

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.53078/20778481\_2022\_1\_110

УДК 534.86

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

**АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ТРЕХПЛАСТИНЧАТОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

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

**ACOUSTIC RADIATION FIELD OF A THREE-LAYER PIEZOELECTRIC TRANSDUCER**

**Аннотация**

Методом численного анализа рассчитано акустическое поле излучения акустических преобразователей в виде трех пьезоэлектрических пластин, расположенных параллельно друг другу. Показано, что уменьшение амплитуды акустических волн, генерируемых боковыми пластинами по сравнению с центральной, приводит к аподизации центрального лепестка диаграммы направленности, а соответствующий сдвиг фаз генерируемых акустических волн – к его сужению и раздвоению.

**Ключевые слова:**

акустическое поле, фазированная решетка, пьезоэлектрический преобразователь, акустическая ось, дальняя зона, ближняя зона, акустическая волна, акустическое давление, аподизация, полуширина акустического пучка, центральный лепесток диаграммы направленности.

**Для цитирования:**

Борисов, В. И. Акустическое поле излучения трехпластинчатого пьезоэлектрического преобразователя / В. И. Борисов, С. С. Сергеев, Е. Н. Прокопенко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 1 (74). – С. 110–117.

**Abstract**

The acoustic radiation field of acoustic transducers in the form of three piezoelectric plates located parallel to each other is calculated by the method of numerical analysis. It is shown that a decrease in the amplitude of acoustic waves generated by side plates compared to a central plate leads to apodization of the central lobe of the radiation pattern, and the corresponding phase shift of generated acoustic waves results in its narrowing and bifurcation.

**Keywords:**

acoustic field, phased array, piezoelectric transducer, acoustic axis, far zone, near zone, acoustic wave, acoustic pressure, apodization, acoustic beam half-width, central lobe of radiation pattern.

**For citation:**

Borisov, V. I. Acoustic radiation field of a three-layer piezoelectric transducer / V. I. Borisov, S. S. Sergeev, E. N. Prokopenko // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 1 (74). – P. 110–117.

В настоящее время в практике неразрушающего акустического контроля в качестве источников и приемников акустических волн широкое применение находят фазированные акустические решетки (ФАР), содержащие набор элементарных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), реализующие более информативный акустический контроль материалов и технических изделий, в том числе благодаря перестройке акустического поля излучения-приема [1–3].

В предлагаемой работе приведены результаты численного расчета акустического поля излучения пьезоакустического преобразователя, работающего в непрерывном режиме возбуждения акустических волн, состоящего из трех прямоугольных пьезопластин, расположенных в одной плоскости параллельно друг другу.

Расчетная схема пьезопреобразователя площадью  $S$  приведена на рис. 1.

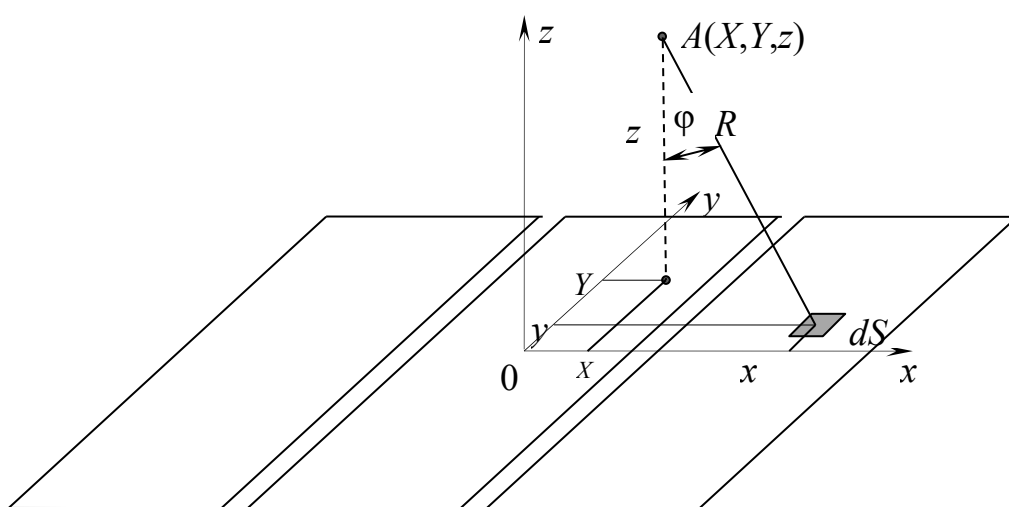


Рис. 1. Схема для расчета акустического поля трехпластинчатого пьезопреобразователя

Результирующая величина давления в точке  $A$  с координатами  $X, Y, z$  бу-

дет пропорциональна следующему интегралу [4, 5]:

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

В этом выражении  $R$  – расстояние от точечного излучателя площадью  $dS$ , расположенного в точке с координатами  $x, y, 0$  до точки  $A$ .

