

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 620.179.16:677.31/35:3636.32/38

А.А. Багаев, Р.А. Куницын, Ц.И. Калинин
A.A. Bagayev, R.A. Kunitsyn, Ts.I. Kalinin

ВЛИЯНИЕ УГЛА НАКЛОНА ПРИЕМНОГО ЭЛЕМЕНТА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ДАТЧИКА НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ТОНИНЫ ВОЛОКОН ШЕРСТИ

INFLUENCE OF INCLINATION ANGLE OF RECEIVING ELEMENT OF ULTRASONIC SENSOR ON MEASUREMENT ERROR OF WOOL FIBER FINENESS

Ключевые слова: среднее акустическое давление, погрешность позиционирования, угол наклона акустического приемника.

Для повышения точности метода измерения диаметра неупорядоченных волокон в массе необходимо решение ряда научно-технических задач. Одним из ключевых вопросов, требующих решения, является необходимость снижения величины ошибки, связанной с фазовой модуляцией акустической волны. В значительной степени снизить эту ошибку можно с использованием датчиков, имеющих наименьшую пространственно-амплитудную неравномерность волнового поля. Для выявления оптимальных параметров устройства с такими характеристиками было проведено математическое моделирование, учитывающее как различное расположение системы излучатель-приемник, так и ошибку его позиционирования в акустическом канале. Было выявлено, что наименьшее отклонение среднего давления волнового поля (ΔP_{cp}) от параметров акустического канала наблюдается при использовании наклонного приемника при вертикальном расположении излучателя. Получена зависимость погрешности среднего акустического давления, обусловленная погрешностью позиционирования приемника по углу установки. Проведенный расчет позволяет находить оптимальное значение угла наклона при изменении параметров акустического канала (ak). Показаны изменения относительной погрешности давления волнового поля и относительного давления значения среднего акустического давления P_{cp}/P_0 от угла установки приемника β при погрешности его позиционирования $\Delta\beta = \pm 5^\circ$. Анализ показывает, что для параметров волнового канала $ak = 14$ максимума акустического давления при угле наклона приемника $\beta = 48^\circ$ погрешность ΔP как минимум в 1,7 раза меньше, по сравнению с погрешностью той же величины на интервале углов установки приемника β от 0° до 25° . Таким образом, для любого значения ak в диапазоне от 7 до 25 можно утверждать, что максимум среднего акустического давления при мини-

мальной погрешности будет находиться в третьем интервале кривой распределения P_{cp}/P_0 . Используя методику, были рассчитаны значения максимального среднего давления P_{cp} и угла наклона приемника β в зависимости от коэффициента ak , анализ которых позволяет сделать следующий вывод: давление имеет максимум в широком диапазоне изменения параметра ak ($ak=7-25$).

Keywords: average acoustic pressure, positioning error, inclination angle of acoustic receiver.

To increase the accuracy of the measuring technique of the diameter of disordered fibers in-bulk, a number of research and technical problems should be solved. One of the key issues that should be addressed is the reduction of the error magnitude associated with the acoustic wave phase modulation. To a large extent, this error may be reduced by using of sensors having the smallest spatial-amplitude unevenness of the wave field. To identify the optimal parameters of the device with such characteristics, mathematical modeling was carried out which took into account both the different arrangement of the transmitter-receiver system and the error of its positioning in the acoustic channel. It was found that the smallest deviation of the average wave field pressure ($\Delta P_{average}$) from the acoustic channel parameters was observed when using an inclined receiver with vertical arrangement of the transmitter. The dependence of the average acoustic pressure error determined by receiver positioning error regarding the angle of adjustment was obtained. The calculation enables to find the optimum value of the inclination angle of when the parameters of the acoustic channel (ACH) are changed. The dependence of the relative error of the wave field pressure and the relative value of the average acoustic pressure $P_{average}/P_0$ on the adjustment angle of the receiver β at positioning error of $\Delta\beta = \pm 5^\circ$ is shown. The analysis shows that for the wave channel parameters $ACH = 14$, the maximum of the acoustic pressure at the receiver inclination angle $\beta = 48^\circ$, the error ΔP is at least 1.7 times smaller than the error of the same value at

the receiver angle β from 0° to 25° . Therefore, for any value of the acoustic channel in the range from 7 to 25, it may be stated that the maximum of the average acoustic pressure at the minimum error will be in the third interval of the distribution curve $P_{average} / P_0$. By using the technique, the values of the

maximum average pressure $P_{average}$ and the receiver inclination angle β were calculated depending on the ACh coefficient; their analysis enables to conclude that the pressure is at its maximum in a wide variation range of the ACh parameter ($ACh = 7...25$).

