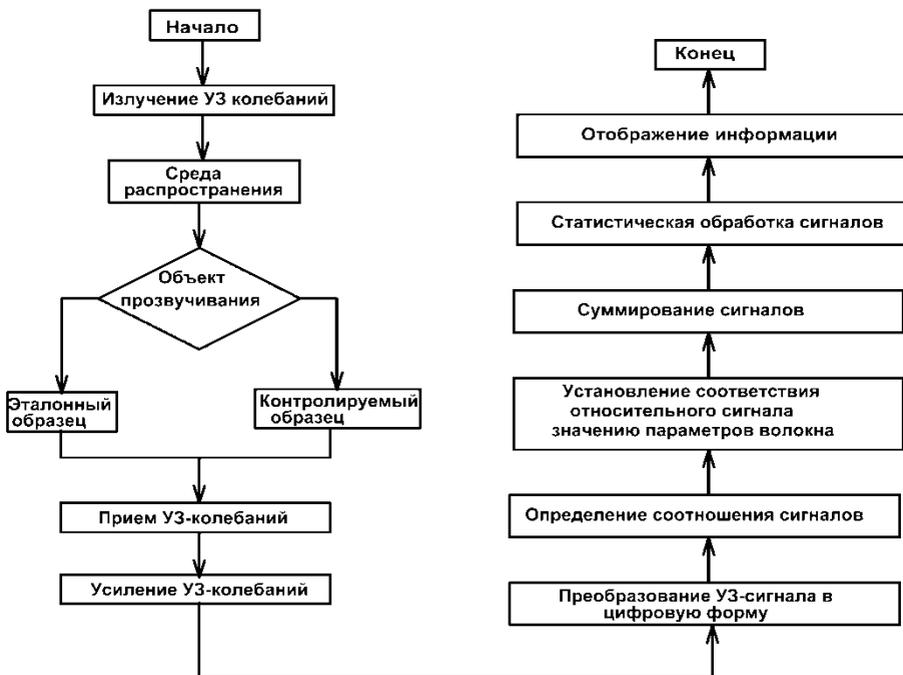


Рисунок 7 Алгоритм построения системы ультразвукового контроля и оценки физико-механических и метрологических параметров волоконной массы

. В диссертации разработан алгоритм работы системы ультразвукового контроля и оценки физико-механических и метрологических параметров волоконной массы (рисунок 7), реализованный в устройстве УЗКВ

Блок-схема и общий вид устройства изображены, соответственно, на рисунках 8 и 9.

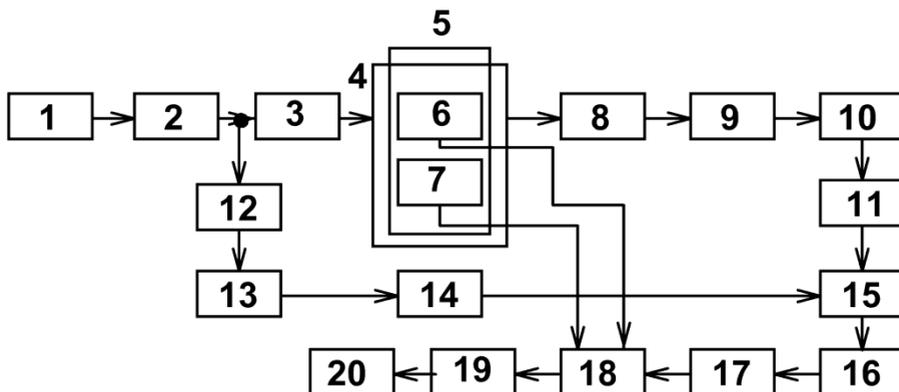


Рисунок 8 Блок-схема устройства УЗКВ

где 1 – генератор синусоидальных колебаний, 2 – усилитель, 3 – излучающий датчик, 4 – кассетодержатель, 5 – эталонный образец, 6 – контролируемый образец, 7 – кассета, 8 – приёмный датчик, 9 – усилитель-ограничитель, 10 – дифференцирующая цепь, 11 – усилитель-формирователь, 12 – усилитель-ограничитель, 13 – дифференцирующая цепь, 14 – усилитель-формирователь, 15 – триггер, 16 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП), 17 – оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), 18 – вычислитель отношения сигналов эталон/контроль, 19 – вычислитель параметров волокна, 20 – устройство отображения информации.

