

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КАНАЛА И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ НА ВЕЛИЧИНУ АКУСТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ТОНИНЫ ВОЛОКОННЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ключевые слова: ультразвук, приемный пьезоэлемент, ультразвуковой канал, максимальное среднее акустическое давление, угол наклона приемника ультразвуковых колебаний.

Введение

Разработка методов и технических средств оценки тонины – интегрального показателя качества – различных сельскохозяйственных материалов, таких как лен, хлопок или шерсть является актуальной научно-технической проблемой, поскольку в конечном итоге качественные характеристики исходного волокна непосредственно оказывают влияние на качество и стоимость готового продукта текстильной промышленности и экономическую эффективность функционирования сырьевых сельскохозяйственных предприятий.

Перспективным способом оценки тонины сельскохозяйственных волокон следует считать ультразвуковой при условии повышения точности результата измерения [1-5].

Принимая во внимание эффекты дифракции и интерференции при прохождении акустической волны через волоконный материал, критерием снижения инструментальной погрешности следует считать максимальную величину среднего акустического давления на поверхность приемного элемента, которая, в свою очередь, является функцией параметров ультразвуковой волны и геометрических характеристик измерительного канала [6]. Особенно это актуально в ситуациях, когда распространение ультразвуковых колебаний происходит в каналах малых размеров, соизмеримых с длиной ультразвуковой волны.

Цель работы – определение зависимости акустического давления от физических параметров ультразвуковой волны и геометрических характеристик измерительного канала и приемника.

Задачи:

- изучение картины изменения акустического давления в акустическом канале;
- синтез математической модели изменения акустического давления в зависимости

от параметров акустического канала и ультразвуковой волны;

– выявление функциональной зависимости максимального среднего акустического давления на пьезоприемник и параметров акустической волны и измерительного канала.

Результаты моделирования

При распространении ультразвуковых волн в ограниченных пространствах возникает интерференция волн, отраженных от ограничивающих поверхностей (рис. 1).

Во избежание встречного воздействия на звуковое поле отраженной от приемника волны, а также для нивелирования смещения зоны пучности звуковой волны и увеличения площади воздействия волны на принимающий пьезоэлемент его рабочую поверхность устанавливают под некоторым углом к излучателю [6].

Значение среднего акустического давления P_{cp} на приемник, поверхность которого отклонена на угол β от нормали (рис. 1), проведенной к линии распространения акустической волны (продольной оси измерительного канала), имеет вид [6]:

$$P_{cp} = 2P_0 \cos(\omega t - kx \operatorname{tg} \beta), \quad (1)$$

где ω – круговая частота, $\omega = 2\pi f$;

β – угол наклона приемника;

a – полуширина измерительного канала;

P_0 – звуковое давление на оси ультразвукового пучка;

k – волновое число, $k = 2\pi f/c$;

f – частота ультразвуковых колебаний;

c – скорость звука.

Выражение (1) определяет мгновенное значение звукового давления на поверхность приемника в точках, положение которых определено координатой x . Так как величина «следа» волны для заданных размеров плоской отражающей поверхности постоянна, то при условии равномерного распределения звукового давления в сечении пучка $P(x) = \text{const} = P_{cp}$ значение звукового давления на поверхности приемника будет равно [3]:

$$P_{cp} = \frac{2}{a} \int_0^a P_0 \cos(\omega t - kxtg\beta) dx = \frac{2P_0}{k a tg\beta} [\sin \omega t - \sin(\omega t - k a tg\beta)] \quad (2)$$

$$\omega t = \frac{k a tg\beta}{2} \quad (3)$$

где
В результате подставки (3) в выражение (2) и последующих преобразований получено выражение для определения P_{cp} [3]:

$$P_{cp} = \frac{4P_0}{k a tg\beta} \sin \frac{k a tg\beta}{2} \quad (4)$$

Для определения параметров ультразвуковой волны и измерительного канала (полуширина канала, частота излучаемой волны, угол наклона приемника) необходимо исходить из того, что среднее давление должно иметь максимальное положительное значение в силу того, что датчик приемника воспринимает только избыточное давление.

Анализ ранее опубликованных работ показал, что для практических исследований полуширина канала a и частота акустического сигнала f должны располагаться в пределах $a = 4-10$ мм; $f = 100-200$ кГц [7-9].

В этом случае параметр ak изменяется в пределах от 7,48 до 26,18.

Таким образом, относительное давление P_{cp}/P_0 зависит от комплексного параметра ak и угла наклона приемника β .

