

УДК 534.86

## СТРУКТУРА АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПАРАБОЛОИДНЫХ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

*В. И. БОРИСОВ, С. С. СЕРГЕЕВ, А. П. МАГИЛИНСКИЙ,  
Е. Н. ПРОКОПЕНКО*

ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет»

Могилев, Беларусь

UDC 534.86

## THE STRUCTURE OF THE ACOUSTIC FIELD OF THE RADIATION PARABOLICAL FOCUSING PIEZOELECTRIC TRANSDUCER

*V. I. BORISOV, S. S. SERGEEV, A. P. MAGILINSKY,  
E. N. PROKOPENKO*

### Аннотация

Методом численного анализа рассчитано акустическое поле излучения фокусирующих акустических преобразователей на основе параболоидных пьезопластин. Показано, что в дальней зоне на оси пьезопластины акустическое давление имеет меньшее значение, чем во внеосевой области.

### Ключевые слова:

акустическое поле, пьезоэлектрический преобразователь, пьезопластина, параболоид вращения, ближняя зона, дальняя зона, фокусирующий пьезопреобразователь, фокусное расстояние, диаметр пучка, активный концентратор.

### Abstract

By method of the numerical analysis is calculated acoustic field of the radiation focusing acoustic converters on base parabolical piezoelectric crystal plates. It is shown that in far zone on axis piezoelectric crystal plates acoustic pressure is less than on outside of axis.

### Key words:

acoustic field, piezoelectric transducer, piezoelectric crystal plates, paraboloid of rotation, near zone, far-field zone, focusing piezoelectric transducer, focal length, acoustic bunch, active concentrator.

Аналитическое решение при расчете акустического поля фокусирующих ПЭП удается получить лишь для точек, расположенных на акустической оси пьезопластины в виде участка сферической поверхности (активного концентратора) [1]. В предлагаемой работе приведены результаты анализа акустического поля излучения пьезопластин в виде параболоида вращения для непрерывного возбуждения акустических волн.

Расчетная схема ПЭП в виде круглой пластины в виде параболоида вращения площадью  $S$  приведена на рис. 1.

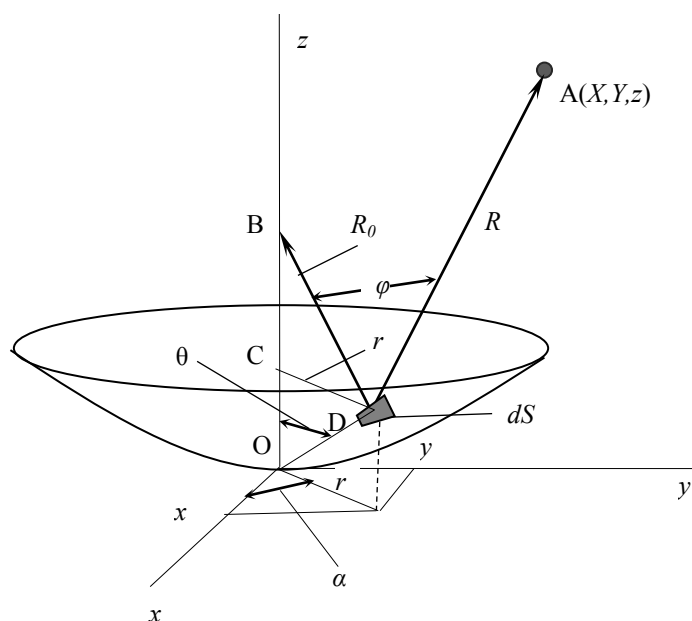


Рис. 1. Схема для расчета акустического поля параболоидного ПЭП

Уравнение параболоида имеет вид

$$2qz = x^2 + y^2, \quad (1)$$

где  $q$  – параметр параболы, определяющий ее кривизну;  $\vec{R}_0$  – вектор, начало которого совпадает с центром элементарной площадки  $dS$ , а конец – с осью пьезопластины.

Результирующая величина давления в точке  $A$  с координатами  $X, Y, z$  будет пропорциональна следующему интегралу

$$P(X, Y, z) = \int_S \frac{P_0}{R} \cos \varphi (\cos(\omega t - kR)) dS = \int_S \frac{P_0}{R} \cos \varphi \left( \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{\lambda} R \right) \right) dS. \quad (2)$$

В этом выражении  $R$  – расстояние от точечного излучателя площадью  $dS$ , расположенного в точке с координатами  $x, y, z_0$  до точки  $A$ ;  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – модуль волнового вектора (волновое число);  $\lambda$  – длина волны в материале среды, где распространяется акустическая волна.