Багаев Андрей Алексеевич, д.т.н., проф., зав. каф. электрификации и автоматизации сельского хозяйства (ЭиАСХ), Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-84-49. E-mail: bagaev710@mail.ru.

Куницын Роман Александрович, к.т.н., доцент, каф. ЭиАСХ, Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: Kynizin_roman@mail.ru.

Калинин Цезарь Иванович, к.т.н., доцент, каф. ЭиАСХ, Алтайский государственный аграрный университет. E-mail: bagaev710@mail.ru.

Bagayev Andrey Alekseyevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Head, Chair of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agricultural University. E-mail: bagaev710@mail.ru.

Kunitsyn Roman Aleksandrovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Altai State Agricultural University. Chair of Electrification and Automation of Agriculture. E-mail: Kynizin_roman@mail.ru.

Kalinin Tsezar Ivanovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Chair of Electrification and Automation of Agriculture, Altai State Agricultural University. E-mail: bagaev710@mail.ru.

Введение

Проблеме разработки методов повышения точности измерения диаметра волокон, находящихся в неупорядоченном нерегулярном образце, и совершенствованию технических средств измерения посвящен ряд работ [1-7]. В перечисленных работах установлено, что взаимодействие пространственно-неоднородного звукового поля с нерегулярной структурой волоконной среды приводит к тому, что по сравнению со значением среднего акустического давления P_{cp} для регулярной структуры происходит снижение интегрального значения звукового давления на приемной поверхности, если участки локальных уплотнений среды находятся в зоне с повышенным значением P_{cp1} и увеличение, если локальные уплотнения расположены в зонах с пониженным P_{cp1} , т.е. в реальных датчиках неравномерность волнового поля влечет за собой неравномерность чувствительности по прозвучиваемой поверхности [7]. Наряду с фазовой модуляцией волны по фронту это вносит существенный вклад в ошибку измерения при контроле нерегулярных сред. Очевидно, что чем больше разница между максимальным и минимальным значениями давления по сечению ультразвукового пучка, тем больше величина ошибки измерения. В значительной степени снизить эту ошибку можно с использованием излучателей, имеющих наименьшую пространственно-амплитудную неравномерность волнового поля. Для этого необходима теоретическая и экспериментальная оценка звукового поля реальных вибраторов в конкретных условиях.

Целью работы является исследование изменения среднего акустического давле-

ния ультразвуковой волны и погрешности при различных геометрических параметрах акустического канала.

Задача – проведение исследований изменения акустического давления при изменении основных параметров акустического канала и создание математической модели, описывающей влияние погрешности на величину среднего акустического давления.

Математическое моделирование и его результаты

При ультразвуковом воздействии на волоконную среду возникает задача точности установки приемника по отношению к излучателю. Этот факт в значительной степени влияет на полученные результаты в силу того, что частота излучения высока (20 до 200 кГц). Вследствие этого даже незначительное отклонение взаимного расположения приемника и излучателя может сказаться на результате измерения тонины волоконного материала.

Расположение приемника ультразвуковой волны по отношению к излучателю характеризуется двумя факторами (рис. 1):

- позиционированием приемника по оси распространения акустической волны X ;
- углом наклона приемника β .

Рассмотрим влияние вышеперечисленных факторов на точность измерения тонины волокон шерсти.

Время прохождения акустической волной отрезка ΔX_1 обозначим Δt_1 , которое может быть определено выражением:

$$\Delta t_1 = \frac{\Delta X_1}{c}, \quad (1)$$

где c – скорость распространения акустической волны в воздушной среде.

