

ми показателями – износом площади перекрытия лапы (I_s) и средним весовым износом (I_m).

3. Оптимальным сочетанием технологических факторов, обеспечивающим минимальный износ поверхностно-упрочненных стрельчатых лап, являются сплошное нанесение борирующей обмазки на предварительно зачищенные 2/3 обратной стороны режущей кромки лапы и ее носок, выдержка в индукторе при оптимальной температуре в течение 2 мин. и последующая объемная закалка.

Библиографический список

1. Беляев В.И. Ресурсосберегающие технологии – основа эффективного земледелия / В.И. Беляев // Алтай: село и город. – 2006. – № 6. – С. 26-27.

2. Циммерман М.З. Рабочие органы почвообрабатывающих машин / Циммерман М.З. – М.: Машиностроение, 1978. – 295 с.

3. Инаекян С.А. Повышение ресурса культиваторных стрельчатых лап / С.А. Инаекян, П.А. Рогозников, В.А. Цепулин, В.И. Гасилин, В.В. Коломиец, В.Н. Дворников, В.П. Хальков // Тракто-

ры и сельскохозяйственные машины. – 1991. – № 10. – С. 7-8.

4. Иванайский В.В. Влияние природы борирующего агента, флюсов и активаторов на характеристики покрытий, полученных при скоростном борировании легированных сталей / В.В. Иванайский, А.В. Ишков, Н.Т. Кривочуров, А.А. Максимов, Н.М. Мишустин // Ползуновский вестник. – 2010. – № 3. – С. 142-146.

5. Ишков А.В. Износостойкие боридные покрытия для почвообрабатывающих органов сельхозтехники / А.В. Ишков, Н.Т. Кривочуров, Н.М. Мишустин, В.В. Иванайский, А.А. Максимов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 9. – С. 71-75.

6. Винокуров В.Н. Исследование влияния длины носка лемеха и угла наклона затылочной фаски лезвия на глубину пахоты и тяговое сопротивление / В.Н. Винокуров, Г.И. Ларин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1973. – № 3. – С. 20-22.

7. Ткачев В.Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин / В.Н. Ткачев – М.: Машиностроение, 1971. – 264 с.



УДК 537.228.1(088.8)

Ю.В. Кандрин,
О.В. Цымбалист

АНАЛИЗ ОТРАЖАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ АКУСТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

Ключевые слова: акустический тракт, звуковое давление, удельная чувствительность, ультразвуковые колебания, отражающие грани.

В ультразвуковых устройствах контроля измеряемую величину воспринимает первичный преобразователь – акустический датчик. Он является единственным элементом устройства, имеющим непосредственный контакт с измеряемым объектом (жидкие удобрения, волокнистый продукт и т.д.) [1, 2]. В основном свойства первичного преобразователя обуславливают свойства всей системы контроля в целом и поэтому имеют решающее значение при построении устройств, предна-

значенных для применения в промышленности и сельском хозяйстве [2, 3]. Проведем анализ акустического тракта датчика.

Наклонное расположение приемной поверхности датчика определено требованиями, которые необходимо выполнять при измерениях звукового давления в волне. А при контроле плотности среды следует обеспечить отсутствие интерференции прямых и отраженных от приемника волн в зоне размещения контролируемого изделия.

Учитывая симметрию акустических полей реальных вибраторов, имеет смысл использования двух отражающих граней, расположенных в соответствии с рисунком 1.

