

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 534.86

В. И. Борисов, С. С. Сергеев, Е. Н. Прокопенко, С. А. Прокопенко

СТРУКТУРА АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ФОКУСИРУЮЩИХ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

UDC534.86

V. I. Borisov, S. S. Sergeev, E. N. Prokopenko, S. A. Prokopenko

STRUCTURE OF THE ACOUSTIC FIELD OF RADIATION FROM FOCUSED PIEZOELECTRIC TRANSDUCERS

Аннотация

Методом численного анализа рассчитано акустическое поле излучения фокусирующих акустических преобразователей на основе сферических пьезопластин и плоских пьезопластин с линзами. Показано, что в дальней зоне как на оси пьезопластины, так и вне оси поле носит неоднородный характер.

Ключевые слова:

пьезопреобразователь, акустическое поле, активный концентратор, пьезопластины, резонансная частота, линза, акустическая задержка, давление.

Abstract

An acoustic field of radiation from focused acoustic transducers is calculated by the method of numerical analysis by using spherical piezoelectric plates and flat piezoelectric plates with lenses. It is shown that in the far zone the field has a non-uniform nature both on the axis of a piezoelectric plate and outside its axis.

Key words:

piezoelectric transducer, acoustic field, active concentrator, piezoelectric plates, resonant frequency, lens, acoustical delay, pressure.

Фокусирующие пьезопреобразователи (ПЭП) применяются для повышения чувствительности и разрешающей способности неразрушающего акустического контроля. Так как акустическое поле ПЭП формируется в результате интерференции когерентных акустических волн, то, кроме основных максимумов, оно содержит ряд дополнительных максимумов, которые могут влиять на эффективность работы ПЭП.

Аналитическое решение при расчете акустического поля фокусирующих ПЭП удастся получить лишь для точек,

расположенных на акустической оси пьезопластины в виде участка сферической поверхности (активного концентратора) [1, 2]. В [3, 4] численным методом проанализированы особенности акустического поля излучения прямоугольных и круглых плоских пьезопластин.

Приведены результаты анализа акустического поля излучения сферических пьезопластин для непрерывного возбуждения акустических волн. Расчет акустического поля проводился способом, изложенным в [3].

Расчетная схема ПЭП в виде круглой сферической пластины площадью S

и с радиусом кривизны $BD = R_0$ отображена на рис. 1.

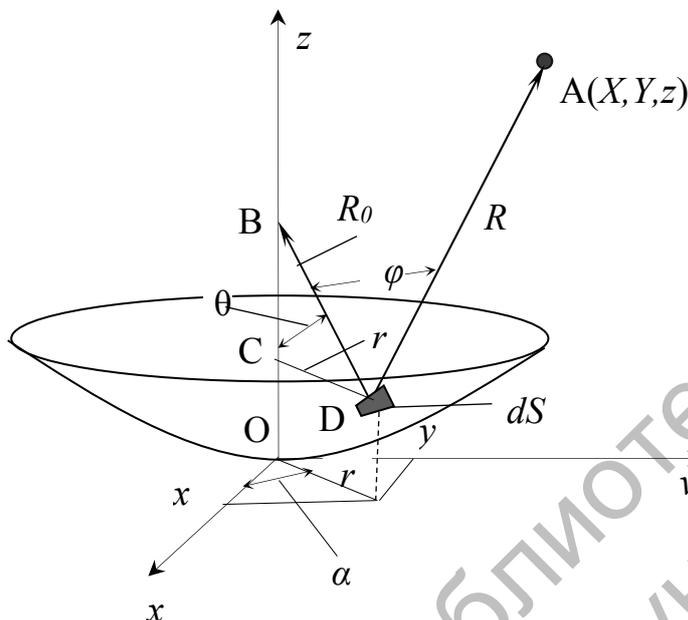


Рис. 1. Схема для расчета акустического поля сферического ПЭП

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

$$P(X, Y, z) = \int_S \frac{P_0}{R} \cos \varphi (\cos(\omega t - kR)) dS = \int_S \frac{P_0}{R} \cos \varphi \left(\cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} R \right) \right) dS, \quad (1)$$

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

В выражении (1) считаем, что от элементарного излучателя площадью dS излучается сферическая акустическая волна, что соответствует физической действительности, если размер площадки значительно меньше расстояния от

площадки до рассматриваемой точки. Для более реального представления вклада волны, излучаемой элементарным излучателем в рассматриваемой точке пространства A , вводится коэффициент $\cos \varphi$, который учитывает наклон элементарной площадки к направлению на рассматриваемую точку [2]. Этот коэффициент можно рассчитать по формуле для косинуса угла между двумя векторами \vec{R}_0 и \vec{R} [5].