На рисунке 2 в соответствии с выражением (4) построены графики зависимости относительного среднего давления от угла β (при $P_0 = 1$).

На рисунке 3 приведена зависимость P_{cp}/P_0 для значения $ak = 14,01$, что соответствует $a = 5$ мм и $f = 150$ кГц.

Как следует из рисунка 3, с увеличением угла наклона приемника относительное максимальное среднее давление, воспринимаемое приемником, затухает. При этом периодичность затухания зависит от коэффициента ak .

В работе приведено выражение для определения P_{cp} (2), но не проведено исследование максимального среднего давления от угла наклона приемника, что существенно для определения параметров измерительного канала [6].

Анализ зависимости P_{cp}/P_0 (рис. 3) для конкретного значения $ak = 14,01$ показывает, что вероятное максимальное среднее положительное давление на приемник достигается при углах наклона приемника в пределах от 0 до 25°.

Для определения угла наклона приемника необходимо найти точки экстремума функции $dP_{cp}/d\beta$.

Дифференцирование выражения (4) по углу β с учетом $P_0 = 1$ дает:

$$\frac{dP_{cp}}{d\beta} = \left(\frac{4}{ak tg\beta} \right) \sin \frac{ak tg\beta}{2} + \frac{4}{ak tg\beta} \left(\sin \frac{ak tg\beta}{2} \right)'$$

Результатом преобразования полученного уравнения относительно $tg\beta$ и приравнивания правой части нулю (для определения точек экстремума) является:

$$-\frac{4}{ak \sin^2 \beta} \sin \frac{ak tg\beta}{2} + \frac{2 \cos \frac{ak tg\beta}{2}}{tg\beta \cos^2 \beta} = 0$$

В результате ряда преобразований получено уравнение следующего вида:

$$\frac{2}{ak} tg \frac{ak tg\beta}{2} = tg\beta \quad (5)$$

или

$$tg\beta = \frac{2}{ak} \arctg \frac{ak}{2} tg\beta \quad (6)$$

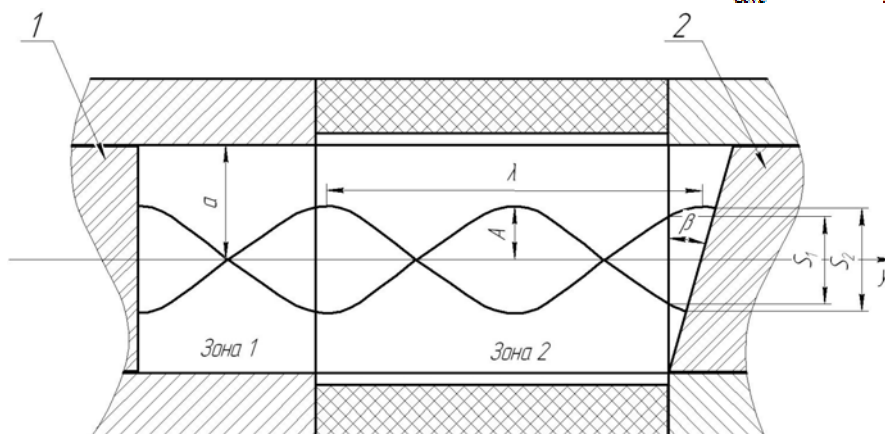


Рис. 1. Акустический тракт датчика с наклонным расположением приемной поверхности: 1 – излучатель; 2 – приемник; a – половина ширины измерительного канала, β – угол наклона приемника, λ – длина волны; S_1 – зона акустического давления при прямом положении приемника; S_2 – зона акустического давления при наклонном положении приемника