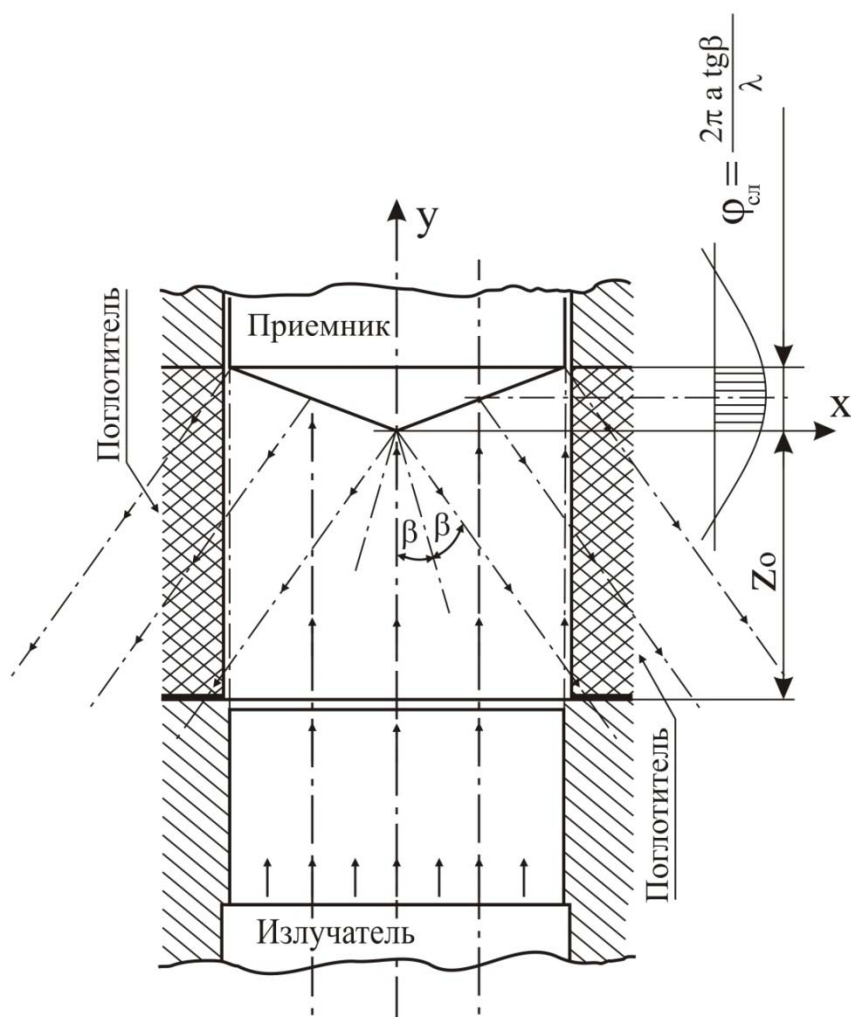


Рис. 1. Датчик с приемником, оснащенный двумя плоскими отражающими гранями

Вследствие симметрии кривых распределения звукового давления в УЗ-пучке для данного варианта акустического тракта достаточно рассмотреть одну из отражающих граней. Звуковое давление в падающей волне для изображенной на рисунке 1 координатной системы X и Y примет вид:

$$\tilde{P}_i = \bar{P}_i \exp \left[jk(n'_y y' - n'_x x') + j\omega t \right], \quad (1)$$

где n'_x и n'_y – направляющие косинусы углов между направлением распространения волны и осями X и Y , т.е.

$$\begin{aligned} n'_y &= I \cos(n, y'); \\ n'_x &= I \cos(n, x'), \end{aligned} \quad (2)$$

где y' и x' – проекции единичных волновых векторов на оси X , Y .

Звуковое давление в отраженной волне:

$$\tilde{P}_r = \bar{P}_r \exp \left[jk(n'_y y' - n'_x x') + j\omega t \right].$$

При условии абсолютно жесткой отражающей поверхности:

$$P = \bar{P}_i \left\{ \exp \left[jk(n'_y y' - n'_x x') \right] + \exp \left[jk(n'_y y' - n'_x x') \right] \right\} \cdot \exp j\omega t = 2\bar{P}_i \exp \left[j(kn'_x x') \cos kn'_y y' \right],$$

или в вещественной форме:

$$P = 2P_0 \cos(\omega t - kn'_x x') \cos kn'_y y' \quad (3)$$

При отражении бегущие компоненты по оси Y в падающей и отраженной волне интерферируют и образуют стоячую волну $\cos kn'_y y'$. $\cos(\omega t - kn'_x x')$ представляет собой бегущий по отражающей поверхности «след» волны. Волна давления отражается от абсолютно жесткой поверхности без изменения фазы:

$$y' = 0, \quad \cos kn'_y y' = 1,$$

и звуковое давление бегущего «следа» во времени и по оси X :