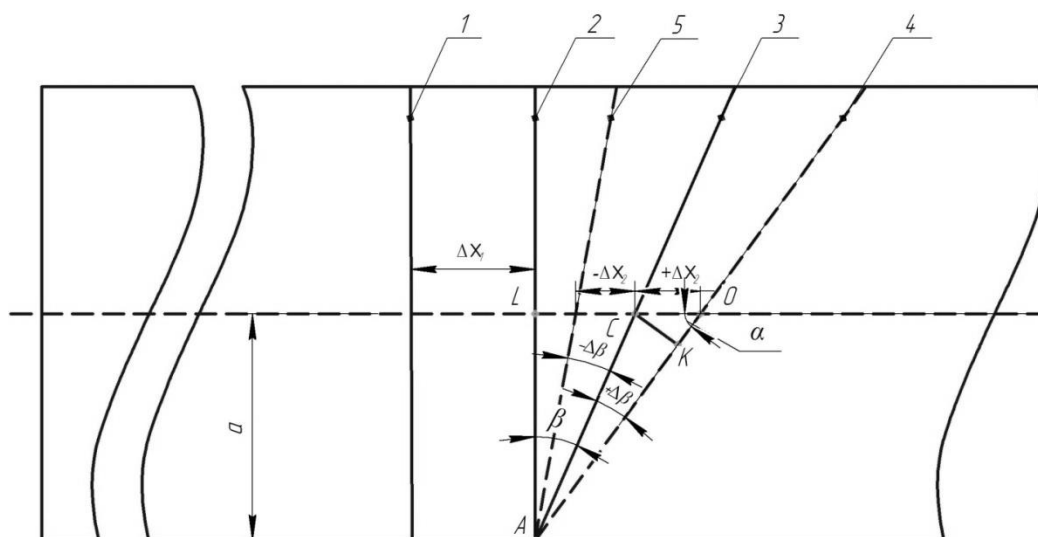


Рис. 1. Параметры позиционирования приемника ультразвукового датчика относительно излучателя акустической волны:
 1 – положение излучателя; 2 – положение приемника при параллельной установке;
 3 – положение приемника при установке с углом наклона β ;
 4, 5 – положения приемника при установке с углом наклона β при погрешности $\pm\Delta\beta$;
 ΔX_1 – погрешность установки вертикального приемника по оси X;
 $\pm\Delta X_2$ – погрешность установки наклонного приемника по оси X;
 β – угол наклона приемника при идеально точной установке;
 $\pm\Delta\beta$ – погрешность установки угла наклона; a – полуширина канала

С точки зрения оценки физико-механических свойств шерсти наиболее перспективным является использование наклонного приемника. Поэтому дальнейшую оценку влияния погрешности позиционирования произведем на основе анализа наклонного приемника.

Для треугольника ALO (рис. 1) справедливо соотношение $\beta + \Delta\beta + \frac{\pi}{2} + \alpha = \pi$. Тогда:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - (\beta + \Delta\beta), \quad (2)$$

Из треугольника ALO при условии $AC = \frac{a}{2}$ имеем $\sin \Delta\beta = \frac{CK}{AC}$.

Отсюда следует, что

$$CK = \frac{a}{2} \sin \Delta\beta. \quad (3)$$

Погрешность позиционирования приемника по оси распространения акустической волны ΔX может быть найдена из треугольника KCO:

$$\sin \alpha = \frac{CK}{\Delta X_2}. \quad (4)$$

Результатом ряда преобразований является:

$$\Delta X_2 = \frac{CK}{\sin \alpha} = \frac{a}{2} \cdot \frac{\sin \Delta\beta}{\sin \alpha} = \frac{a}{2} \cdot \frac{\sin \Delta\beta}{\sin(\frac{\pi}{2} - (\beta + \Delta\beta))} = \frac{a}{2} \cdot \frac{\sin \Delta\beta}{\cos(\beta + \Delta\beta)}.$$

В итоге имеем

$$\Delta X_2 = \frac{a}{2} \cdot \frac{\sin \Delta\beta}{\cos(\beta + \Delta\beta)}. \quad (5)$$

$$\Delta t_2 = \frac{\Delta X_2}{c}. \quad (6)$$

Рассмотрим две ситуации.

