
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.53078/20778481_2022_2_49

УДК 534.86

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

АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ДВУХПЛАСТИНЧАТОГО КРУГЛОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

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

ACOUSTIC RADIATION FIELD OF A DUAL-PLATE CIRCULAR PIEZOELECTRIC TRANSDUCER

Аннотация

Методом численного анализа рассчитано акустическое поле излучения двухпластинчатого круглого акустического пьезоэлектрического преобразователя, содержащего круговую и кольцевую пьезопластины. Показано, что такой преобразователь позволяет проводить аподизацию генерируемого акустического пучка за счет изменения начальных фаз и амплитуд акустических волн, излучаемых круглой и кольцевой пьезопластинами, что дает возможность расширить информативность неразрушающего акустического контроля материалов и изделий.

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 двухпластинчатого круглого пьезоэлектрического преобразователя / В. И. Борисов, С. С. Сергеев, Е. Н. Прокопенко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 2 (75). – С. 49–56.

Abstract

The method of numerical analysis is used to calculate the acoustic radiation field of a dual-plate circular acoustic piezoelectric transducer, containing circular and annular piezoplates. It is shown that this transducer makes it possible to perform apodization of a generated acoustic beam due to changing initial phases and amplitudes of acoustic waves emitted by the circular and annular piezoelectric plates, which expands the information content of non-destructive acoustic testing of materials and products.

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 dual-plate circular piezoelectric transducer / V. I. Borisov, S. S. Sergeev, E. N. Prokopenko // The Belarusian-Russian university herald. – 2022. – № 2 (75). – P. 49–56.

Фазированные акустические решетки (ФАР) состоят из ряда элементарных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), каждый из которых может генерировать акустические волны с изменяемыми амплитудами и фазами. Это позволяет проводить динамическое управление характеристиками акустического поля излучения-приема ФАР, что расширяет информационные и метрологические возможности неразрушающего акустического контроля мате-

риалов и технических изделий [1–3].

Приведены результаты численного расчета акустического поля излучения пьезоакустического преобразователя, работающего в непрерывном режиме возбуждения акустических волн, состоящего из двух пьезопластин, одна из которых представляет собой круг, а вторая – кольцо, окружающее круг.

Расчетная схема пьезопреобразователя приведена на рис. 1.

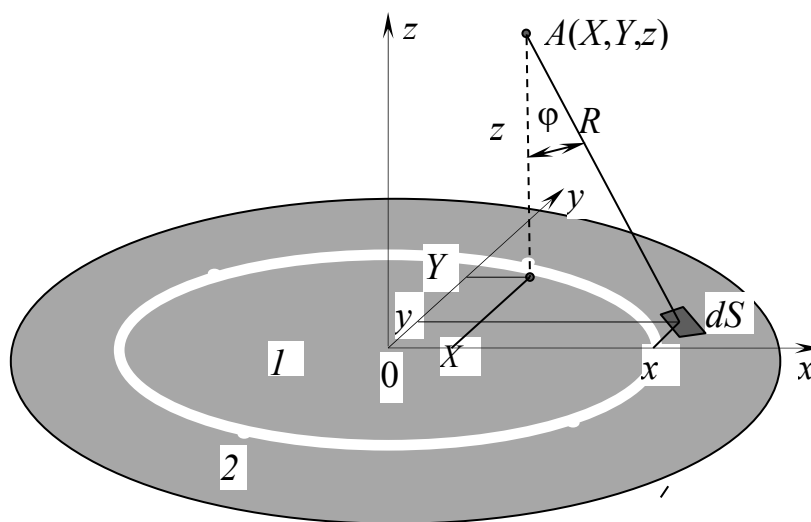


Рис. 1. Схема для расчета акустического поля двухпластинчатого кольцевого пьезопреобразователя

Расчеты акустического поля излучения проводились для нагруженных на стальное изделие пьезопластин, центральная круглая из которых имеет диаметр 10 мм, а кольцевая – ширину 5 мм и отстоит от центральной пьезопластины на 0,5 мм. Расчеты проводились для частоты возбуждения 5 МГц, что соответствует длине продольных волн в стали 1,2 мм. В целом излучающая область двухпластинчатого ПЭП представляет собой круг диаметром 21 мм.

Результирующее давление акустических волн в выбранной точке пространства $A(X, Y, z)$ определялось путем

суммирования давления от всех элементарных площадок dS , расположенных на круглой 1 и кольцевой 2 пьезопластинах, по методике, приведенной в [4].