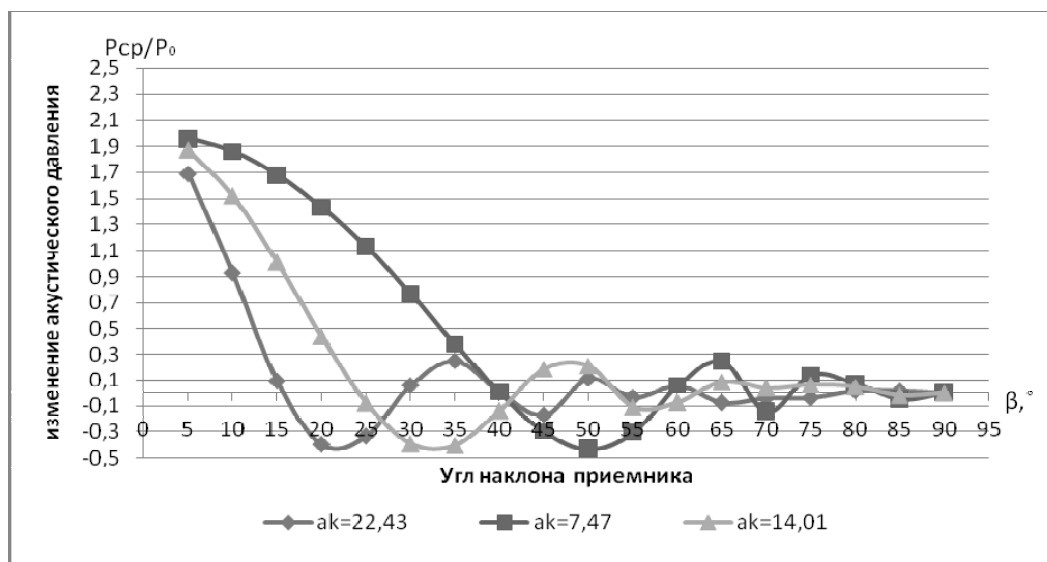


Рис. 2. Зависимости относительного среднего давления P_{cp}/P_0 от угла наклона приемника β при различных значениях параметра ak

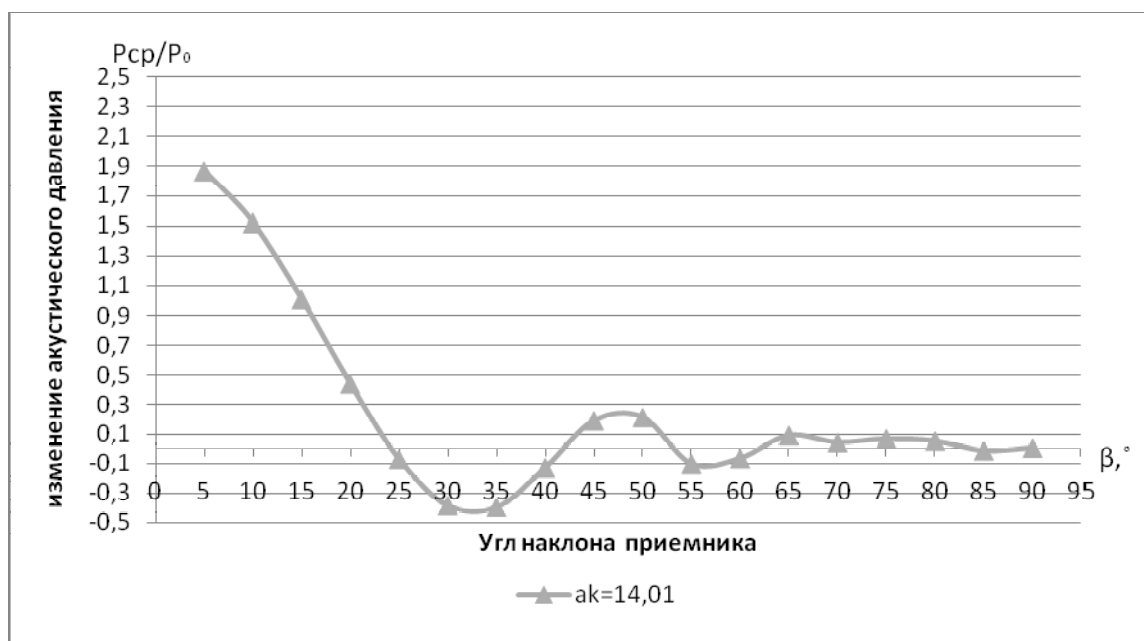


Рис. 3. Зависимость среднего акустического давления P_{cp}/P_0 от угла наклона приемника β при $ak = 14,01$ ($a = 5$ мм и $f = 150$ кГц).

Введем следующее обозначение $tg\beta = z$.

Тогда уравнение (6) примет вид:

$$z = \frac{2}{ak} \operatorname{Arctg} \frac{ak}{2} z. \quad (7)$$

Уравнение (7) является трансцендентным и не имеет аналитического решения. Решим его итерационным способом.

В общем случае, учитывая периодичность функции arctg , для i -того интервала правая часть выражения (7) принимает вид

$$f(z) = (i - 1) \frac{2\pi}{ak} + \frac{2}{ak} \operatorname{arctg} \frac{ak}{2} z. \quad (8)$$

На рисунке 4 приведены графики функции $f(z)$, с учетом периодичности функции arctg .