В выражении (2) считаем, что от элементарного излучателя площадью  $dS$  излучается сферическая акустическая волна, это соответствует физической действительности, если размер площадки значительно меньше расстояния от площадки до рассматриваемой точки. Коэффициент  $\cos \varphi$ , учитывает наклон элементарной площадки к направлению на рассматриваемую точку [1]. В соответствии с рис. 1, векторы  $\vec{R}_0$  и  $\vec{R}$  в декартовой системе координат выражаются следующим образом:

$$\vec{R}_0 = -x\vec{i} - y\vec{j} + q\vec{k}; \quad (3)$$

$$\vec{R} = (X - x)\vec{i} + (Y - y)\vec{j} + \left( z - \frac{x^2 + y^2}{2q} \right)\vec{k}. \quad (4)$$

Расчет интеграла (1) будем проводить путем численного интегрирования, проводя замену интеграла суммой по методике, изложенной в работе [2–4]. После разделения временных и пространственных координат, в соответствии с работой [4], для искомой суммы получается выражение

$$P(X, Y, z) = P_0 \Delta \theta \Delta \alpha \sqrt{\left( \sum_0^N \frac{OD^2 \sin \theta}{R} \cos \varphi \cos \frac{2\pi}{\lambda} R \right)^2 + \left( \sum_0^N \frac{OD^2 \sin \theta}{R} \cos \varphi \sin \frac{2\pi}{\lambda} R \right)^2}, \quad (5)$$

которое пропорционально величине акустического давления в точке А.

$$\sin \theta = \frac{CD}{OD} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{x^2 + y^2 + \left( \frac{x^2 + y^2}{2q} \right)^2}}. \quad (6)$$

Полученное выражение (5) позволяет определить амплитуду давления  $P$  (в произвольных единицах) акустической волны, генерируемой пьезопластиной в любой точке полупространства.

На рис. 2 приведено распределение давления  $P$  на разном расстоянии от вершины параболоида на оси параболической пьезопластины диаметром 12 мм и параметром параболы  $q=12,5$  мм, что соответствует стреле прогиба 1,44 мм; на рис. 3 – диаметром 24 мм и  $q=12,5$  мм, что соответствует стреле прогиба 5,76 мм; на рис. 4 – диаметром 12 мм и  $q=25$  мм, что соответствует стреле прогиба 0,72 мм; а на рис. 5 – диаметром 24 мм и параметром параболы 25, мм что соответствует стреле прогиба 2,88 мм.

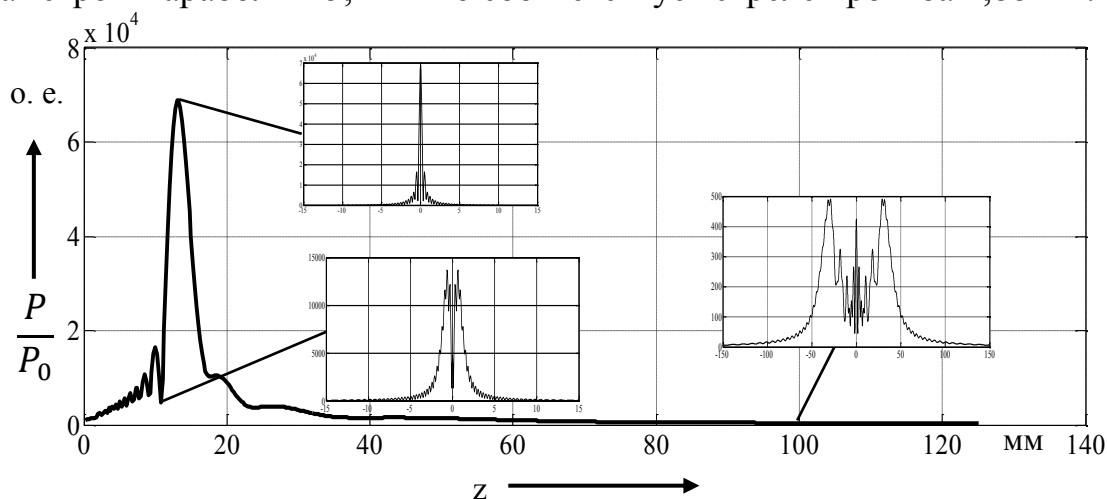


Рис. 2. Распределение давления акустической волны вдоль оси параболической пьезопластины с параметром параболы 12,5 мм и диаметром 12 мм