На рис. 2 приведено распределение давления P акустических волн, генерируемых круглым двухпластинчатым ПЭП, в направлении акустической оси z для трех случаев возбуждения акустических волн пьезопластинами. Сплошной линией на рис. 2 показана зависимость, когда акустические волны, генерируемые элементарными излучателями на обеих пьезопластинах, имеют одинаковую амплитуду и начальную фазу. Пунктирной линией

обозначена зависимость давления акустических волн при возбуждении толь-

ко круглой пьезопластины, а штриховой – только кольцевой.

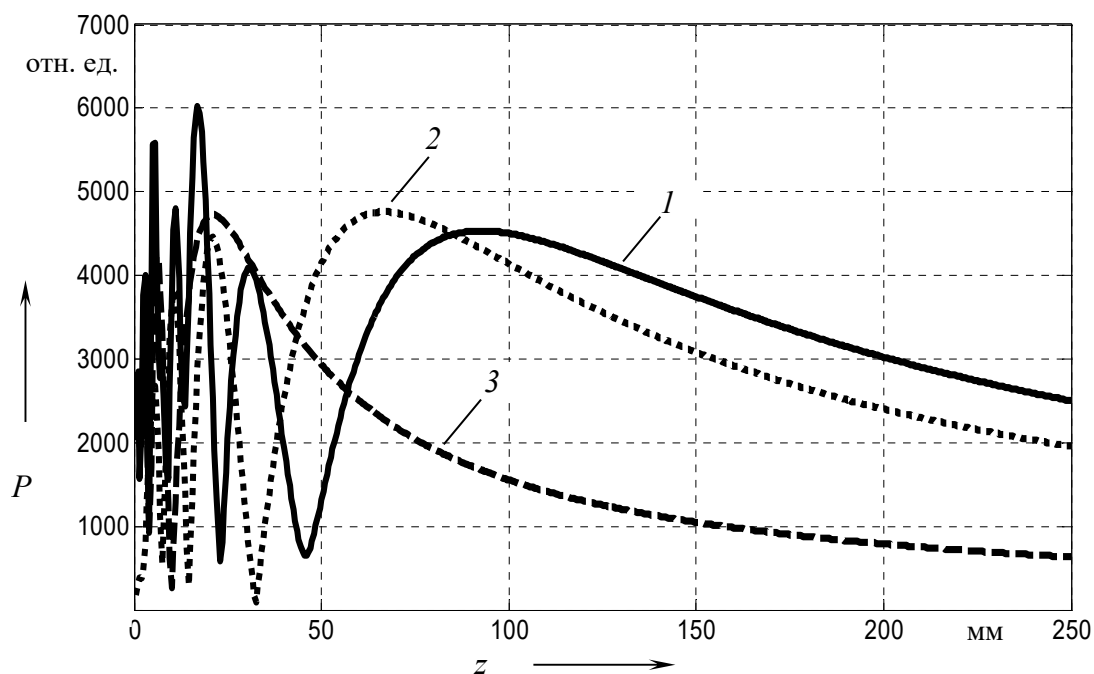


Рис. 2. Распределение давления акустических волн вдоль акустической оси, генерируемых двухпластинчатым ПЭП, при разных режимах возбуждения пьезопластин: 1 – при одновременном возбуждении круглой и кольцевой пьезопластин; 2 – при возбуждении круглой пьезопластины; 3 – при возбуждении кольцевой пьезопластины

Видно, что при каждом режиме возбуждения пьезопластин наблюдаются ближняя, средняя и дальняя зоны ПЭП с характерным режимом изменения давления акустических волн. При одновременном возбуждении круглой и кольцевой пьезопластин последний максимум, после которого наблюдается монотонное уменьшение давления акустических волн, находится на расстоянии 93,3 мм от ПЭП; при возбуждении только круглой пьезопластины – 67 мм, а при возбуждении только кольцевой – 20,5 мм.

На рис. 3 приведена трехмерная картина акустического поля излучения в плоскости, перпендикулярной акустической оси ПЭП, в области максимума, на расстоянии 93,3 мм от одновременно возбуждаемых пьезопластин. Расчет

акустического поля проводился для случая равенства амплитуд и начальных фаз акустических волн, генерируемых кольцевой и круглой пьезопластинами.