$$P = 2P_0 \cos(\omega t - kn'_x x') \quad (4)$$

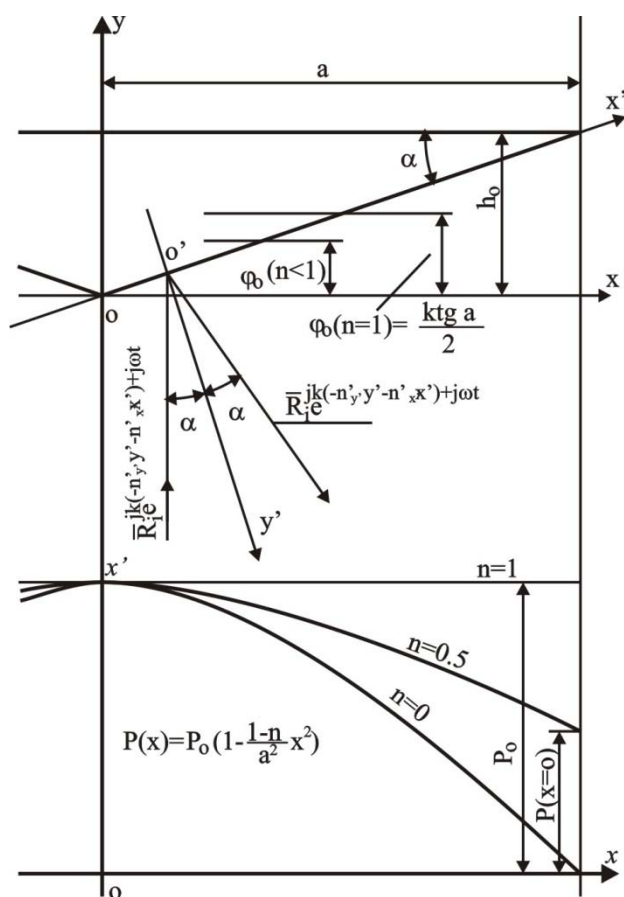


Рис. 2. Плоская отражающая поверхность

Для ограниченной отражающей поверхности размер «следа» определится величиной x, nx' . Обозначив угол между нормалью к отражающей поверхности и направлением распространения волны β и переходя к координатной системе X, Y , получим:

$$P = 2P_0 \cos(\omega t - kxtg\beta). \quad (5)$$

Данное выражение определяет мгновенные значения звукового давления на поверхности 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 ($P(x) = \text{const} = P$) среднее значение звукового давления на поверхности приемника будет равно

$$P = \frac{2}{a} \int_0^a P_0 \cos(\omega t - kxtg\beta) dx = \frac{2P_0}{k \operatorname{tg} \beta} [\sin \omega t - \sin(\omega t - katg\beta)]. \quad (6)$$

Чтобы определить фазу воспринимаемого сигнала, необходимо вычислить мо-

$$P = 2P(x) \cos(\omega t - katg\beta) = 2P_0 \left(1 - \frac{1-n}{a^2} x^2\right) \cos(\omega t - katg\beta), \quad (10)$$

а для усредненных значений P_{cp} по приемной поверхности:

мент времени, при котором выражение (6) принимает свое максимальное значение. Дифференцируя выражение (6) по времени, находим:

$$\frac{dP_{cp}}{dt} = \frac{2P_{0\omega}}{k \operatorname{tg} \beta} [\cos \omega t - \cos(\omega t - katg\beta)] \quad (7)$$

Приравняв к нулю множитель $\cos \omega t - \cos(\omega t - katg\beta)$, получим:

$$\begin{aligned} \cos \omega t - \cos \omega t \cos katg\beta - \\ - \sin \omega t \operatorname{sinkatg}\beta = 0; \\ \operatorname{tg} \omega t = \frac{1 \cos katg\beta}{\sin katg\beta} = \operatorname{tg} \frac{k \operatorname{tg} \beta}{2}; \\ \omega t = \frac{k \operatorname{tg} \beta}{2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Если обозначить $h_0 = atg\beta$, то для $h_0 = \lambda/4, \omega t = \pi/4$.