Ситуация первая. Приемник установлен абсолютно точно. Тогда среднее акустическое давление можно найти из выражения [8]:

$$P_{cp}^{(1)} = \frac{4P_0}{katg\beta} \sin \frac{katg\beta}{2}. \quad (7)$$

где P_0 – звуковое давление на оси ультразвукового пучка;

k – волновое число, $k = 2\pi f/c$;

f – частота ультразвуковой волны.

$$\omega t = \frac{k a t g \beta}{2}. \quad (8)$$

Ситуация вторая подразумевает смещение приемника по оси X и угла его наклона на угол $\Delta\beta$. В этом случае выражение для расчета среднего акустического давления примет вид:

$$P_{cp}^{(1)} = \frac{4P_0}{aktg(\beta - \Delta\beta)} [\sin(t + \Delta t_1 + \Delta t_2) - \sin(\omega(t + \Delta t_1 + \Delta t_2) - aktg(\beta - \Delta\beta))]. \quad (9)$$

Анализ показывает, что влияние на точность измерения тонины погрешности позиционирования приемника по оси X не соизмеримо мало по сравнению с влиянием погрешности позиционирования по углу β . В связи с этим в силу сказанного погрешностью позиционирования по оси X можно пренебречь и оценивать точность позиционирования только по углу β .

В этом случае выражение (9) принимает следующий вид:

$$P_{cp}^{(2)} = \frac{2}{aktg(\beta - \Delta\beta)} [\sin\omega(t + \Delta t_2) - (\sin(\omega t + \Delta t_2) - aktg(\beta - \Delta\beta))], \quad (10)$$

где Δt – время прохождения волной отрезок Δx , $\Delta t = \frac{\Delta x}{c}$.

После преобразований получаем:

$$P_{cp}^{(2)} = \frac{2}{aktg(\beta - \Delta\beta)} \left(\sin \left[\frac{ka}{2} t g \beta + \frac{\pi f a \sin \beta}{c \cos(\beta + \Delta\beta)} \right] - \sin \left(\frac{ka}{2} t g \beta + \frac{\pi f a \sin \beta}{c \cos(\beta + \Delta\beta)} - aktg(\beta + \Delta\beta) \right) \right). \quad (11)$$

Погрешность среднего давления, обусловленная погрешностью позиционирования приемника по углу установки:

$$\Delta P = P_{cp}^{(1)} - P_{cp}^{(2)}, \quad (12)$$

Подставив в формулу (12) выражения (9) и (11), получим:

$$\Delta P = \frac{4}{aktg\beta} \sin \frac{ka}{2} t g \beta - \frac{2}{aktg(\beta - \Delta\beta)} \left(\sin \left[\frac{ka}{2} t g \beta + \frac{\pi f a \sin \beta}{c \cos(\beta + \Delta\beta)} \right] - \sin \left(\frac{ka}{2} t g \beta + \frac{\pi f a \sin \beta}{c \cos(\beta + \Delta\beta)} - aktg(\beta + \Delta\beta) \right) \right). \quad (13)$$

На рисунке 2 представлены зависимости $P_{cp}/P_0=f(\beta)$ и $\Delta P_{cp}=f(\beta)$ для $ak=14$. Зависимость $P_{cp}/P_0=f(\beta)$ построена с использованием выражения (11), а $\Delta P_{cp}=f(\beta)$ – с использованием (13).

Анализ рисунка 2 показывает, что в точке Б второго максимума акустического давления ($\beta = 48^\circ$) погрешность ΔP как минимум в 1,7 раза меньше по сравнению с погрешностью той же величины на интервале А, которому соответствуют углы установки приемника β от 0 до 25° .