Из рис. 3 видно, что наблюдается осесимметричный акустический пучок, направленный вдоль акустической оси ПЭП. Кроме основного максимума, в распределении акустического поля наблюдается дополнительный – величиной 40 % от основного, расположенный рядом с основным. Диаметр основного пучка по половинному от максимального значения давления (полуширина) составляет 8,3 мм. Такой характер акустического поля обусловлен различием фаз акустических волн, приходящих от разных элементарных пьезоплощадок в выбранную точку на оси ПЭП.

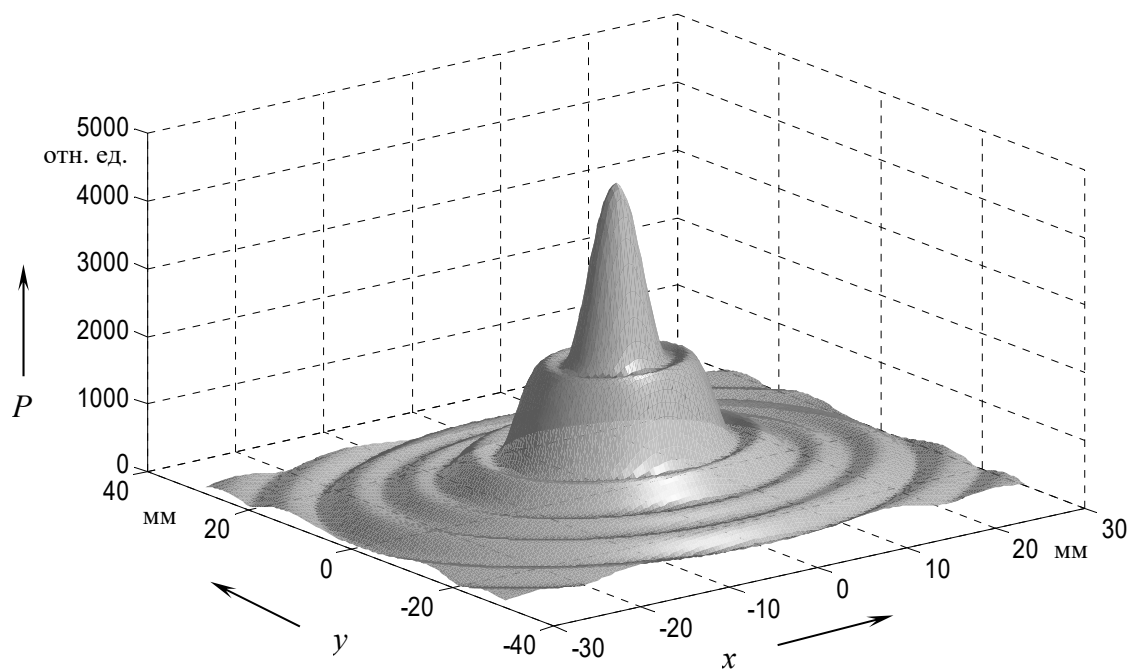


Рис. 3. Вид акустического поля излучения кольцевого двухпластинчатого ПЭП на расстоянии 93,3 мм от пьезопластин

Двухпластинчатая конструкция ПЭП позволяет уменьшить разброс фаз акустических волн, приходящих в выбранную точку пространства, путем изменения начальных фаз акустических волн, генерируемых на круговой пьезопластине, по отношению к начальным фазам волн, генерируемых на кольцевой пластине. Расчет показал, что акустические волны, генерируемые элементарными пьезоплощадками, расположенными в центре кольцевой пьезопластины на расстоянии 13 мм от центра круговой пьезопластины, приходят в точку на оси ПЭП, расположенную на расстоянии 93,3 мм, с запаздыванием по фазе на 1,8 рад относительно волн, генерируемых в центре круглой пьезопластины и приходящих в эту же точку.

Рассматриваемая конструкция ПЭП, кроме изменения фазовых характеристик акустических волн, генерируемых на круговой и кольцевой пьезопластинах, также позволяет изменять

амплитуду генерируемых волн, что дает возможность учесть разную площадь круговой и кольцевой пьезопластины. Так, для рассматриваемой конструкции ПЭП площадь кольцевой пьезопластины в 3,2 раза больше площади круговой пьезопластины, поэтому увеличение амплитуды акустических волн, генерируемых круглой пьезопластинкой, в 3,2 раза по отношению к амплитуде акустических волн, генерируемых кольцевой пьезопластинкой, позволяет выравнять вклад обеих пьезопластин в результирующее давление акустических волн.