$k$  – модуль волнового вектора (волновое число),  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ .

$\lambda$  – длина волны в материале среды, где распространяется акустическая волна.

$\varphi$  – угол, учитывающий наклон

элементарной площадки  $dS$  к направлению на рассматриваемую точку.

$\psi_i$  – начальная фаза акустической волны, излучаемой каждой из трех пьезопластиной ПЭП.

Расчет интеграла (1) проводился по методике, приведенной в [6]. Расчеты акустического поля излучения проводились для трех нагруженных на стальное изделие прямоугольных пьезопластин с размерами  $17 \times 5$  мм для ча-

стоты возбуждения 5 МГц, что соответствует длине продольных волн в стали 1,2 мм. Расстояние между отдельными пьезопластинками выбиралось 1 мм. В целом излучающая область трехплощадочного ПЭП имеет размеры  $17 \times 17$  мм.

На рис. 2 приведено распределе-

ние давления  $P$  акустических волн, генерируемых трехпластинчатым ПЭП в направлении акустической оси  $z$  для случая, когда волны, генерируемые элементарными излучателями, на всех трех пластинах имеют одинаковую амплитуду и начальную фазу.

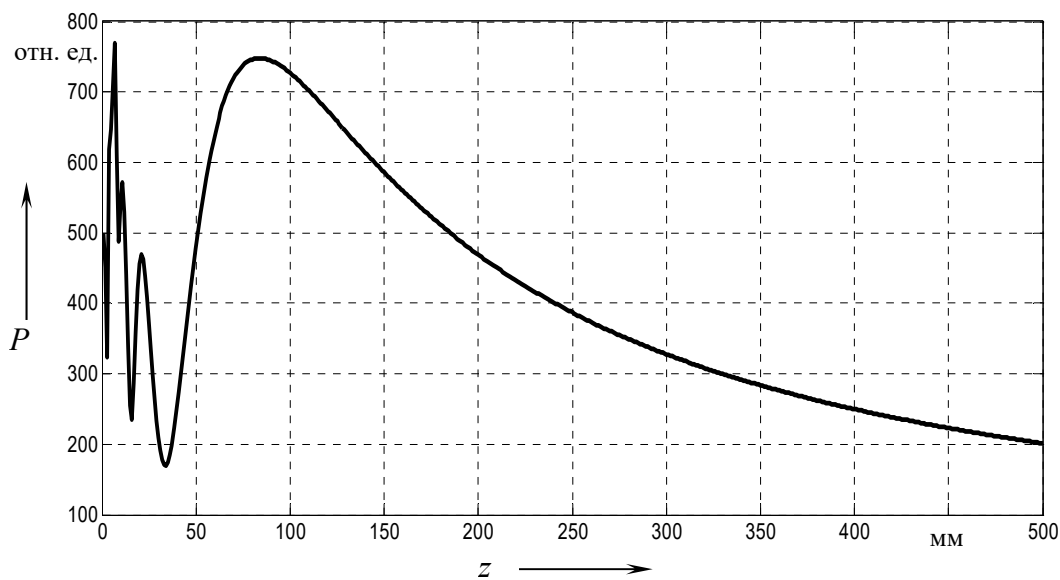


Рис. 2. Распределение давления акустических волн, генерируемых трехпластинчатым ПЭП вдоль акустической оси

Из рис. 2 видно, что можно выделить ближнюю и дальнюю зоны ПЭП, где соответственно наблюдаются и отсутствуют осцилляции амплитуды давления акустических волн. На расстоянии 85 мм от пьезопластин наблюдается максимум давления акустических волн, при удалении от которого давление волн монотонно уменьшается. Для сравнения – проведенный анализ акустического поля, генерируемого одной квадратной пьезопластиной с размерами  $17 \times 17$  мм, показал, что в средней и дальней зонах квадратной пьезопластины осевое распределение давления акустических волн носит характер такой же, как и у трехплощадочного ПЭП.

