

АНАЛИЗ РАБОТЫ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ И НЕРЕГУЛЯРНОСТИ КОНТРОЛИРУЕМОЙ СРЕДЫ

виях сильных тепловых, механических и других влияющих факторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Седалищев, В.Н., Хомутов, О.И. Высокочувствительные пьезорезонансные датчики с использованием связанных колебаний для экстремальных условий эксплуатации: монография. Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006.
2. Балыков, А.В. Принципы построения и области применения интеллектуальных измерительных устройств, основанных на использовании связанных колебаний в пьезорезонансных

датчиковых структурах / А.В. Балыков. Ползуновский альманах №2. ВИС-2008, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, 2008, – С. 93-95.

3. Тицнер, А.О. Анализ принципов построения пьезорезонансных датчиков, основанных на использовании связанных колебаний / А.О. Тицнер - Ползуновский альманах №2. ВИС-2008, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, 2008, – С. 104.

Аспиранты Тицнер А.О., Балыков А.В., студенты Назаров А.С., Тятюхин А.А., Ларионов М.Ю., д.т.н., профессор Седалищев В.Н. – Алтайский гостехуниверситет, тел. (3852) 26-04-92

УДК 537.228.1(088.8)

АНАЛИЗ РАБОТЫ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ И НЕРЕГУЛЯРНОСТИ КОНТРОЛИРУЕМОЙ СРЕДЫ

Н.П. Воробьев, Ю.В. Кандрин, О.В. Цымбалист

Приведено теоретическое обоснование особенностей проектирования ультразвуковых преобразователей для контроля нерегулярных волоконных сред.

Ключевые слова: ультразвук, преобразователь, контроль, нерегулярный, волоконный, акустический, волна, давление, приемник.

Целью работы является теоретическое обоснование путей построения ультразвуковых (УЗ) датчиков для контроля слабодисперсных нерегулярных волоконных сред, которые всегда связаны с минимизацией погрешностей измерений, достижением необходимой чувствительности и разрешающей способности проектируемых устройств.

В соответствии с требованиями обеспечения режима бегущей волны в зоне размещения контролируемого материала (в зоне с изменяемыми параметрами среды), а также достижения наиболее равномерной удельной чувствительности датчика по поверхности прозвучивания, необходимо проанализировать работу акустического тракта при приеме плоской амплитудно-модулированной по фронту волны преобразователем с наклонными отражающими гранями.

В результате анализа требуется получить для амплитуды и фазы воспринимаемых приемником колебаний необходимые расчетные соотношения, которые, с учетом полученных в [1] экспериментальных данных, могут дать объективную количественную оценку важнейшего параметра разрабатываемого датчика – удельной чувствительности прием-

ной поверхности, а также выявить возможные пути минимизации неравномерности удельной чувствительности.

Анализ работы датчика в условиях нерегулярной волоконной структуры имеет целью установление оптимальных (по критерию минимизации погрешности измерений) параметров датчика для заданных пределов изменения входного параметра.

Анализ приема акустических колебаний преобразователем с наклонными отражающими гранями

Наклонное расположение приемной поверхности обусловлено 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 только в зоне размещения контролируемого изделия.

Синтезированное в [1] построение акустического тракта (рисунок 1), очевидно, не может являться единственным и, тем более, оптимальным вариантом.

Учитывая симметрию акустических полей реальных вибраторов, имеет смысл исполь-

РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

зования двух отражающих граней, расположенных в соответствии с рисунком 2.