На вставках всех рисунков приведены диаметральные поперечные распределения акустического поля в плоскостях, перпендикулярных оси пьезопластины, на разных расстояниях от вершины пьезопластины. Для



главного максимума и последнего минимума диаметрально поперечное распределение поля представлено в диапазоне от -15 до 15 мм вдоль оси  $x$  (рис. 2, 3 и 5), для рис. 4 – в диапазоне от -20 до 20 мм, а для расстояния 100 мм от центра пьезопластины вдоль оси  $z$  – от -150 до 150 мм (рис. 2, 3 и 5), для рис. 4 – от -100 до 100 мм.

Расстояния на горизонтальной оси вставок приведены в миллиметрах, а давления в относительных единицах. Пьезопластины нагружены на воду и работают в непрерывном режиме на резонансной частоте 5 МГц.

Проведенный анализ показал, что для всех рассмотренных пьезопластин с разными размерами в распределении давления акустической волны вдоль оси параболической пьезопластины можно выделить ближнюю и дальнюю зоны с разным характером изменения давления акустической волны. В диаметрально сечении в плоскости, перпендикулярной оси пьезопластины на фокальном расстоянии от пластины наблюдается центральный максимум, амплитуда которого превышает значение боковых максимумов, а на расстоянии, где наблюдается последний минимум поле носит изрезанный характер.

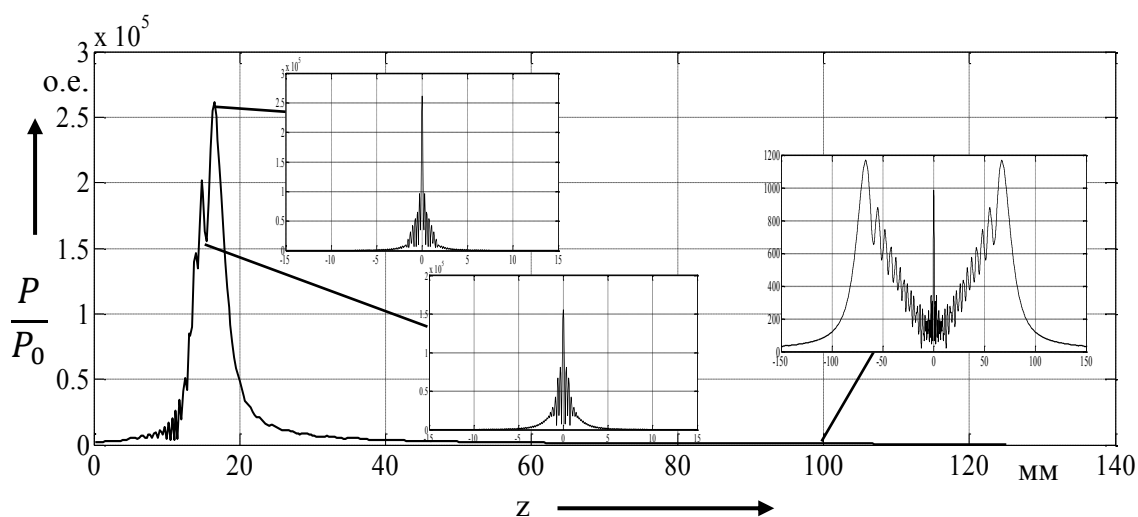


Рис. 3. Распределение давления акустической волны вдоль оси параболической пьезопластины с параметром параболы 12,5 мм и диаметром 24 мм

Для пьезопластин с диаметром большим, чем значение параметра параболы  $q$  (рис. 3) наблюдается смещение последнего минимума в область главного максимума.