Генератор 1 выдает частоту ВЧ синусоидальных колебаний, совпадающую с резонансной частотой излучающего 3 и принимающего 8 датчиков. Сигнал проходит на усилитель 2, работающий с выходом на излучатель 3 и усилитель-ограничитель 12 синусоидального сигнала до прямоугольных импульсов. Амплитуда принятого сигнала передаётся на усилитель-ограничитель 9, где усиливается до заданного значения. Излучаемый и принятый прямоугольные импульсы дифференцируются по переднему фронту в узлах 10 и 13 и через усилители-формирователи 11 и 14 подаются на триггер 15. Полученный с триггера импульс поступает на аналого-цифровой преобразователь 16 и запоминается в оперативном запоминающем устройстве 17. Затем эталонный образец заменяется на контролируемый и процесс повторяется. По команде счетчика в узле 18 производится вычисление отношения сигналов через контролируемый и эталонный образцы. По показаниям сигнала с узла 18 на узле 19 производится, с помощью соответствующих коэффициентов, вычисление параметров волокна, значение которых отображается на цифровом информационном устройстве

Отличие устройства от лабораторной исследовательской установки (рисунок 4Б) в том, что настройка пучности сигнала на приемном датчике 4 производится не координатно-верньерным устройством, а подбором поверхностной плотности  $K_s$  эталонного образца, который служит, в дальнейшем, в качестве опорного, для определения относительных значений сигнала при замерах контрольных образцов.



Рисунок 9. Общий вид устройства УЗКВ

В результате испытаний УЗКВ определены его технические характеристики:

- диапазон контролируемой поверхностной плотности волокон  $5,0 - 160,0 \cdot 10^6 \text{ 1/м}^2$ ;
- собственная погрешность устройства  $\pm 1\%$ ;
- погрешность контроля при машинной подготовке образца  $\pm 2,5\%$ ;
- погрешность контроля при ручной подготовке образца  $\pm 4\%$ ;
- вес контролируемого образца  $1 \pm 0,01$  грамм

С помощью разработанного устройства представляется возможным оперативно (в течение 1.5 – 2 часов) проводить статистическую оценку зрелости, разрывной прочности и линейной плотности крупных партий волокна.

В диссертации дана оценка метрологических параметров льна-волокна на основе сравнения полученных ультразвуковых характеристик с их динамометрическими показателями и характеристиками хлопка-волокна с известными метрологическими параметрами (рисунок 10).

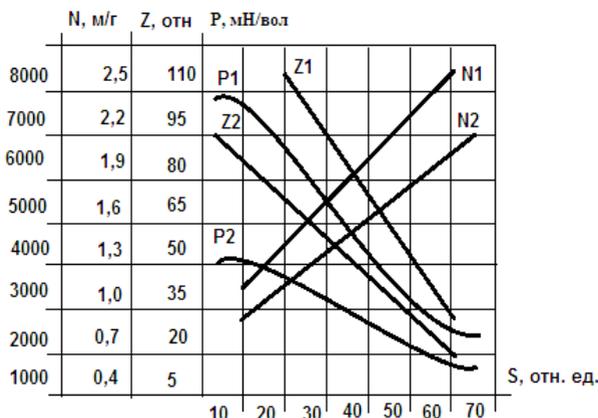


Рисунок 10 – Зависимости УЗ-сигнала от метрологических параметров волокон льна и хлопка:

где P1 – зависимость относительного сигнала от разрывной прочности волокон льна (мН/вол), P2 – зависимость относительного сигнала от разрывной прочности волокон хлопка (мН/вол), Z1 - зависимость относительного сигнала от зрелости волокон хлопка (отн. ед.), Z2 - зависимость относительного сигнала от зрелости волокон льна (отн. ед.), N1 – зависимость относительного сигнала от номера волокон хлопка (м/г), N2 - зависимость относительного сигнала от номера волокон льна (м/г).

Полученные экспериментальные данные позволяют метрологически оценить зрелость элементарного волокна льна (аналогично оценке волокна хлопка). Интервалы разрывной прочности (110÷100; 100÷65; 65÷35; 35÷25 мН/вол) соответствуют следующим характеристикам качества вызревания волоконной массы элементарных волокон льна: «полное желтое» (перезрелое), «желтое» (зрелое), «раннее желтое» (зрелое), «зеленое» (недозрелое).

В диссертации проведен расчет ожидаемого экономического эффекта от использования одного устройства УЗКВ применительно к партии волокон, который составляет на одну градацию промышленного сорта для льна-долгунца 7500 руб/тонна, для средневолокнистого хлопка (Узбекистан) 3600 руб/тонна.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Установлено, что используемые в настоящее время методы и средства контроля качества сельскохозяйственного волокна не позволяют в полной мере управлять процессом подготовки сортового сырья для текстильной промышленности и являются сдерживающим фактором повышения экономических показателей перерабатывающей отрасли.