Таким образом, звуковое давление на поверхности приемника принимает максимальные значения в моменты времени, когда максимум давления в падающей волне находится в центре наклонной отражающей поверхности. Подставив в

формулу (6) значение $\omega t = \frac{k \operatorname{tg} \beta}{2}$, получим для амплитудных значений P_{cp} :

$$P_{cp} = \frac{4P_0}{k \operatorname{tg} \beta} \sin \frac{k \operatorname{tg} \beta}{2},$$

или с учетом того, что $atg\beta = h_0$:

$$P_{cp} = \frac{4P_0}{kh_0} \sin \frac{kh_0}{2}. \quad (9)$$

В соответствии с полученной формулой можно вычислить значения P_{cp} для отражателей различной толщины:

$$\begin{aligned} h_0 = \lambda/4 \quad P_{cp} &= 1,273 P_0; \\ h_0 = 3/8\lambda \quad P_{cp} &= 1,569 P_0; \\ h_0 = \lambda/4 \quad P_{cp} &= 1,801 P_0; \\ h_0 = \lambda/8 \quad P_{cp} &= 1,949 P_0. \end{aligned}$$

Полученные выше соотношения справедливы только при условии равномерного распределения звукового давления по сечению УЗ пучка, т.е. $P(x) = \text{const}$. С учетом выражения, характеризующего реальное распределение давления в пучке, найдем для мгновенных значений P в точке приемной поверхности с координатой X :

$$P_{cp} = \frac{2P_o}{a} \int_0^a \left(1 - \frac{1-n}{a^2} x^2\right) \cos(\omega t - katg\beta) = \frac{2P_o(1-n)}{a^3} \int_0^a \left(\frac{a^2}{1-n} - x^2\right) \cos(\omega t - katg\beta) dx .$$

Обозначив $ktg\beta = k$, где k – волновое число бегущей по приемной поверхности волны, найдем:

$$\begin{aligned} P_{cp} &= \frac{2P_o(1-n)}{a^3} \left[-\frac{a^2}{k_1(1-n)} \sin(\omega t - k_1 x) \right]_0^a - \int_0^a x^2 \cos(\omega t - k_1 x) dx = \\ &= \frac{2P_o(1-n)}{a^3} \left\{ -\frac{a^2}{k_1(1-n)} \sin(\omega t - k_1 x) \Big|_0^a - \left[-\frac{x^2}{k_1} \sin(\omega t - k_1 x) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{2x}{k_1^2} \cos(\omega t - k_1 x) + \frac{2}{k_1^3} \sin(\omega t - k_1 x) \Big|_0^a \right] \right\} = \frac{2P_o(1-n)}{a^3} \left[\left(\frac{a^2}{k_1} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{a^2}{k_1(1-n)} - \frac{2}{k_1^3} \sin(\omega t - k_1 a) - \frac{2a}{k_1^2} \cos(\omega t - k_1 x) - \left(-\frac{a^2}{k_1(1-n)} - \frac{2}{k_1^3} \right) \cdot \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \sin \omega t \right] = \frac{2P_o}{k_1 a} \left\{ \left[1 + \frac{2(1-n)}{a^2 k_1^2} \right] \sin \omega t - \left[n + \frac{2(1-n)}{k_1 a} \right] \sin(\omega t - k_1 a) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{2(1-n)}{k_1 a} \cos(\omega t - k_1 a) \right\} . \end{aligned} \quad (11)$$

Полученное выражение определяет усредненное значение звукового давления по приемной параболического распределения $P(x)$.

Если предположить $p(x) = const$, а $n = 1$, то:

$$P_{cp} = \frac{2P_o}{k_1 a} [\sin \omega t - \sin(\omega t - k_1 a)] ,$$

т.е. получаем соотношение (6), являющееся частным случаем решения задачи для равномерного распределения $P(x)$.

Приняв:

$$\left. \begin{aligned} 1 + \frac{2(1-n)}{a^2 k_1^2} &= A \\ n + \frac{2(1-n)}{a^2 k_1^2} &= B \\ \frac{2(1-n)}{a k_1} &= C \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

и дифференцируя (11) и приравняв полученное выражение к нулю, определим фазу воспринимаемых приемником колебаний:

$$\frac{dP_{cp}}{dt} = \frac{2P_o}{k_1 a} [A \sin \omega t - B \sin(\omega t - k_1 a) - \cos(\omega t - k_1 a)]' = 0 ;$$

$$A \cos \omega t - B(\cos \omega t \cos k_1 a + \sin \omega t \sin k_1 a) + C(\sin \omega t \cos k_1 a - \cos \omega t \sin k_1 a) = 0 ;$$

$$tg \omega t = \frac{B \cos k_1 a + C \sin k_1 a}{C \cos k_1 a - B \sin k_1 a} . \quad (13)$$