В соответствии с рис. 1 данные векторы в декартовой системе координат выражаются следующим образом:

$$\vec{R}_0 = -x\vec{i} - y\vec{j} + \sqrt{R_0^2 - (x^2 + y^2)}\vec{k}; \quad (2)$$

$$\vec{R} = (X - x)\vec{i} + (Y - y)\vec{j} + \left(z - R_0 + \sqrt{R_0^2 - (x^2 + y^2)} \right) \vec{k}. \quad (3)$$

Тогда

$$\cos \varphi = \frac{-(X-x)x - (Y-y)y + \sqrt{R_0^2 - (x^2 + y^2)} \cdot \left(z - R_0 + \sqrt{R_0^2 - (x^2 + y^2)} \right)}{R_0 \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + \left(z - R_0 + \sqrt{R_0^2 - (x^2 + y^2)} \right)^2}}; \quad (4)$$

$$R = \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + \left(z - R_0 + \sqrt{R_0^2 - (x^2 + y^2)} \right)^2}. \quad (5)$$

Расчет интеграла (1) будем проводить путем численного интегрирования, заменяя интеграл суммой:

$$P(X, Y, z) = \int_S \frac{P_0}{R} \cos \varphi \left(\cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} R \right) \right) dS = \\ = \sum_S \frac{P_0}{R} \cos \varphi \left(\cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} R \right) \right) \Delta S. \quad (6)$$

Так как излучатель представляет собой участок сферы радиусом R_0 , то для вычисления суммы удобно применять сферическую систему координат. В этой системе координат площадь элементарной площадки на поверхности излучателя

$$\Delta S = R_0^2 \sin \theta d\theta d\alpha,$$

где θ – полярный угол, отсчитываемый от оси Oz до направления на рассматриваемую точку; α – азимутальный угол, отсчитываемый от оси Ox до проекции отрезка CD на плоскость $хоу$. Вычисление суммы проводится следующим образом. Вся поверхность пьезопластины разбивается на N элементарных площадок площадью $\Delta S = R_0^2 \sin \theta d\theta d\alpha$. Число элементарных площадок выбирается так, чтобы расстояние от соседних площадок до рассматриваемой точки A было значительно меньше длины акустической волны в материале среды, в которой она распространяется.

После разделения временных и пространственных координат, в соответствии с [3], для искомой суммы имеем выражение

$$P(X, Y, z) = P_0 R_0^2 \Delta \theta \Delta \alpha \times \\ \times \sqrt{\left(\sum_0^N \frac{\sin \theta}{R} \cos \varphi \cos \frac{2\pi}{\lambda} R \right)^2 + \left(\sum_0^N \frac{\sin \theta}{R} \cos \varphi \sin \frac{2\pi}{\lambda} R \right)^2}, \quad (7)$$

которое пропорционально величине акустического давления в точке A .

$$\sin \theta = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R_0}. \quad (8)$$

Полученное выражение (7) позволяет определить амплитуду давления P (в произвольных единицах) акустической волны, генерируемой пьезопластиной в любой точке полупространства.

На рис. 2 отображено распределение давления P на разном расстоянии на оси круглой пьезопластины диаметром 10 мм и с радиусом кривизны 20 мм, нагруженной на воду, работающей в непрерывном режиме на резонансной частоте 5 МГц. На вставках рисунка приведен трехмерный вид акустического поля на разных расстояниях, отмеченных линиями.

Из рис. 2 видно, что наибольший максимум акустического поля наблюдается на фокусном расстоянии, немного меньшем, чем радиус кривизны пьезопластины, а размер ближней зоны не согласуется с рассчитанным значением 83 мм для круглой плоской пьезопластины [1].