Общее выражение для интервалов, где функция $f(z)$ имеет точки пересечения с прямой $y(z) = z$ (корни уравнения (7) имеет вид:

$$\left[(i - 1) \frac{2\pi}{ak}; (2i - 1) \frac{\pi}{ak} \right], \quad (9)$$

где i – номер интервала.

Уравнение (7) имеет бесконечное число корней (рис. 4).

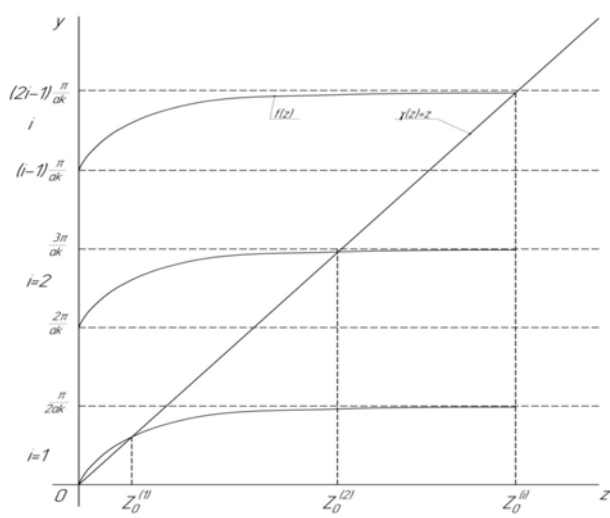


Рис. 4. Графики функции $f(z)$

В связи с этим к решению уравнения (7) применим метод сжимающих отображений на интервале $[Z_{\min}; +\infty)$. Необходимым и достаточным условием применимости метода сжимающих отображений является выполнение неравенства $|f'(z)| < 1$ [10].

Данное условие для произвольного i -того интервала определения функции $f(z)$ выполняется, так как:

$$|f'(z)| = \left| \frac{2}{ak} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{ak}{z}\right)^2} \cdot \frac{ak}{z} \right| = \left| \frac{1}{1 + \left(\frac{ak}{z}\right)^2} \right| < \frac{1}{1 + \left(\frac{ak}{z}\right)^2} < 1$$

Таким образом, правая часть в выражении (7) является сжимающим отображением и может быть решено итерационным методом. Ниже приведена методика определения корней уравнения (7) итерационным методом и расчета среднего значения акустического давления.

Для конкретного значения параметра ak имеем следующее бесконечное множество корней $(z_0^{(i)})$ уравнения (7) $z_0^{(1)}, z_0^{(2)}, z_0^{(3)}, \dots, z_0^{(i)} \dots$

С учетом принятого обозначения $tg\beta_0 = z$ имеем $tg\beta_0 = z_0^{(i)}$.

Отсюда следует: $\beta_0^{(i)} = arctgz_0^{(i)}$.

В точках $\beta = \beta_0^{(i)}$ среднее давление (P_{cp}), определяемое по формуле (7), имеет точки экстремума. Для выбора угла наклона приемника необходимо выполнение следующего условия: при угле β_0 среднее давление (P_{cp}) максимально и положительно.

Изложенные выше теоретические соображения позволяют сформулировать методику определения параметров измерительного канала ультразвукового устройства:

1. Выбор исходных данных для расчета: полуширина канала a ; частота ультразвукового излучения f ; погрешность определения корня уравнения (7) ε ; начальное значение угла положения приемника Z_{\min} .

2. Определение корней уравнения $Z_0(i)$ для произвольного i -того интервала из соотношения:

$$(i - 1) \frac{2\pi}{ak} + \frac{2}{ak} arctg \frac{ak}{z} z = z \quad (10)$$

Определение углов $\beta_0^{(i)} = arctgz_0^{(i)}$

3. Расчет среднего давления для каждого угла $\beta_0^{(i)}$ и определение угла β_0 , при котором P_{cp} принимает максимальное значение.

В качестве примера ниже приведены результаты расчета при следующих значениях исходных данных:

- полуширина канала $a = 5$ мм;
- частота ультразвуковой волны $f = 150$ кГц;
- погрешность определения корня уравнения (7) $\varepsilon = 0,05$.