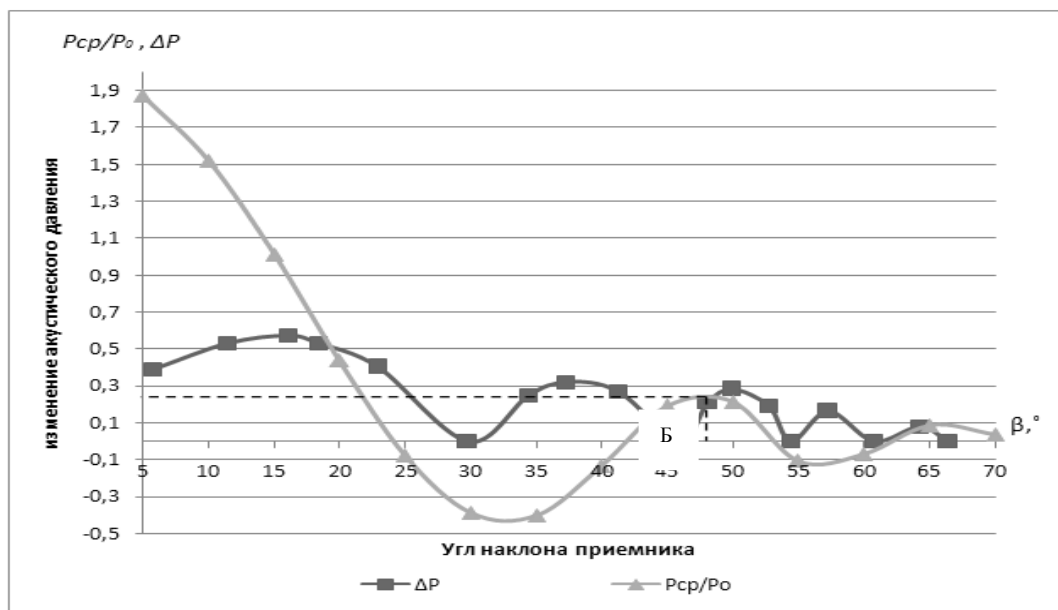


Рис. 2. Зависимость изменения относительной погрешности измерения ΔP и относительного давления значения среднего акустического давления P_{cp}/P_0 от угла установки приемника β при погрешности его позиционирования $\Delta\beta = \pm 5^\circ$

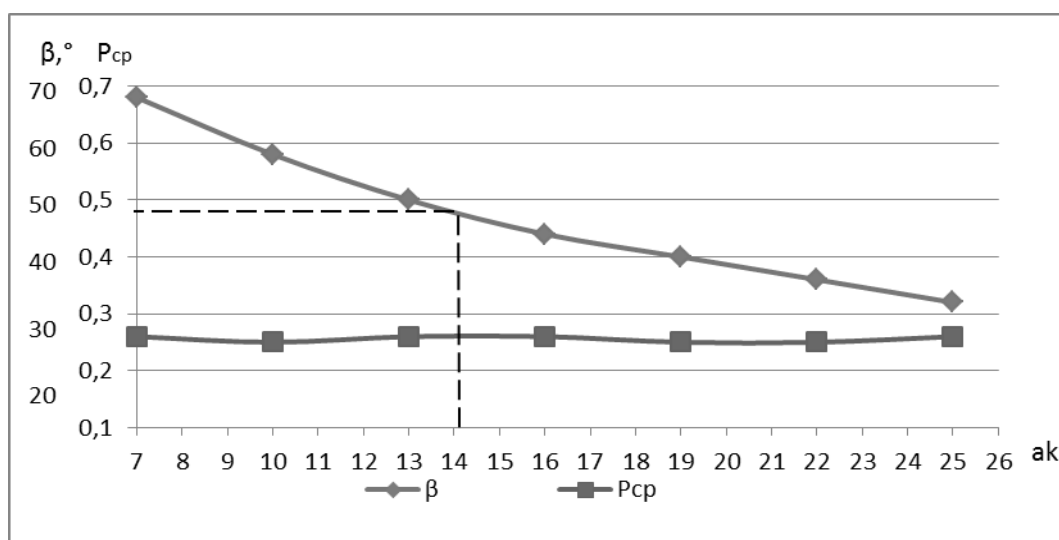


Рис. 3. График зависимости угла наклона приемника β и максимального среднего акустического давления P_{cp} от значения параметра ak

Расчеты показали, что аналогичная картина наблюдается и при других ak в диапазоне от 7 до 25. Для любого значения ak в указанном диапазоне можно утверждать, что при определении угла наклона, обеспечивающего максимальное значение среднего акустического давления с минимальной погрешностью, следует рассматривать третий интервал кривой распределения P_{cp} , в котором давление является положительным. Используя методику, изложенную выше, были рассчитаны значения максимального среднего давления P_{cp} и угла наклона приемника β в зависимости от коэффициента ak (рис. 3), анализ которых позволяет сделать следующий вывод: максимальное среднее давление остается постоянным в широком диапазоне изменения параметра ak ($ak=7...25$).

В частности при $ak=14$ угол наклона составляет $\approx 48^\circ$. Из этого следует, что в соответствии с формулой $k = 2\pi f/c$ при частоте 150 кГц полуширина канала a составляет 5 мм. Геометрические параметры акустического канала для заданной частоты могут быть определены и для других значений коэффициента ak .