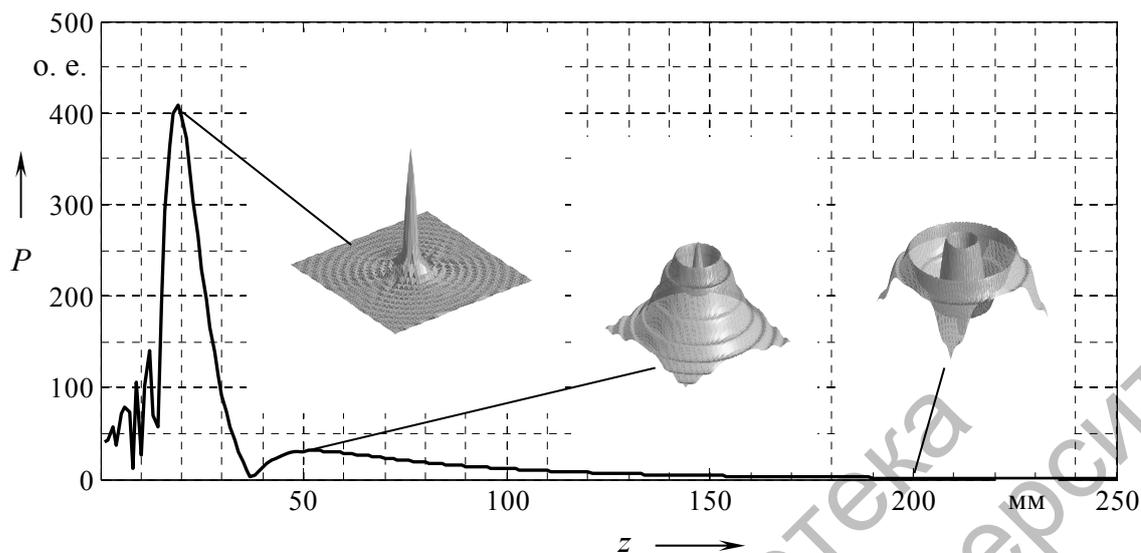


Рис. 2. Распределение давления акустической волны вдоль оси сферической пьезопластины диаметром 10 мм и с радиусом кривизны 20 мм

Анализ показывает, что акустическое поле носит круглосимметричный характер с осью симметрии, совпадающей с осью пьезопластины как в ближней, так и в дальней зоне. Характерной особенностью акустического поля излучения активного концентратора является то, что акустическое давление вдоль оси пьезопластины не испытывает монотонного уменьшения в дальней зоне по мере удаления от пластины, что следует из трехмерного вида акустического поля на расстоянии 200 мм от пластины (см. рис. 2). Такая неоднородность поля более отчетливо наблюдается при увеличении диаметра пьезопластин, что видно из рис. 3, на котором отображено распределение давления акустических волн вдоль оси сферической пьезопластины диаметром 20 мм и с радиусом кривизны 20 мм. На вставках этого рисунка приведены диаметрально поперечные распределения акустического поля на разных расстояниях от пьезопластины, которые отмечены соответствующими линиями. Расстояния на горизонтальной оси вставок указаны в миллиметрах (нулевое значение соответствует оси пьезопластины), а давления – в относительных единицах.

Из рис. 3 видно, что акустическое поле на расстояниях, превышающих фокусное, носит неоднородный характер как в направлении вдоль оси пьезопластины, так и в сечениях, перпендикулярных к оси. Вдоль оси пьезопластины наблюдается ряд локальных максимумов, амплитуда которых уменьшается по мере удаления от пьезопластины, а расстояние между минимумами увеличивается.

Проведенный анализ показал, что при увеличении радиуса кривизны сферических пьезопластин акустическое поле таких ПЭП приближается к полю круглых плоских пьезопластин тем больше, чем больше отношение радиуса кривизны пьезопластины к ее диаметру. На рис. 4 отображено распределение акустического давления вдоль оси сферической пьезопластины диаметром 10 мм и с радиусом кривизны 50 мм. Из рисунка видно, что отношение величины акустического давления в фокусе к величине давления в ближайшем максимуме в ближней зоне равно 2, в то время как для сферической пьезопластины такого же диаметра, но с радиусом кривизны 20 мм это отношение составляет 2,9.