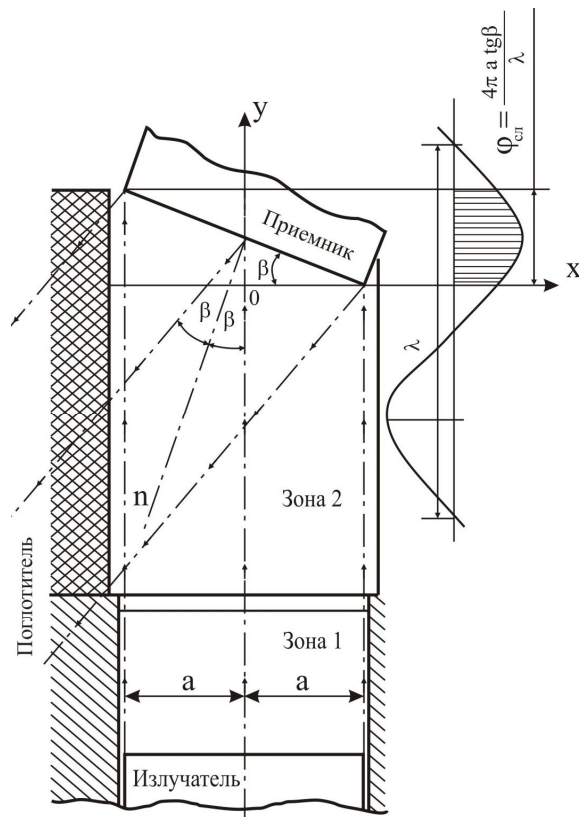


Рисунок 1 - Акустический тракт датчика с наклонным расположением приемной поверхности

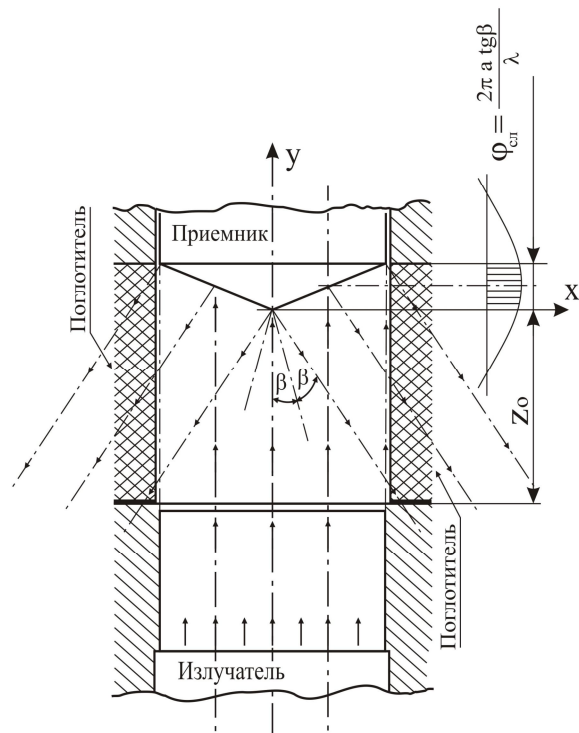


Рисунок 2 - Датчик с приемником, оснащенным двумя плоскими отражающими гранями

При тех же расчетных соотношениях последний вариант позволяет получить вдвое меньшие размеры "следа" волны и вдвое меньшее расстояние от зоны размещения среды до приемника.

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 3 координатной системы X, 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.

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

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

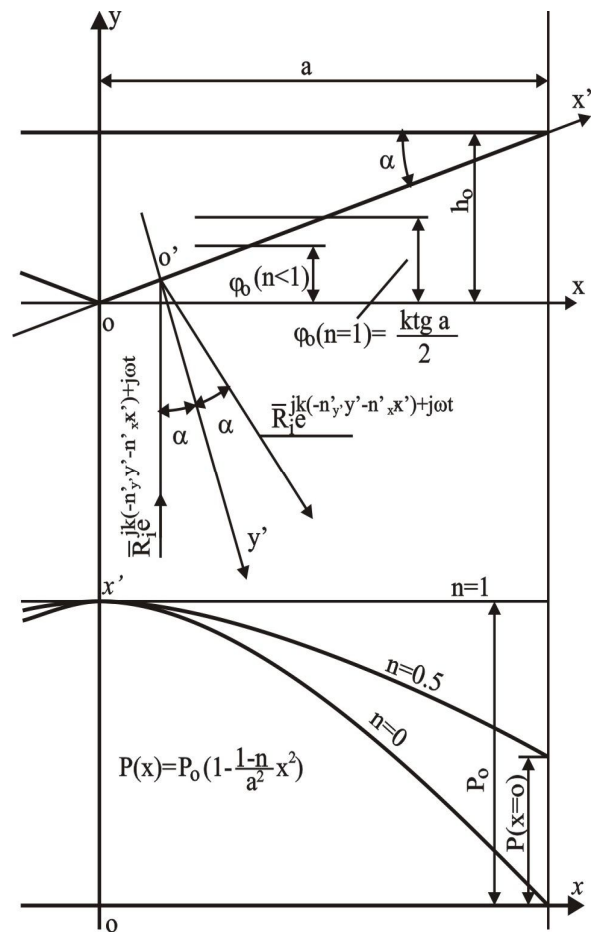


Рисунок 3 - Плоская отражающая поверхность

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:

$$\begin{aligned} P &= \bar{P}_i \left\{ \exp \left[jk(n_y' y' - n_x' x') \right] + \right. \\ &+ \left. \exp \left[jk(n_y' y' - n_x' x') \right] \right\} \exp j\omega t = \\ &= 2\bar{P}_i \exp \left[j(kn_x' x',) \cos kn_y' y' \right], \end{aligned}$$

или в вещественной форме:

$$P = 2P_o \cos(\omega t - kn_x' x') \cos kn_y' y'. \quad (3)$$

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 $y' = 0$, $\cos kn_y' y' = 1$, и звуковое давление бегущего "следа" во времени и по оси X

$$P = 2P_o \cos(\omega t - kn_x' x') \quad (4)$$

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:

$$P = 2P_o \cos(\omega t - kx \operatorname{tg} \beta). \quad (5)$$

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:

$$\begin{aligned} P &= \frac{2}{a} \int_0^a P_o \cos(\omega t - kx \operatorname{tg} \beta) dx = \\ &= \frac{2P_o}{k \operatorname{tg} \beta} [\sin \omega t - \sin(\omega t - k \operatorname{tg} \beta)] \end{aligned} \quad (6)$$

Чтобы определить фазу воспринимаемого сигнала, необходимо вычислить момент времени, при котором выражение (6) принимает свое максимальное значение. Дифференцируя выражение (6) по времени, находим

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

Приравняв нулю сомножитель $\cos \omega t - \cos(\omega t - k \operatorname{tg} \beta)$, получим, что

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

Если обозначить $h_o = a \operatorname{tg} \beta$, то для $h_o = \lambda/4$, $\omega t = \pi/4$.

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}

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

Или, с учетом того, что $a \operatorname{tg} \beta = h_o$

$$P_{cp} = \frac{4P_o}{kh_o} \sin \frac{kh_o}{2} \quad (9)$$

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

$$\left. \begin{aligned} h_o &= \lambda/4, P_{cp} = 1,273 P_o \\ h_o &= 3/8 \lambda, P_{cp} = 1,569 P_o \\ h_o &= \lambda/4, P_{cp} = 1,801 P_o \\ h_o &= \lambda/8, P_{cp} = 1,949 P_o \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Полученные выше соотношения справедливы только при условии равномерного распределения звукового давления по сече-

РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

нию УЗ пучка, т.е. $P(x) = \text{const}$. С учетом известных соотношений [1], характеризующих реальное распределение давления в пучке, найдем для мгновенных значений P в точке приемной поверхности с координатой X

$$P = 2P(x) \cos(\omega t - katg\beta) = 2P_o(1 - \frac{1-n}{a^2}x^2) \cos(\omega t - katg\beta), \quad (11)$$

а для усредненных значений P_{cp} по приемной поверхности

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

Обозначив $ktg\beta = k_1$, где k_1 - волновое число бегущей по приемной поверхности волны, найдем

$$\begin{aligned} P_{cp} &= \frac{2P_o(1-n)}{a^3} \left[-\frac{a^2}{k_1(1-n)} \sin(\omega t - k_1x) \right]_0^a - \\ &- \int_0^a x^2 \cos(\omega t - k_1x) dx = \\ &= \frac{2P_o(1-n)}{a^3} * \\ &* \left\{ -\frac{a^2}{k_1(1-n)} \sin(\omega t - k_1x) \Big|_0^a - \left[-\frac{x^2}{k_1} \sin(\omega t - k_1x) + \right. \right. \\ &+ \frac{2x}{k_1^2} \cos(\omega t - k_1x) + \frac{2}{k_1^3} \sin(\omega t - k_1x) \Big|_0^a \left. \right\} = \\ &= \frac{2P_o(1-n)}{a^3} \left[\left(\frac{a^2}{k_1} - \frac{a^2}{k_1(1-n)} - \frac{2}{k_1^3} \sin(\omega t - k_1a) - \right. \right. \\ &- \frac{2a}{k_1^2} \cos(\omega t - k_1a) - \left. \left(-\frac{a^2}{k_1(1-n)} - \frac{2}{k_1^3} \right) * \right. \\ &* \sin \omega t \left. \right] = \\ &= \frac{2P_o}{k_1a} \left\{ \left[1 + \frac{2(1-n)}{a^2k_1^2a} \right] \sin \omega t - \left[n + \frac{2(1-n)}{k_1a} \right] * \right. \\ &* \sin(\omega t - k_1a) - \end{aligned}$$