На рис. 3 и 4 приведено распределение давления  $P$  акустических волн в плоскости, перпендикулярной акустиче-

ской оси ПЭП, в области максимума на расстоянии 85 мм от пьезопластин в направлении координатных осей  $x$  и  $y$  соответственно.

Из приведенных рисунков видно, что акустическое поле имеет максимум на акустической оси ПЭП и носит неоднородный характер с боковыми максимумами, величина которых составляет почти 50 % от максимального давления на оси акустического пучка. Ширина акустического пучка в направлении оси  $x$  по уровню половинного максимального давления (полуширина) составляет 17 мм, а в направлении оси  $y$  – 15 мм.

Рассмотренная в работе схема трехпластинчатого ПЭП позволяет управлять параметрами акустического поля излучения путем изменения ам-

плитуд и начальных фаз генерируемых акустических волн на боковых пластинах по отношению к аналогичным параметрам на центральной пластине.

На рис. 5 приведено распределение давления  $P$  акустических волн для случая, когда акустические волны, гене-

рируемые элементарными излучателями на всех пластинах, имеют одинаковую начальную фазу, а на крайних пластинах – половинную амплитуду по отношению к амплитуде волн, генерируемых центральной пластиной.

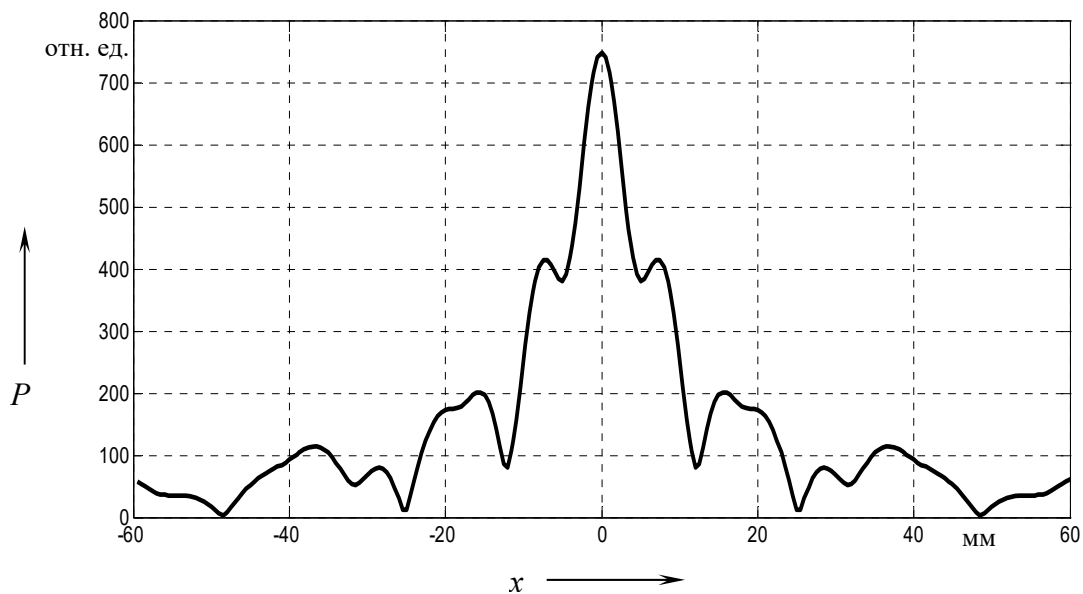


Рис. 3. Распределение давления акустических волн, генерируемых трехпластинчатым ПЭП вдоль оси  $x$