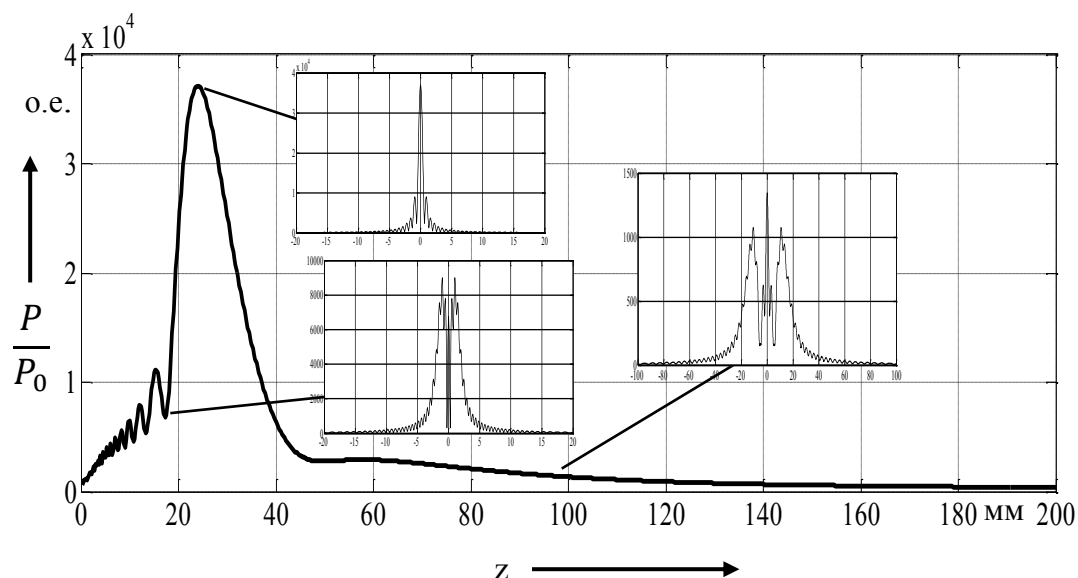


Рис. 4. Распределение давления акустической волны вдоль оси параболической пьезопластины с параметром параболы 25 мм и диаметром 12 мм

Распределение давления в этой области в диаметральном сечении носит неравномерный характер с максимальным значением на оси пьезопластины. Характер распределения давления в точке главного максимума и в дальней зоне аналогичен предыдущему случаю.

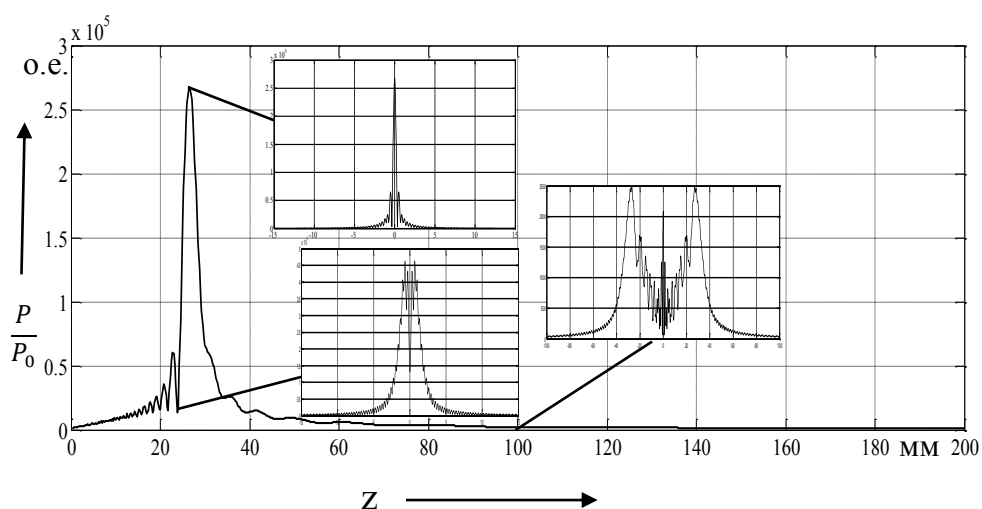


Рис. 5. Распределение давления акустической волны вдоль оси параболической пьезопластины с параметром параболы 25 мм и диаметром 24 мм

С увеличением параметра параболы, как видно из рис. 4, 5 существенных изменений характера распределения акустического давления вдоль оси пьезопластины как в ближней, так и в дальней зонах не наблюдается, а также нет изменений акустического давления в диаметральном сечении акустического пучка.