2. Предложен новый метод ультразвукового контроля волоконного сырья, в основе которого лежит измерение физико-механических и метрологических параметров (разрывной прочности, линейной плотности, веса и геометрических размеров единичных волокон), характеризующих, в конечном итоге, зрелость сельскохозяйственного сырья (хлопка, льна-долгунца и др.). Метод позволяет

проводить статистическую оценку степени зрелости с погрешностью 2,5% и достоверностью 95%.

3. На основе разработанной математической модели процесса распространения ультразвуковых колебаний в массе волоконного сырья установлена и экспериментально подтверждена функциональная зависимость между амплитудой и фазой акустического сигнала и количеством волокон в контрольном образце, что позволяет, в конечном итоге, метрологически оценивать зрелость и качество сельскохозяйственного сырья. Обосновано использование фазы УЗ-колебаний, как наиболее эффективного фактора контроля и регистрации количества волокна.

4. Разработан аппаратный комплекс и лабораторная база для изучения процессов взаимодействия ультразвукового сигнала с волоконной массой сырья. Определены физико-механические характеристики волокна и режимы его акустического контроля. Установлено, что:

- сигнал, превышающий уровень шума, вызванного множественными межволоконными отражениями и рассеяниями, может быть зарегистрирован на приеме в пределах отклонений  $\pm 25\%$  от соосной линии фронтальных сечений датчиков, что предъявляет повышенные требования к полосовому фильтру приемного узла устройства контроля;

- приращение пути распространения УЗ-волны на увеличение поверхностной плотности количества волокон составляет  $0,1 \text{ мм}/20 \times 10^6 \text{ 1/м}^2$  независимо от частоты акустических колебаний, при условии отсутствия дестабилизирующих климатических факторов;

- фаза УЗ-сигнала имеет линейную зависимость от величины поверхностной плотности и нелинейную зависимость от объемной плотности волоконного сырья (образца);

- дестабилизация климатических факторов (температуры, относительной влажности и барометрического давления) на результаты контроля устраняется путем регистрации отношения показателей изменения фазы при прозвучивании опытного и эталонного образцов.

5. Обоснованы требования к системе контроля качества волокна и разработано ультразвуковое устройство (УЗКВ), работающее на принципе измерения временного запаздывания фазы акустического сигнала. Устройство имеет собственную погрешность не более 1%, совокупная инструментальная погрешность составляет 2,5%. Устройство УЗКВ обладает высокой надежностью и помехоустойчивостью, позволяет обеспечить быстрдействие контроля на два порядка превышающие аналоги, тем самым повысить его производительность (до 200 образцов в час).

6. Расчет ожидаемого экономического эффекта от использования одного устройства УЗКВ применительно к партии волокна составляет при более точном и достоверном определении на одну градацию промышленного сорта: для льна-долгунца – 7500 руб/тонна, для средневолокнистого хлопка (Узбекистан) – 3600 руб/тонна.

7. Результаты исследований были использованы при разработке научно-методических и практических рекомендаций «Ультразвуковой контроль качества сельскохозяйственного волокна – льна-долгунца», одобренных Главным управлением сельского хозяйства Алтайского края и принятых для практического использования.

## **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

### Издания по перечню ВАК

1. Костюков А.Ф. Модель регистрации признаков многослойной структуры с помощью акустических колебаний. [Текст] / А.Ф. Костюков // Вестник АГАУ, - 2010г. - № 3 - с. 94 – 98.
2. Костюков А.Ф. Экспериментальное определение свойств волокон с помощью акустических колебаний. [Текст] / А.Ф. Костюков // Вестник АГАУ, - 2010г. - №9 - с. 84 – 87.
3. Костюков А.Ф. Приборы и методы лабораторного контроля основных технологических параметров сельскохозяйственных волокон с помощью ультразвука. [Текст] / А.Ф. Костюков // Вестник АГАУ, - 2011г. - № 3 - с. 95 – 98.
4. Костюков А.Ф. Исследование влияния упорядоченного множества волокон на волновые соотношения ультразвука. [Текст] / А.Ф. Костюков // Вестник АГАУ, - 2011г. - № 5 - с. 90 – 94.
5. Костюков А.Ф. Экспериментальное исследование волоконного сырья с помощью ультразвука. [Текст] / А.Ф. Костюков // Ползуновский вестник. Электроэнергетика в сельском хозяйстве. Барнаул, 2011г. – Выпуск 2/2. – с. 205 – 209.
6. Костюков А.Ф. Разработка метода оперативного контроля параметров волокон. [Текст] / А.Ф. Костюков // Вестник ИрГСХА. - Иркутск, 2011. - Вып. 46. - С. 79 – 86