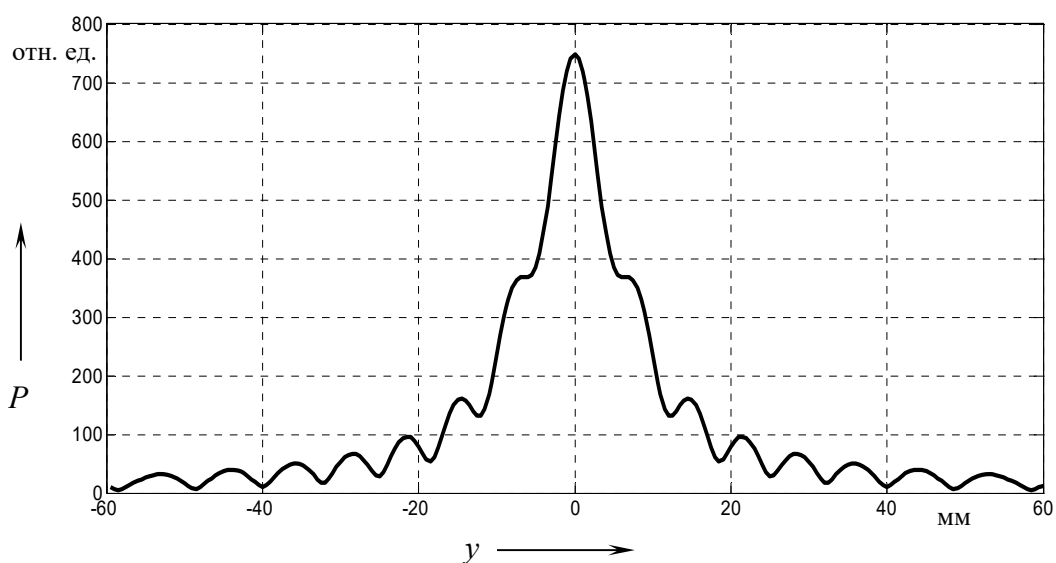


Рис. 4. Распределение давления акустических волн, генерируемых трехпластинчатым ПЭП вдоль оси  $y$

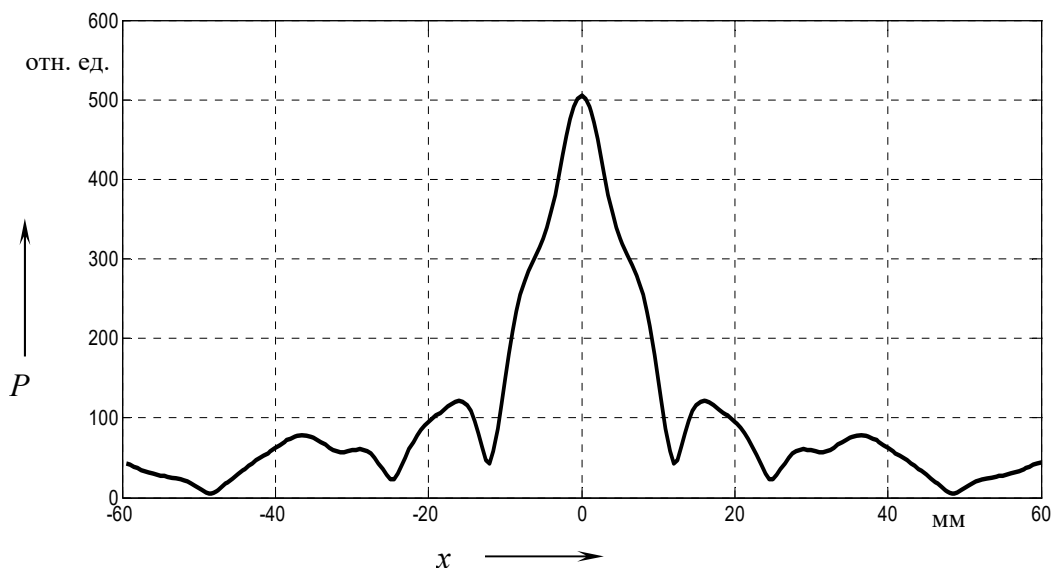


Рис. 5. Распределение давления акустических волн, генерируемых трехпластинчатым ПЭП вдоль оси  $x$  при половинных амплитудах на крайних пластинах

Из рис. 5 видно, что при таких параметрах генерируемых акустических волн наблюдается сглаживание боковых максимумов, примыкающих к центральному. Используя аналогию похожего явления, наблюдаемого в оптике, это сглаживание боковых максимумов можно назвать аподизацией акустического пучка. Полуширина аподизированного акустического пучка в направлении оси  $x$  составляет 14 мм. Распределение же давления акустических волн вдоль оси  $y$  для рассматриваемого случая почти совпадает с аналогичным распределением для неаподизированного пучка, как на рис. 4, только при меньших величинах давления.

Сужение центрального лепестка диаграммы направленности рассматриваемого ПЭП можно получить, если реализовать для акустических волн, генерируемых на крайних пластинах, такую начальную фазу, при которой эти волны приходили бы в точку на акустической оси ПЭП, где наблюдается максимум результирующего давления акустических волн в одной и той же фазе, что и волны, генерируемые центральной

пьезопластиной.