Выводы

Проведенный анализ показывает, что на точность измерения тонины наибольшее влияние оказывает погрешность позиционирования приемника датчика по углу наклона к продольной оси распространения акустической волны.

Максимум среднего акустического давления при минимальной погрешности будет находиться в третьем интервале кривой распределения P_{cp}/P_0 .

Среднее акустическое давление, при оптимальном угле наклона приемника, остается постоянным в широком диапазоне изменения параметра акустического канала $ak=7...25$.

Библиографический список

1. 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.
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., Куницын Р.А., Калинин Ц.И. Повышение точности контроля объемной плотности неупорядоченных волоконных сред с помощью ультразвуковых датчиков // Ползуновский вестник. — 2011. — № 2/2. — С. 8-12.
4. Багаев А.А., Резинов В.Г., Куницын Р.А. Анализ влияния параметров измерительного канала и ультразвуковой волны на величину акустического давления при измерении тонины волоконных сельскохозяйственных материалов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2013. — № 11 (109). — С. 107-111.
5. Багаев А.А., Калинин Ц.И., Резинов В.Г., Куницын Р.А. Результаты исследования зависимости акустического давления ультразвуковых колебаний от массы образца неупорядоченного волоконного материала и диаметра волокон // Вестник Алтайского государственного аграрного

университета. – 2015. – № 3(125). – С. 117-122.

6. Способ определения тонины волокон. Патент № 2465582, G 01 N29/00, 2006 г. Российская Федерация / Калинин Ц.И., Кунитсын Р.А., Багаев А.А., ФГОУ ВПО Алтайский государственный аграрный университет. Оpubл. 27.10.12.

7. Илванов В.М., Кандрин Ю.В., Цымбалист В.А. Исследование распространения акустических волн в твердых телах и воздушных средах: монография. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2003. – 124 с.

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

References

1. Bagaev A.A., Kalinin Ts.I., Kunitsyn R.A. Matematicheskaya model ultrazvukovogo analizatora kachestva merinosnoy shersti // Vestnik Altayskogo agrarnogo universiteta. – 2010. – № 3 (65). – S. 72-75.

2. Bagaev A.A., Kalinin Ts.I., Kunitsyn R.A. Ultrazvukovoy pribor dlya issledovaniya merinosnoy shersti // Polzunovskiy vestnik. – 2010. – № 2. – S. 57-59.

3. Bagaev A.A., Kunitsyn R.A., Kalinin Ts.I. Povyshenie tochnosti kontrolya obemnoy plotnosti neuporyadochennykh volokonnykh sred s pomoshchyu ultrazvukovykh

datchikov // Polzunovskiy vestnik. – 2011. – № 2/2. – S. 8-12.

4. Bagaev A.A., Rezinov V.G., Kunitsyn R.A. Analiz vliyaniya parametrov izmeritelnogo kanala i ultrazvukovoy volny na velichinu akusticheskogo davleniya pri izmenenii toniny volokonnykh sel'skokhozyaystvennykh materialov // Vestnik Altayskogo agrarnogo universiteta. – 2013. – № 11 (109). – S. 107-111.

5. Bagaev A.A., Kalinin Ts.I., Rezinov V.G., Kunitsyn R.A. Rezultaty issledovaniya zavisimosti akusticheskogo davleniya ultrazvukovykh kolebaniy ot massy obraztsa neuporyadochennogo volokonnoy materiala i diametra volokon // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2015. – № 3 (125). – S.117-122.

6. Sposob opredeleniya toniny volokon. Patent № 2465582, G 01 N29/00, 2006 g. Rossiyskaya Federatsiya / Ts.I. Kalinin, R.A. Kunitsyn, A.A. Bagaev, FGOU VPO Altayskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet. Opubl. 27.10.12.

7. Ilvanov V.M., Kandrין Yu.V., Tsymbalist V.A. Issledovanie rasprostraneniya akusticheskikh voln v tverdykh telakh i vozdushnykh sredakh: monografiya. – Barnaul: Izd-vo АГАУ, 2003. – 124 s.

8. Ilvanov V.M., Kandrין Yu.V., Tsymbalist V.A. Fizicheskaya akustika: monografiya. – 2-e izd., dop. – Barnaul: Izd-vo АГАУ, 2004. – 158 s.