На рисунке 5 представлены результаты расчета значений величин среднего давления P_{cp}/P_0 в зависимости от угла наклона приемника β при $ak = 14,01$.

```

Полуширина канала =? 5
Частота =? 150
Погрешность определения корня =? 0.05
Задание начала процесса =? 0.0001
ak= 14.01786
    
```

* № *	* угол *	* давление *
* 1 *	* 0.01 *	* 2.00 *
* 2 *	* 32.15 *	* -0.43 *
* 3 *	* 47.69 *	* 0.26 *
* 4 *	* 57.25 *	* -0.18 *
* 5 *	* 63.52 *	* 0.14 *
* 6 *	* 67.87 *	* -0.12 *
* 7 *	* 71.04 *	* 0.10 *
* 8 *	* 73.43 *	* -0.08 *
* 9 *	* 75.30 *	* 0.07 *
* 10 *	* 76.80 *	* -0.07 *

Рис. 5. Результаты расчета значений величин среднего давления P_{cp}/P_0 в зависимости от угла наклона приемника β при $ak = 14,01$

Анализ данных на рисунке 5 показывает, что максимальное среднее положительное давление достигается в ситуации, когда $\beta \rightarrow 0^\circ$. При возрастании угла β амплитуда акустического давления уменьшается. Таким образом, на первый взгляд представляется, что оптимальным является расположение приемника акустических колебаний с углом наклона, равным нулю. Однако при прохо-

ждении акустической волны через исследуемый материал происходит смещение фазы сигнала, кроме того, при сборке и установке прибора возможна погрешность позиционирования излучателя и приемника относительно друг друга. Указанные явления могут вносить дополнительную погрешность в результат измерения тонины волоконного материала и требуют дальнейшего исследования.

Выводы

1. Акустическое давление зависит от частоты акустических колебаний, полуширины измерительного канала a и угла наклона приемного элемента.

2. Предложенная математическая модель позволяет утверждать, что полуширина канала a и частота акустического сигнала f должны располагаться в пределах $a = 4-10$ мм; $f = 100-200$ кГц. В этом случае параметр ak изменяется в пределах от 7,48 до 26,18.

3. С увеличением угла наклона приемника относительное максимальное среднее давление, воспринимаемое приемником, затухает. При этом периодичность затухания зависит от коэффициента ak .

4. При $ak = 14,01$ ($a = 5$ мм и $f = 150$ кГц) максимальное значение акустического давления наблюдается при угле наклона пьезоприемника равном 0° . Однако смещение фазы акустического сигнала, погрешность позиционирования излучателя и приемника относительно друг друга могут вносить дополнительную погрешность в результат измерения тонины волоконного материала и требуют дальнейшего исследования.

Библиографический список

1. Вершинин А.С., Мурзина Т.В., Поспелова О.В. Современное состояние и перспективные овцеводства в забайкальском

крае // Достижения науки и техники в АПК. – 2013. – № 9. – С. 57-59.

2. Багаев А.А., Калинин Ц.И., Куницын Р.А. Ультразвуковой прибор для исследования меринской шерсти // Ползуновский вестник. – 2010. – № 2. – С. 57-59.

3. Багаев А.А., Калинин Ц.И., Куницын Р.А. Математическая модель ультразвукового анализатора качества меринской шерсти // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 3 (65). – С. 72-75.

4. Багаев А.А., Калинин Ц.И., Куницын Р.А. Повышение точности контроля объемной плотности неупорядоченных волоконных сред с помощью ультразвуковых датчиков // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2/2. – С. 8-12.

5. Способ определения тонины волокон // Патент № 2465582, G01N29/00, 2006 г. Российская Федерация, МПК G01N29/00 / Ц.И. Калинин, Р.А. Куницын, А.А. Багаев / ФГОУ ВПО АГАУ № 2011116334/28; заявл. 25.04.2011 г.

6. Иливанов В.М., Кандрин Ю.В., Цымбалист В.А. Физическая акустика: монография. – 2-е изд., доп. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2004. – 158 с.

7. Костюков А.Ф. Метод ультразвукового контроля параметров сельскохозяйственного волоконного сырья: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.02. – Барнаул, 2012. – 141 с.

8. Калинин Ц.И. Экспрессный контроль линейной плотности массы волокнистой ленты: дис. ... канд. техн. наук: 05.19.03. – М., 1990. – 194 с.

9. Шендеров Е.Л. Излучение и рассеяние звука. – Л.: Судостроение, 1989. – 304 с.

10. Колмогоров А.Н., Фомин С.В. Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Наука и техника, 1976. – 543 с.