Отсюда:

$$\omega t = arctg \frac{B \cos k_1 a + C \sin k_1 a - A}{C \cos k_1 a - B \sin k_1 a} . \quad (14)$$

Анализируя формулы (11) и (14), заметим, что при конкретных величинах h_o и граничном значении переменной n переходим к решению задачи для равномер-

ного распределения звукового давления. Например, $h_o = \lambda/4$, тогда $k_1 a = \pi/2$ и выражение (14) принимает вид:

$$\omega t = \arctg \frac{A-C}{B} = \frac{1 + \frac{2(1-n)}{a^2 k_1^2} - \frac{2(1-n)}{a k_1}}{n + \frac{2(1-n)}{a^2 k_1^2}},$$

и если распределение равномерное ($n = 1$), то

$$\omega t = \arctg 1 = \frac{n}{4} = 45^\circ,$$

т.е. получаем частный случай решения задачи (формула (8)).

Для параболического распределения с $n = 0,5$:

$$\omega t = 40,3^\circ.$$

Таким образом, неравномерность распределения звукового давления в УЗ-пучке влечет за собой изменение фазы воспринимаемых колебаний. Фаза «следа» волны, а следовательно, и фаза сигнала приемника, при которой усредненное звуковое давление принимает свое максимальное значение при параболическом распределении, смещается в сторону максимума звукового давления, т.е. к оси УЗ-пучка.

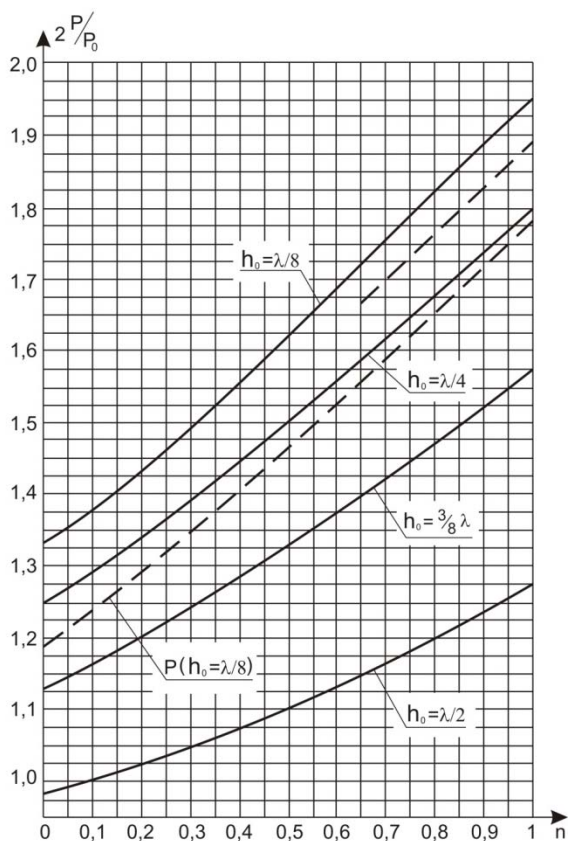


Рис. 3. Зависимость среднего звукового давления на поверхности приемника с наклонным отражателем от характера распределения звукового давления в пучке

На рисунке 3 приведены зависимости фазы сигнала приемника от характера распределения звукового давления в пучке:

$$a(n) = \omega t(n) = \arctg \frac{B \cos k_1 a + C(n) \sin k_1 a - A(n)}{C(n) \cos k_1 a - B(n) \sin k_1 a} \quad (15)$$

Здесь в качестве переменной принята величина $n = P(a)/P_0$, характеризующая вид параболического распределения $P(x)$. Графики построены для фиксированных значений высоты отражателя:

$h_0 = \lambda/8; \lambda/4; 3/8\lambda; \lambda/2$, для которых $ak_1 = h_0 k = const$.