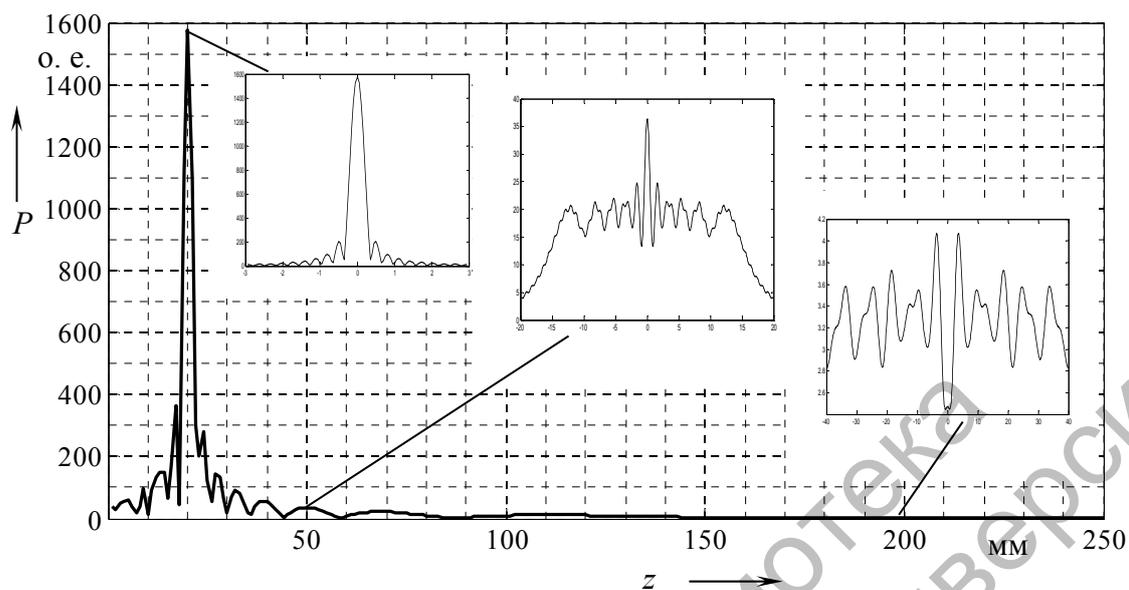


Рис. 3. Распределение давления акустической волны вдоль оси сферической пьезопластины диаметром 20 мм и с радиусом кривизны 20 мм

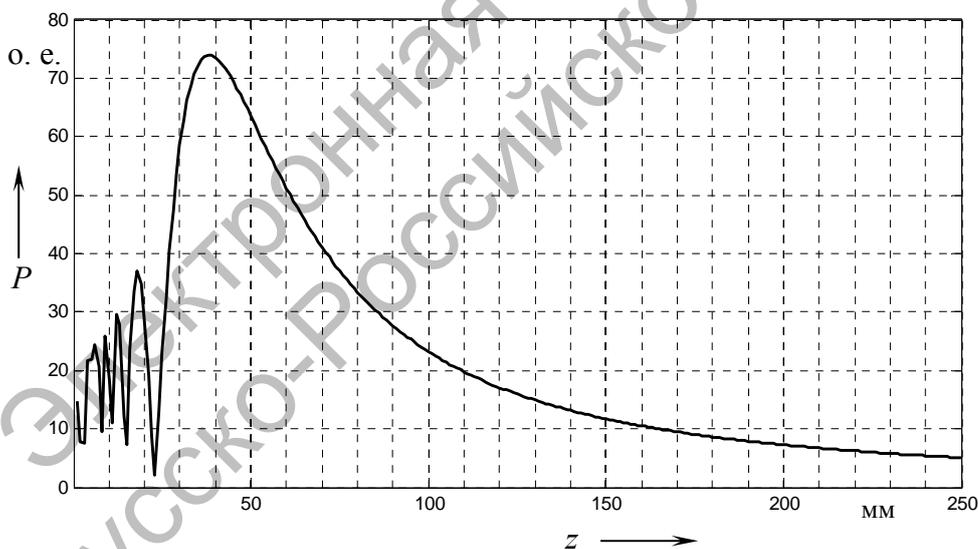


Рис. 4. Распределение давления акустических волн вдоль оси сферической пьезопластины диаметром 10 мм и с радиусом кривизны 50 мм

Анализ акустического поля в дальней зоне показывает монотонное уменьшение давления вдоль оси, что свидетельствует о том, что акустическое поле в этой области сосредоточено в одном максимуме, направленном вдоль

оси пьезопластины, величина которого во много раз превышает дополнительные максимумы.