Для рассматриваемой схемы ПЭП фазовая задержка между акустическими волнами, генерируемыми в центре крайних пластин, по отношению к волнам, генерируемым в центре центральной пьезопластины, составляет 1,12 рад. Введение этой фазовой задержки в расчеты акустического поля излучения ПЭП привело к смещению максимума в распределении давления акустических волн вдоль акустической оси с расстояния 85 мм к расстоянию 71,5 мм.

На рис. 6 приведено распределение давления акустических волн в направлении оси  $x$  для случая, когда акустические волны, генерируемые элементарными излучателями на всех пластинах, имеют одинаковую амплитуду, а на крайних пьезопластинах начальные фазы волн, генерируемых в центре пластин, выбраны такими, чтобы эти волны приходили в точку на расстоянии 71,5 мм от плоскости, где расположены пьезопластины, в одной фазе с волнами, генерируемыми в середине центральной пьезопластины.

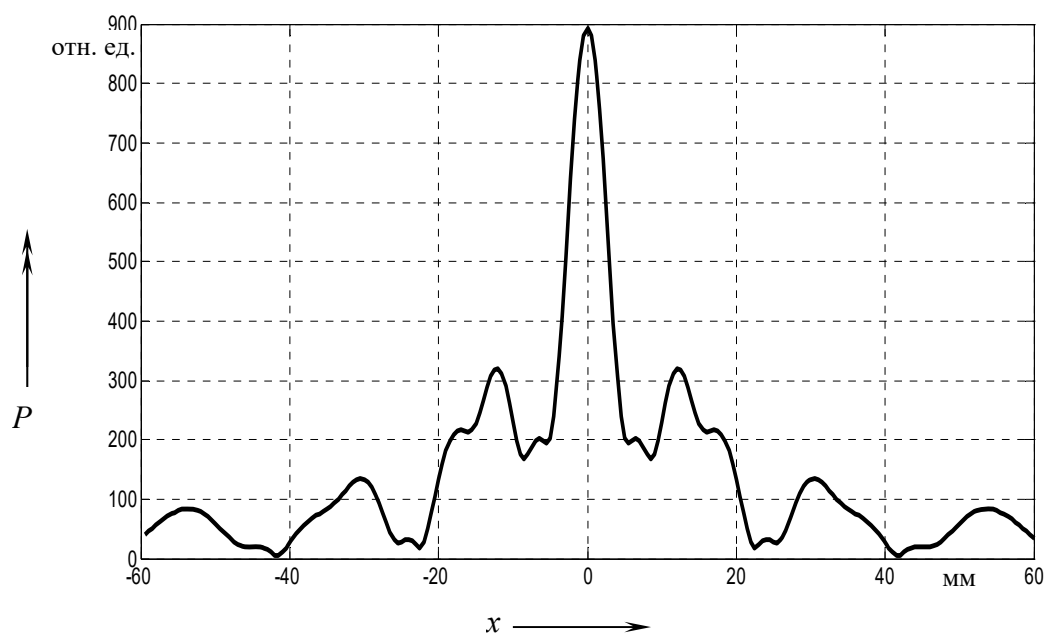


Рис. 6. Распределение давления акустических волн, генерируемых трехпластинчатым ПЭП вдоль оси  $x$  при опережающих начальных фазах на крайних пластинах

Характерной особенностью акустического поля излучения ПЭП в этом случае является сужение центрального лепестка диаграммы направленности. Так, полуширина акустического пучка в направлении оси  $x$  составляет 6,5 мм, что в 2,6 раз меньше, чем полуширина акустического пучка при одинаковых фазах генерируемых волн на всех трех пьезопластинах.

Анализ распределения давления акустических волн в области максимума на расстоянии 71,5 мм от пьезопластин в направлении оси  $y$  показал, что оно отличается от распределения давления на рис. 4 только большими значениями величины давления в соответствующих точках оси, а полуширина акустического пучка составляет 15 мм.

Комбинированием величины фазового сдвига акустических волн, генерируемых на крайних и центральной пьезопластинах, можно осуществлять пространственное сканирование акустического пучка. Так, проведенные расчеты распределения давления  $P$  аку-

стических волн вдоль оси  $x$  показали, что опережение фазы генерируемых волн на левой пьезопластине на 1,12 радиан по отношению к начальным фазам излучения, генерируемого на центральной и правой пьезопластинах, приводит к смещению максимума акустического пучка на 1,4 мм от оси ПЭП, что видно на рис. 7. Расчеты проведены для волн, амплитуда которых на крайних пластинах имеет половинную амплитуду по отношению к амплитуде волн, генерируемых центральной пьезопластиной.