$$- \frac{2(1-n)}{k_1a} \cos(\omega t - k_1a) \}. \quad (12)$$

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

Если предположить $p(x) = \text{const}$, а $n = 1$, то

$$P_{cp} = \frac{2P_o}{k_1a} [\sin \omega t - \sin(\omega t - k_1a)]$$

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

Приняв

$$\left. \begin{aligned} 1 + \frac{2(1-n)}{a^2k_1^2} &= A, \\ n + \frac{2(1-n)}{a^2k_1^2} &= B, \\ \frac{2(1-n)}{ak_1} &= C \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

и дифференцируя (12), и приравняв полученное выражение к нулю, определим фазу воспринимаемых приемником колебаний

$$\begin{aligned} \frac{dP_{cp}}{dt} &= \frac{2P_o}{k_1a} * \\ &* [A \sin \omega t - B \sin(\omega t - k_1a) - \cos(\omega t - k_1a)]' = \\ &= 0; \\ A \cos \omega t - B(\cos \omega t x \cos k_1a + \sin \omega t x \sin k_1a) + \\ &+ C(\sin \omega x \cos k_1a - \cos \omega t x \sin k_1a) = 0; \\ tg \omega t &= \frac{B \cos k_1a + C \sin k_1a}{C \cos k_1a - B \sin k_1a}. \quad (14) \end{aligned}$$

Отсюда:

$$\omega t = \arctg \frac{B \cos k_1a + C \sin k_1a - A}{C \cos k_1a - B \sin k_1a}. \quad (15)$$

Анализируя формулы (12) и (15), легко заметить, что при конкретных величинах h_o и граничном значении переменной n переходим к решению задачи для равномерного распределения звукового давления. Например, $h_o = \lambda/4$, тогда $k_1a = \pi/2$ и выражение (15) принимает вид

АНАЛИЗ РАБОТЫ АКУСТИЧЕСКОГО ТРАКТА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ И НЕРЕГУЛЯРНОСТИ КОНТРОЛИРУЕМОЙ СРЕДЫ

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

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

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

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

Для параболического распределения с $n = 0,5$ и $\omega t = 40,3^\circ$.

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.

На рисунке 4 приведены зависимости $P_{cp} = f(n)$ с учетом изменения фазы сигнала приемника от характера распределения звукового давления в пучке

$$\alpha(n) = \omega t(n) = \arctg \frac{B \cos k_1 a + C(n) \sin k_1 a - A(n)}{C(n) \cos k_1 a - B(n) \sin k_1 a} \quad (16)$$

Здесь в качестве переменной принята величина $n = P(a)/P_0$, характеризующая вид параболического распределения $P(x)$. Графики построены для фиксированных значений высоты отражателя $h_0 = \lambda/8; \lambda/4; 3\lambda/8; \lambda/2$, для которых

$$a k_1 = h_0 k = \text{const}.$$

Значение фазы при $n=1$ соответствует фазе сигнала при равномерном распределении $P(x)$. Подставляя в формулу (12) значения $\omega t = \alpha(n)$, которому 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 формулам (9) и (10) для равномерного распределения звукового давления в пучке.

По полученным формулам рассчитаны кривые распределения мгновенных значений

звукового давления по наклонной приемной поверхности. Расчеты выполнены на вычислительной управляющей микросистеме по программе "Акустическое поле датчика". Зависимости (для $n = 0,9$ и $0,7$) приведены на рисунке 5.