Акустическое поле активного концентратора со стороны выпуклой поверхности пьезопластины носит так-

же неоднородный характер. На рис. 5 отображено распределение давления акустической волны вдоль оси выпук-

лой сферической пьезопластины диаметром 10 мм и с радиусом кривизны 20 мм.

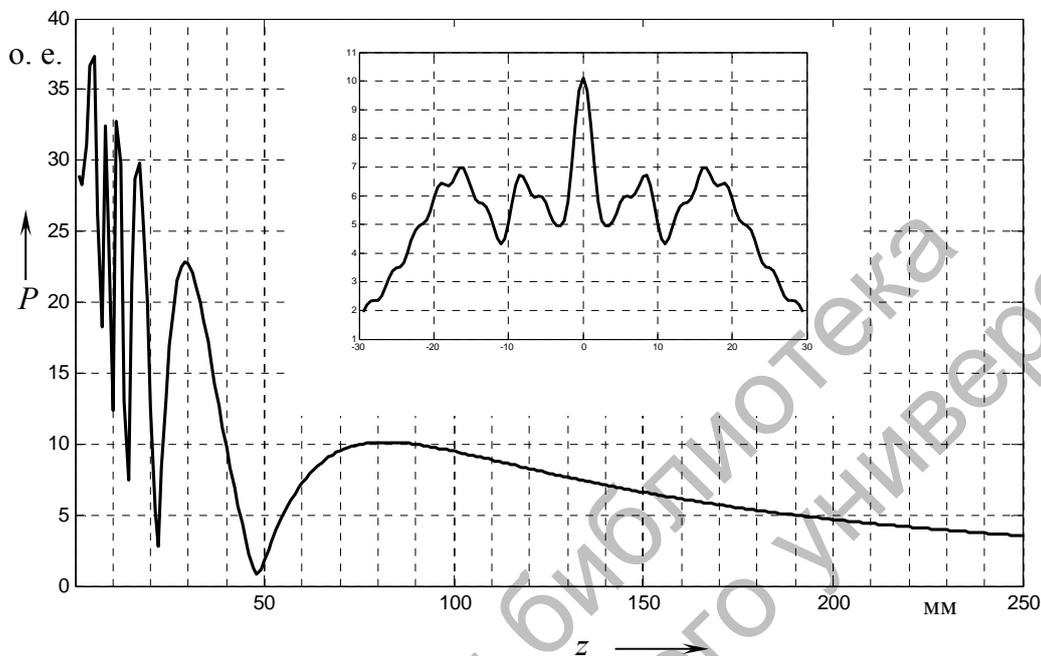


Рис. 5. Распределение акустического давления вдоль оси выпуклой сферической пьезопластины диаметром 10 мм и с радиусом кривизны 20 мм

На вставке на этом рисунке приведено диаметральное распределение акустического давления в плоскости, перпендикулярной оси пластины, на расстоянии 80 мм от пьезопластины (в области последнего максимума). Расстояние на горизонтальной оси вставки указано в миллиметрах (нулевое значение соответствует оси пьезопластины), а давления – в относительных единицах.

Из рис. 5 видно, что величина акустического давления на оси пьезопластины монотонно убывает после последнего максимума.

Фокусирующие ПЭП на основе вогнутых пьезопластин, ввиду сложности их изготовления, не находят широкого применения в практике неразрушающего акустического контроля. Более удобны плоские пьезопластины, поэтому приведены результаты численного анализа акустического поля излу-

чения фокусирующих ПЭП на основе плоских пьезопластин, контактирующих с плоско-вогнутыми линзами. Схема такого ПЭП изображена на рис. 6.

Расчетная схема ПЭП в виде плоской пьезопластины 1, которая находится в акустическом контакте с плоской поверхностью плоско-вогнутой линзы 2, вогнутая поверхность которой представляет собой участок сферы площадью S и с радиусом кривизны $BD = R_0$, дана на рис. 6. Декартова система координат выбрана таким образом, что ее начало совпадает с вершиной вогнутой поверхности линзы. Минимальная толщина линзы (задержка) – d .

Считается, что пьезопластина генерирует плоскую акустическую волну, распространяющуюся в направлении сферической вогнутой поверхности линзы. Эта поверхность становится источником акустических волн, которые

распространяются дальше в направлении оси z . В то же время каждая точка вогнутой поверхности линзы является источником сферической акустической волны, начальная фаза которой зависит

от местоположения этой точки на поверхности линзы. Другими словами, вогнутая поверхность линзы представляет некий аналог фазированной акустической решетки.