Опережение фазы генерируемых волн на правой пьезопластине на 1,12 рад по отношению к начальным фазам излучения, генерируемого на центральной и левой пьезопластинах, приводит к смещению максимума акустического пучка на 1,4 мм в другую сторону от оси ПЭП. Смещения акустического пучка в направлении оси  $y$  не наблюдается.

Рис. 8 иллюстрирует раздвоение акустического пучка вдоль оси  $x$ .

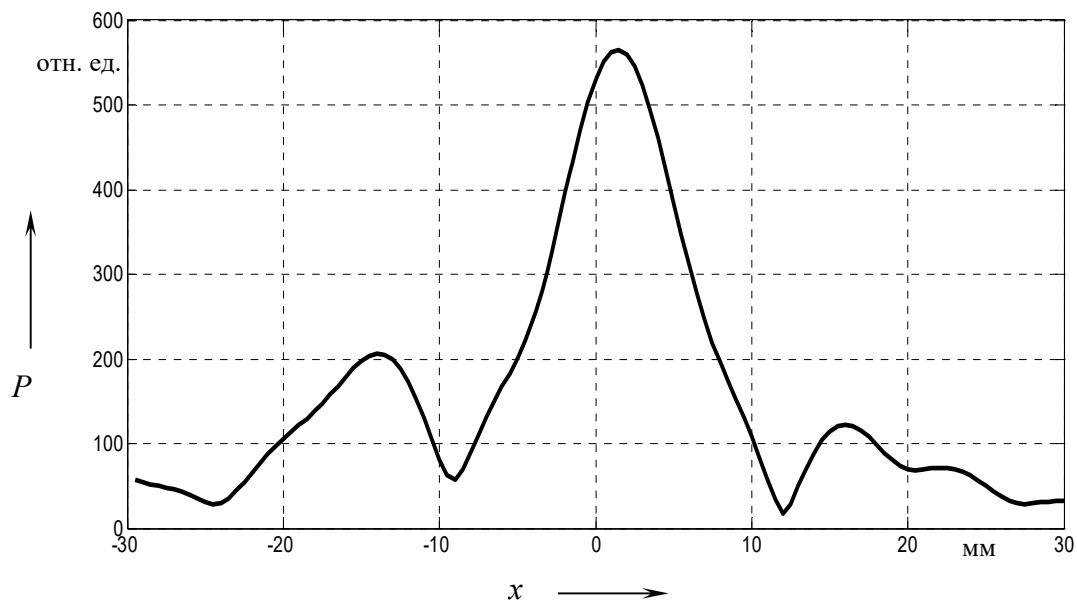


Рис. 7. Распределение давления акустических волн, генерируемых трехпластинчатым ПЭП вдоль оси  $x$  при половинных амплитудах на крайних пластинах и опережающей фазе на левой пластине на 1,12 рад