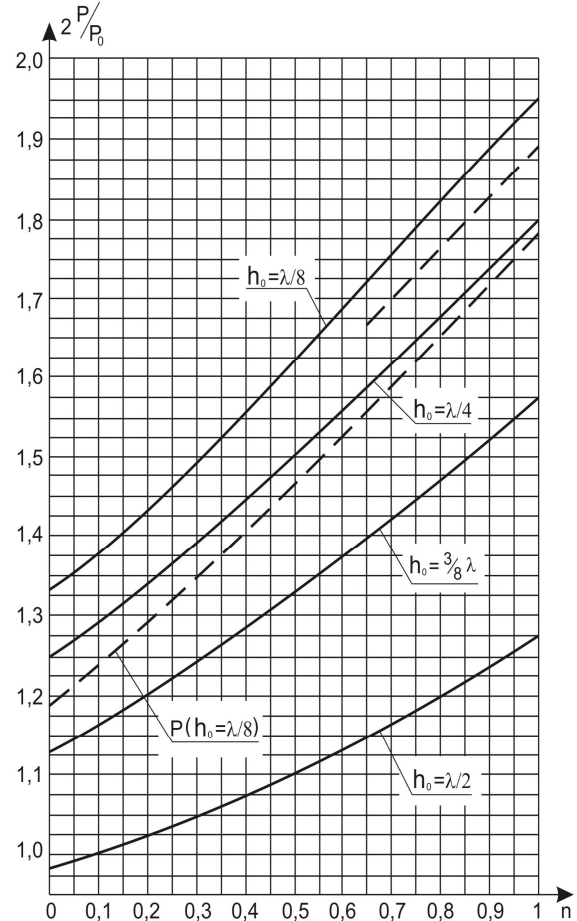


Рисунок 4 - Зависимость среднего звукового давления на поверхности приемника с наклонным отражателем от характера распределения звукового давления в пучке

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

$$S = \frac{dP(x)}{d\rho_v(x)},$$

то полученные зависимости в полной мере характеризуют удельную чувствительность приемной поверхности. Форма кривых рас-

РАЗДЕЛ I. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ СИНТЕЗА И АНАЛИЗА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

предела показывает, что в результате смещения фазы "следа" волны к оси УЗ пучка наибольшее снижение звукового давления происходит в крайних точках сечения пучка.

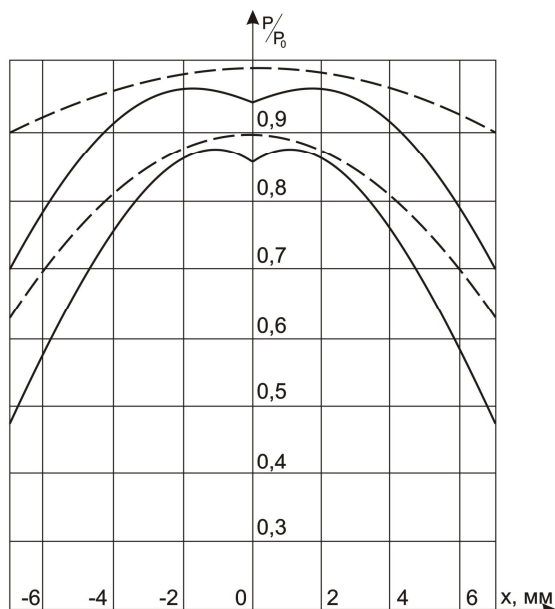


Рисунок 5 - Распределение звукового давления по поверхности приемника с плоскими отражающими гранями

Выводы:

- 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 θ_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 (по экспериментальным данным n имеет большее значение при меньших z , рисунок 5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Иливанов, В. М. Физическая акустика: монография / В. М. Иливанов, Ю. В. Кандрин, В. А. Цымбалист; Алт. гос. аграрн. ун-т. — Барнаул: Изд-во АГАУ, 2004. — 158 с.: ил.

д.т.н., профессор **Воробьев Н.П.** — Алтайский государственный технический университет, каф. ЭПБ, (Барнаул), тел. (3852) 24-74-88, 36-71-29, e-mail: vnprol51p@ya.ru, директор фирмы «АККОН» **Кандрин Ю.В.** (Барнаул) — тел.(3852) 55-04-27, 77-35-44, к.т.н., профессор **Цымбалист В.А.** (Барнаул) — (3852) 77-48-47.