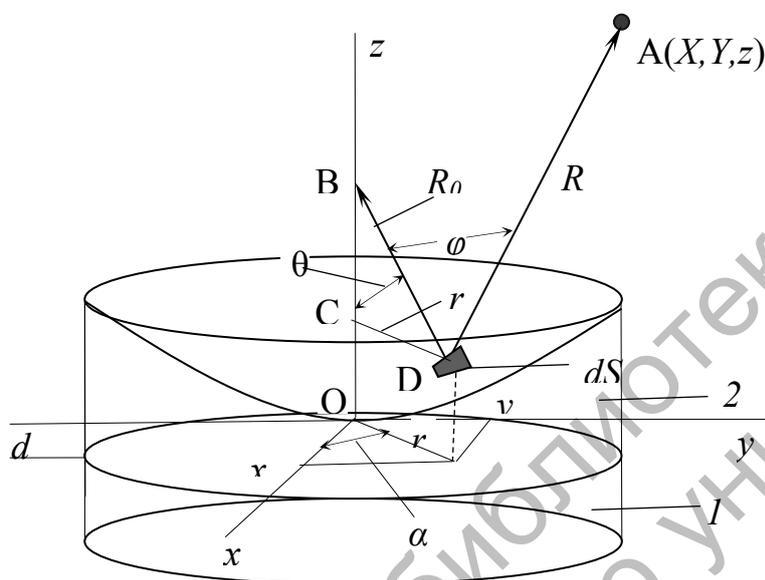


Рис. 6. Схема для расчета акустического поля фокусирующего преобразователя на основе плоской пьезопластины с плоско-вогнутой линзой: 1 – пьезопластина; 2 – плоско-вогнутая линза

Расчет давления в точке A с координатами X, Y, z проводился по способу, описанному ранее для активного концентратора. В конечном итоге результирующая величина давления в относительных единицах в точке A определяется суммой:

$$P(X, Y, z) = P_0 R_0^2 \Delta \theta \Delta \alpha \times \sqrt{\left(\sum_0^N \frac{\sin \theta}{R} \cos \varphi \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} R + \varphi_0 \right) \right)^2 + \left(\sum_0^N \frac{\sin \theta}{R} \cos \varphi \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} R + \varphi_0 \right) \right)^2}, \quad (9)$$

где R – расстояние от точечного излучателя площадью dS , расположенного в точке с координатами x, y, z_0 , до точки A ,

$$R = \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + \left(z - R_0 + \sqrt{R_0^2 - (x^2 + y^2)} \right)^2}; \quad (10)$$

k – модуль волнового вектора (волновое число), $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ – длина волны в материале среды, где распространяется акустическая волна; $\varphi_0(x, y, z_0)$ – начальная фаза акустической волны на вогнутой поверхности линзы,

$$\varphi_0(x, y, z_0) = \frac{2\pi}{\lambda_1} \times \left(d + R_0 - \sqrt{R_0^2 - x^2 - y^2} \right). \quad (11)$$

$$\cos \varphi = \frac{-(X-x)x - (Y-y)y + \sqrt{R_0^2 - (x^2 + y^2)} \left(z - R_0 + \sqrt{R_0^2 - (x^2 + y^2)} \right)}{R_0 \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + \left(z - R_0 + \sqrt{R_0^2 - (x^2 + y^2)} \right)^2}}. \quad (12)$$

Расчеты проводились для непрерывного режима работы круглой пьезопластины диаметром 10 мм, находящейся в акустическом контакте с плоско-вогнутой линзой из оргстекла, кварца и сапфира толщиной 5 мм, нагруженной

на воду, работающей на резонансной частоте 5 МГц.

На рис. 7 приведено распределение давления P вдоль акустической оси пьезопластины.