В дальней же зоне для всех исследованных типоразмеров пьезопластин наблюдается интересная особенность акустического поля, заключающаяся в том, что энергия акустической волны в дальней зоне распространяется не только вблизи оси пьезопластины, но и вдали от нее, что видно из диаметрального распределения акустического давления на расстоянии 100 мм от вершины параболоида (см. рис. 2–5). Видно, что на этом расстоянии диаметральное распределение акустического давления носит изрезанный характер с центральным максимумом на оси пьезопластины и рядом других максимумов, расположенных вдали от оси пьезопластины. При этом самой большой максимум акустического давления вне оси пьезопластины сравним с центральным максимумом или даже превышает его значение.

На рис. 6 представлена зависимость диаметра  $d$  основного максимума акустического пучка по уровню половинной амплитуды на разных расстояниях от пьезопластины для пьезопластины диаметром 12 мм и параметром параболы 12,5 мм.

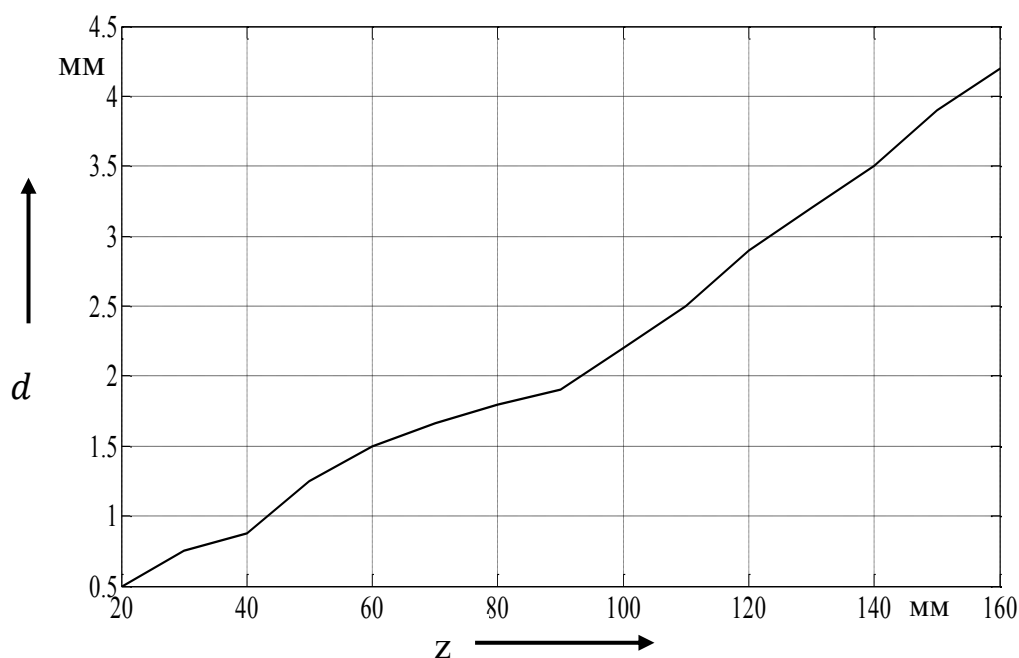


Рис. 6. Зависимость ширины главного максимума в зависимости от расстояния вдоль оси пьезопластины

Из приведенного рисунка видно, что диаметр основного максимума акустического пучка пьезопластины практически линейно увеличивается при удалении от пьезопластины. При этом угол расходимости пучка составляет 1,5 градуса.

Таким образом, проведенный расчет акустического поля параболоидного пьезопреобразователя показал, что вид акустического поля в дальней зоне отличается от вида аналогичного поля для сферических и плоских пьезопластин.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающий контроль: в 5 кн. Акустические методы контроля : практ. пособие / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; под ред. В. В. Сухорукова. – М. : Высш. шк., 1991. – 283 с.

2. **Борисов, В. И.** Тонкая структура акустического поля излучения прямоугольных пьезопластин / В. И. Борисов, С. С. Сергеев, А. С. Никитин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 2 (43). – С. 105–113.

3. **Борисов, И. И.** Тонкая структура акустического поля излучения пьезопреобразователей на основе круглых пьезопластин / И. И. Борисов, С. С. Сергеев, А. С. Никитин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2015. – № 3 (48). – С. 102–108.

4. Структура акустического поля излучения фокусирующих пьезопреобразователей / В. И. Борисов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – № 1 (54). – С. 119–127.