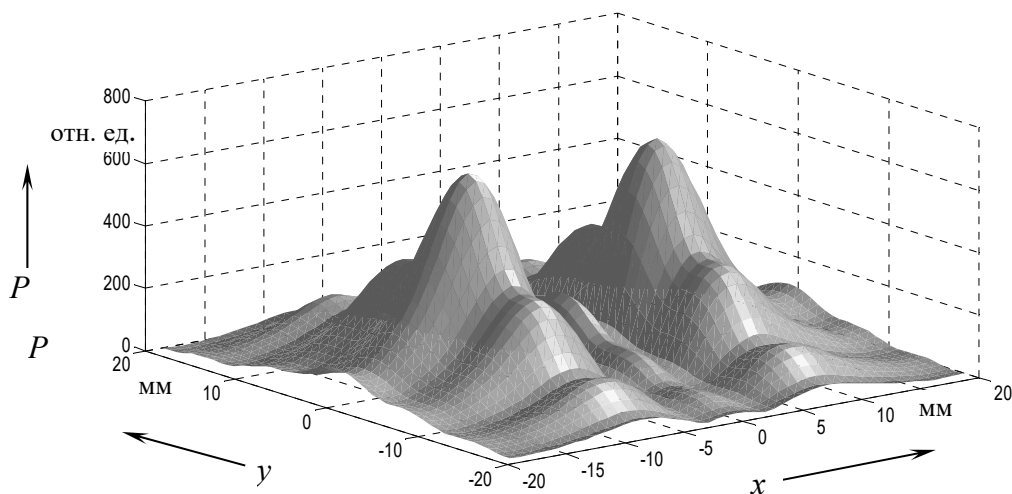


Рис. 8. Акустическое поле трехплощадочного ПЭП на расстоянии 85 мм при равных амплитудах на всех пластинах и опережающих фазах на крайних пластинах на 2,1 рад по отношению к фазе акустических волн на центральной пьезопластине

Введение в расчеты акустического поля опережающего сдвига фаз акустических волн, генерируемых крайними пьезопластинами, по отношению к волнам, генерируемым центральной пьезопластиной, приводит к раздвоению акустического пучка, что видно на рис. 8. В этом случае величина центрального

лепестка диаграммы направленности уменьшается, а боковых увеличивается. Конкретная разность между величиной боковых максимумов и центрального зависит от величины сдвига фаз и соотношения амплитуд акустических волн, генерируемых на боковых и центральной пьезопластинах. Например, при

опережающем сдвиге фаз  $2,1$  рад и одинаковых амплитудах волн на всех трех пьезопластинах соотношение между величиной боковых лепестков диаграммы направленности составляет  $2,9:1$ . При таком же сдвиге фаз и половинных амплитудах волн на боковых пьезопластинах по отношению к амплитуде волн, генерированных на центральной пьезопластине, это соотношение составляет  $5:1$ , а при амплитуде на боковых пьезопластинах  $0,75$  от амплитуды на центральной пьезопластине соотношение между величиной боковых лепестков диаграммы направленности составляет  $5,7:1$ .

Таким образом, проведенные расчеты показали, что трехпластинчатая

схема ПЭП позволяет проводить аподизацию, пространственное смещение и раздвоение центрального лепестка диаграммы направленности за счет изменения начальных фаз и амплитуд акустических волн, излучаемых боковыми пьезоплощадками по отношению к соответствующим параметрам акустических волн, генерируемых центральной пьезоплощадкой ПЭП. При этом перестройку акустического поля излучения достаточно просто можно проводить и в динамическом режиме. Описанные возможности перестройки акустического поля излучения ПЭП можно использовать для повышения информативности неразрушающего акустического контроля материалов и изделий.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фалькевич, С. А.** Фазированные решетки в ультразвуковой дефектоскопии (обзор) / С. А. Фалькевич // Дефектоскопия. – 1984. – № 3. – С. 3–16.
2. **Реука, С. В.** Введение в технологию применения ультразвуковых фазированных решеток / С. В. Реука. – Санкт-Петербург: СПГЭТУ ЛЭТИ, 2011. – 210 с.
3. Акустическое поле излучения пьезопреобразователя в виде двухмерной прямоугольной фазированной решетки / В. И. Борисов [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2021. – № 2 (71). – С. 58–67.
4. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / Под ред. И. Н. Ермолова. – Москва: Машиностроение, 1986. – 280 с.
5. **Ермолов, И. Н.** Неразрушающий контроль: в 5 кн. Кн. 2: Акустические методы контроля: практическое пособие / И. Н. Ермолов, Н. П. Алешин, А. И. Потапов; под ред. В. В. Сухорукова. – Москва: Высшая школа, 1991. – 283 с.

*Статья сдана в редакцию 12 января 2022 года*

**Василий Иванович Борисов**, д-р физ.-мат. наук, проф., Белорусско-Российский университет.  
**Сергей Сергеевич Сергеев**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: sss.bru@tut.by. Тел.: +375-297-43-38-68.  
**Елена Николаевна Прокопенко**, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.  
E-mail: enprokopenko@yandex.ru. Тел.: +375-293-28-23-97.

**Vasily Ivanovich Borisov**, DSc (Physics and Mathematics), Prof., Belarusian-Russian University.  
**Sergey Sergeevich Sergeev**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.  
E-mail: sss.bru@tut.by. Тел.: +375-297-43-38-68.  
**Elena Nikolayevna Prokopenko**, senior lecturer, Belarusian-Russian University.  
E-mail: enprokopenko@yandex.ru. Тел.: +375-293-28-23-97.