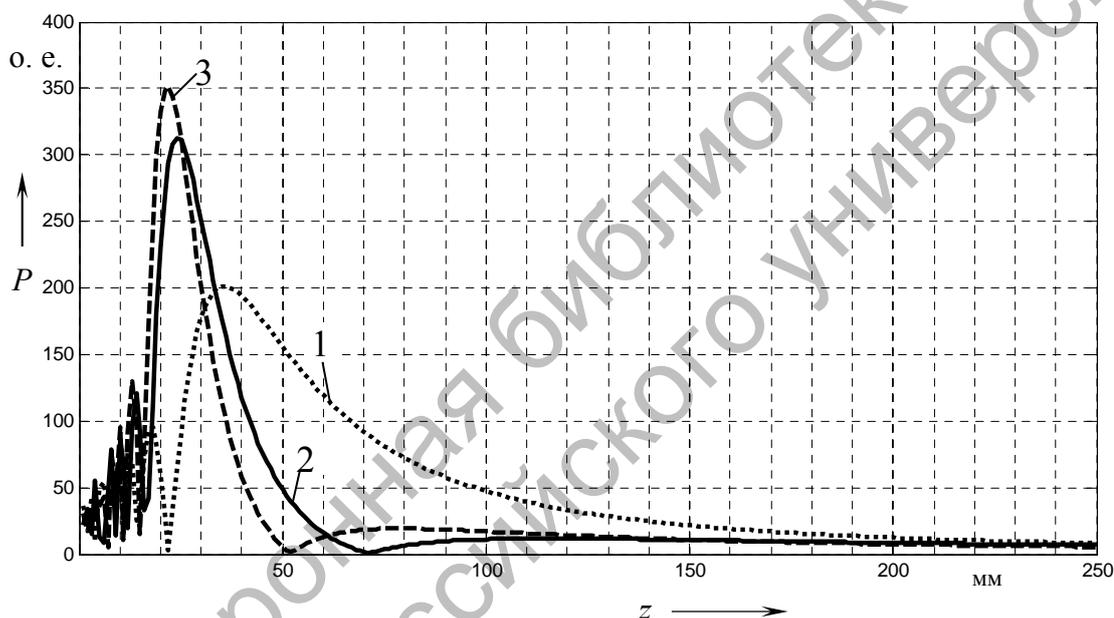


Рис. 7. Распределение давления акустической волны вдоль оси ПЭП с плоско-вогнутой линзой из оргстекла 1, кварца 2 и сапфира 3 диаметром 10 мм и с радиусом кривизны вогнутой поверхности 20 мм

Анализ поперечного сечения давления в фокусе линз из оргстекла, плавленого кварца и сапфира показал, что по уровню половинной амплитуды давления диаметр фокального пятна составляет 1,75; 1,07 и 0,93 мм соответственно. Размер фокального пятна для линзы из оргстекла равен 3,24 длины акустической волны в оргстекле, для линзы из плавленого кварца – 0,9 длины волны в плавленом кварце и 0,465 длины волны в сапфире.

Таким образом, проведенные исследования фокусирующих ПЭП на основе сферических пьезопластин и плоских пьезопластин с плоско-вогнутыми линзами позволили выявить закономерности формирования акустических полей в исследуемых средах, что выступает базой для разработки эффективных способов и средств ультразвукового неразрушающего контроля различных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ермолов, И. Н.** Неразрушающий контроль : в 5 кн. Кн. 2 : Акустические методы контроля : практ. пособие / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов ; под ред. В. В. Сухорукова. – М. : Вышш. шк., 1991. – 283 с.
2. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / Под ред. И. Н. Ермолова. – М. : Машиностроение, 1986. – 280 с.
3. **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. – С. 105–113.
4. **Борисов, В. И.** Тонкая структура акустического поля излучения пьезопреобразователей на основе круглых пьезопластин / В. И. Борисов, С. С. Сергеев, А. С. Никитин // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2015. – № 4. – С. 102–108.
5. **Воднев, В. Т.** Основные математические формулы : справочник / В. Т. Воднев, А. Ф. Наумович, Н. Ф. Наумович. – Минск : Вышш. шк., 1988. – 69 с.

Статья сдана в редакцию 23 ноября 2016 года

Василий Иванович Борисов, д-р физ.-мат. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-299-73-56-21.

Сергей Сергеевич Сергеев, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет. Тел.: +375-222-22-52-12.

Елена Николаевна Прокопенко, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.

Сергей Александрович Прокопенко, студент, Белорусско-Российский университет.

Vasily Ivanovich Borisov, DSc (Physics and Mathematics), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-299-73-56-21.

Sergey Sergeyevich Sergeev, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University. Phone: +375-222-22-52-12.

Elena Nikolayevna Prokopenko, senior lecturer, Belarusian-Russian University.

Sergey Aleksandrovich Prokopenko, student, Belarusian-Russian University.