### Публикации в других изданиях

7. Костюков А.Ф. Новый оперативный метод контроля свойств волокон в массе. [Текст] // Материалы V Международной конф. «Аграрная наука – сельскому хозяйству» - Барнаул: АГАУ, 2010г. - кн. 3 – с. 123 – 125.
8. Костюков А.Ф. Экспериментальное определение значимых факторов при взаимодействии акустических колебаний с компактным множеством волокон. [Текст] // Материалы VI Международной конф. «Аграрная наука – сельскому хозяйству» - Барнаул: АГАУ, 2011г. - кн. 3 – с. 50 – 53.
9. Костюков А.Ф. Оперативный метод контроля свойств волокон в массе. [Текст] Материалы V Всероссийской конф. «Аграрная наука в XXI веке. Проблемы и перспективы» - Саратов: Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова. 2011г. – с. 131 – 133.
10. Костюков А.Ф. Определение значимых факторов при взаимодействии ультразвука с компактным множеством волокон. [Текст] Материалы II Международной конф. «Актуальные проблемы энергетики АПК» - Саратов: Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова. 2011г. – с. 158 – 160.
11. Костюков А.Ф. Определение свойств сельскохозяйственных волокон с помощью ультразвука. [Текст] Материалы Межд. конф. «Аграрная наука – основа инновационного развития АПК» Курган: Курганский ГСХА им. Мальцева. 2011г. – т.1 - с. 367 – 370
12. Костюков А.Ф. Ультразвуковой метод контроля свойств сельскохозяйственных волокон в массе. [Текст] Материалы VIII Межд. конф. «Агроэкологические аспекты устойчивого развития АПК» Брянск: Брянская ГСХА. 2011г. – с. 210 – 211.

13. Костюков А.Ф. Оперативный контроль свойств сельскохозяйственных волокон с помощью ультразвука. [Текст] Материалы Межд. научно-практической конф. «Современные технологии производства и переработки сельскохозяйственной продукции» Новосибирск: Сибирский университет потребительской кооперации, Сибирское региональное отделение Российской академии сельскохозяйственных наук. 2011г. – с. 160 – 163.
14. Костюков А.Ф. Ультразвуковая установка для контроля параметров волокон /А.Ф. Костюков, В.М. Капустин// IX Международная научно-практическая интернет-конференция " Энерго- и ресурсосбережение - XXI век ", г. Орел, 15 марта - 30 июня 2011 г./ Секция 6. Энерго - и ресурсосбережение в агропромышленном комплексе. 5 с. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М.,[2011]. – Режим доступа: <http://www.ostu.ru/science/confs/2011/ers/papers.html>. - Загл. с экрана.
15. Костюков А.Ф. Влияние климатических факторов при ультразвуковом контроле волокон /А.Ф. Костюков, В.М. Капустин// IX Международная научно-практическая интернет-конференция " Энерго- и ресурсосбережение - XXI век ", г. Орел, 15 марта - 30 июня 2011 г./ Секция 6. Энерго - и ресурсосбережение в агропромышленном комплексе. 5 с. [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М.,[2011]. – Режим доступа: <http://www.ostu.ru/science/confs/2011/ers/papers.html>. - Загл. с экрана.
16. Костюков А. Ф.Контроль свойств сельскохозяйственных волокон в массе [Текст] // Материалы VII Международной конф. «Аграрная наука – сельскому хозяйству» - Барнаул: АГАУ, 2012г, - кн. 3 – с 35,36.

#### Патенты

17. Способ контроля физико-механических параметров волокон в массе. .Патент №2367947, G01N29/00,2008г Российская Федерация, МПК G01N29/00 / Костюков А.Ф., Заявитель и патентообладатель А.Ф. Костюков - № 2008126856/28, заявл. 01.07.2008г.
18. Способ контроля средних параметров компактного множества волокон. Патент №2380697, G01N29/00, 2008г Российская Федерация, МПК G01N29/00 / Костюков А.Ф., Заявитель и патентообладатель А.Ф. Костюков - № 2008145339/28, заявл.17.11.2008г.
19. Способ лабораторного контроля параметров волокон. Патент №2398224, G01N29/00, 2009г Российская Федерация, МПК G01N29/00 / Костюков А.Ф., Заявитель и патентообладатель А.Ф. Костюков - № 2009122763/28, заявл.15.06.2009г.
20. Способ контроля средней линейной плотности компактного множества волокон. Патент № 2418296, Российская Федерация, МПК G01N29/00 / Костюков А.Ф., Заявитель и патентообладатель А.Ф. Костюков - № 2010104353/28, заявл. 08.02.2010г.
21. Способ лабораторного контроля средней линейной плотности компактного множества волокон. Патент № 2418297, Российская Федерация, МПК G01N29/00 / Костюков А.Ф., Заявитель и патентообладатель А.Ф. Костюков - № 2010104351/28, заявл. 08.02.2010г.