Значения фазы при $n = 1$ соответствуют фазе сигнала при равномерном распределении $P(x)$. Подставляя в формулу (5.11) значения $\omega t = a(n)$, которым соответствует максимум усредненного давления по приемной поверхности, легко определяется зависимость $P_{cp} = f(n)$. Зависимости приведены на рисунке 4.

Значения P_{cp} при $n = 1$ соответствуют вычисленным ранее по формуле (5.9) для равномерного распределения звукового давления в пучке.

По полученным формулам рассчитаны кривые распределения мгновенных значений звукового давления по наклонной приемной поверхности. Зависимости (для $n = 0,9$ и $0,7$) приведены на рисунке 4.

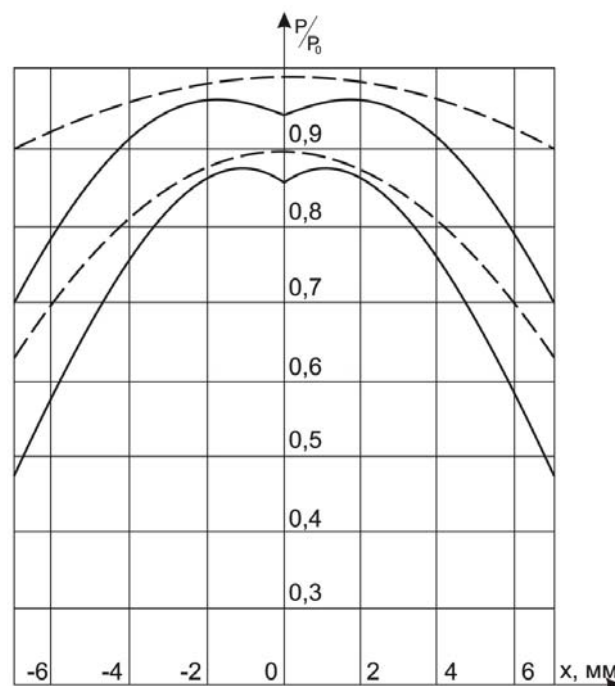


Рис. 4. Распределение звукового давления по поверхности приемника с плоскими отражающими гранями

Учитывая, что при наличии в акустическом тракте контролируемой среды $P(x) = P_0 e^{-\alpha_1 h \rho_v(x)}$, а чувствительность S в точке приемной поверхности с координатой x определяется как $S = \frac{dP(x)}{d\rho_v(x)}$,

полученные зависимости в полной мере характеризуют удельную чувствительность приемной поверхности. Форма кривых распределения показывает, что в результате смещения фазы "следа" волны к оси УЗ пучка наибольшее снижение звукового давления происходит в крайних точках сечения пучка.

Таким образом, в условиях приема УЗ-колебаний преобразователем с наклонными отражающими гранями происходит определенное увеличение неравномерности мгновенных распределений звукового давления по приемной поверхности. Это увеличение обусловлено наложением на исходное распределение $P(x)$ «следа» волны, смещенного к оси УЗ пучка, а само смещение зависит от параметров распределения $P(x)$. Так как влияние «следа» наименьшее при минимальных величинах h_0 и наибольшем значении параметра n , то очевидно, что при соблюдении условий отсутствия в зоне размещения материала

отраженных от поверхности приемника волн, следует найти оптимальное решение для образующих отражающие грани, обеспечивающих наименьший размер «следа» и наименьшее расстояние от волноводной части датчика до приемника. Переменная кривизна симметрично расположенных отражающих граней приемника дает возможность варьирования соотношениями параметров акустического тракта и получения минимальной неравномерности удельной чувствительности приемной поверхности.

Библиографический список

1. Кикучи Е.Д. Ультразвуковые преобразователи / Е.Д. Кикучи. – М.: Мир, 1972. – 424 с.
2. А.с. 1659542 СССР МКИ Д01Н13/32. Датчик для контроля линейной плотности волокнистого продукта / В.М. Иливанов, В.А. Цымбалист; заявитель и патентообладатель Алт. сельскохозяйственный институт. № 4472311/12; заявл. 30.06.88; опубл. 30.09.91, бюл. № 24. – 4 с.
3. Иливанов В.М. Физическая акустика: монография / В.М. Иливанов, Ю.В. Кандрин, В.А. Цымбалист. – 2-е изд., доп. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2004. – 158 с.