На рис. 4 приведен вид акустического поля излучения двухпластинчатого ПЭП для случая, когда начальная фаза акустических волн, излучаемых кольцевой пьезопластинкой, опережает начальную фазу волн, излучаемых круговой пьезопластинкой, на 1,8 рад, а волны, генерируемые на обеих пьезопластинах, имеют одинаковую амплитуду.

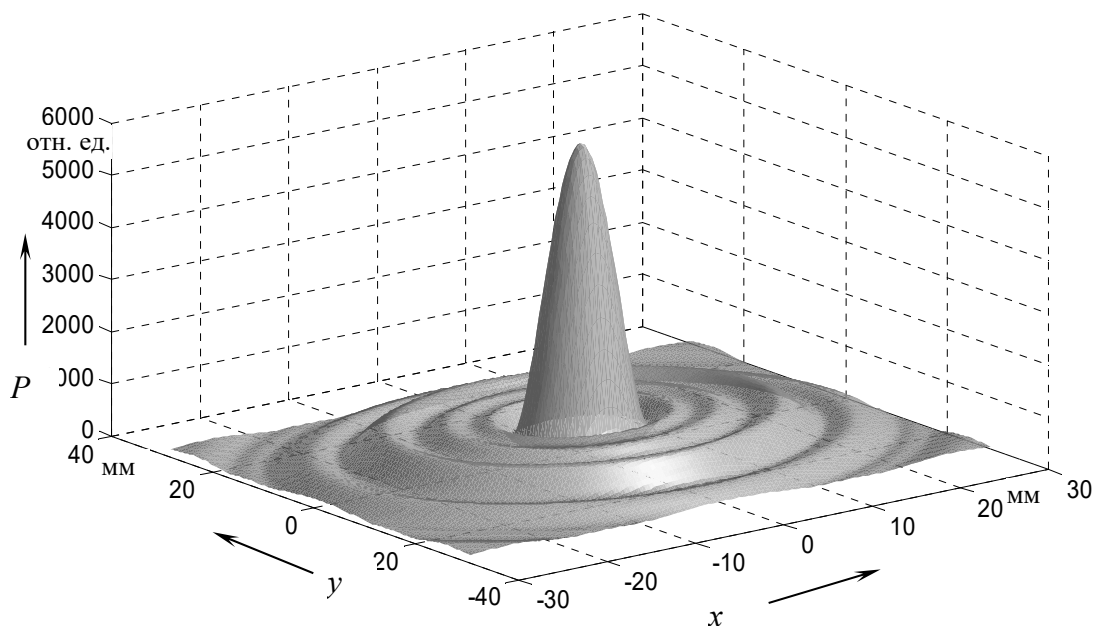


Рис. 4. Распределение давления акустических волн, генерируемых двухпластинчатым ПЭП, вдоль оси z на расстоянии 93,3 мм от пьезопластин при опережающей начальной фазе волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной, 1,8 рад

Из рис. 4 видно, что в этом случае вдоль акустической оси ПЭП наблюдается гладкий акустический пучок без дополнительного максимума. Это сглаживание дополнительного максимума, по аналогии с оптикой, можно считать акустической аподизацией. Полуширина аподизированного акустического пучка меньше полуширины неаподизированного и составляет 7,7 мм.

Характер изменения давления акустических волн на расстоянии 93,3 мм от пьезопластин в плоскости, перпендикулярной пьезопластинам, проходящей через акустическую ось ПЭП, при увеличении вклада акустических волн, генерируемых круговой пьезопластиной, с учетом разной площади круглой и кольцевой пьезопластин, представлен на рис. 5, а на рис. 6 приведены аналогичные зависимости на расстоянии от пьезопластин 65 (см. рис. 6, а) и 175 мм (см. рис. 6, б).

На рис. 5 и 6 сплошной линией 1 изображена зависимость давления акустических волн для случая равенства начальных фаз и амплитуд волн, генерируемых круглой и кольцевой пьезопластинами, а пунктирной линией 2 – зависимость давления для случая равенства амплитуд волн, генерируемых круглой и кольцевой пьезопластинами, и опережающей начальной фазе 1,8 рад акустических волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной. Штриховой линией 3 показана зависимость давления для случая, когда амплитуда волн, генерируемых круглой пьезопластиной, превышает амплитуду волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной, в 3,2 раза, а начальная фаза волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной, опережает начальную фазу акустических волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной, на 1,8 рад.

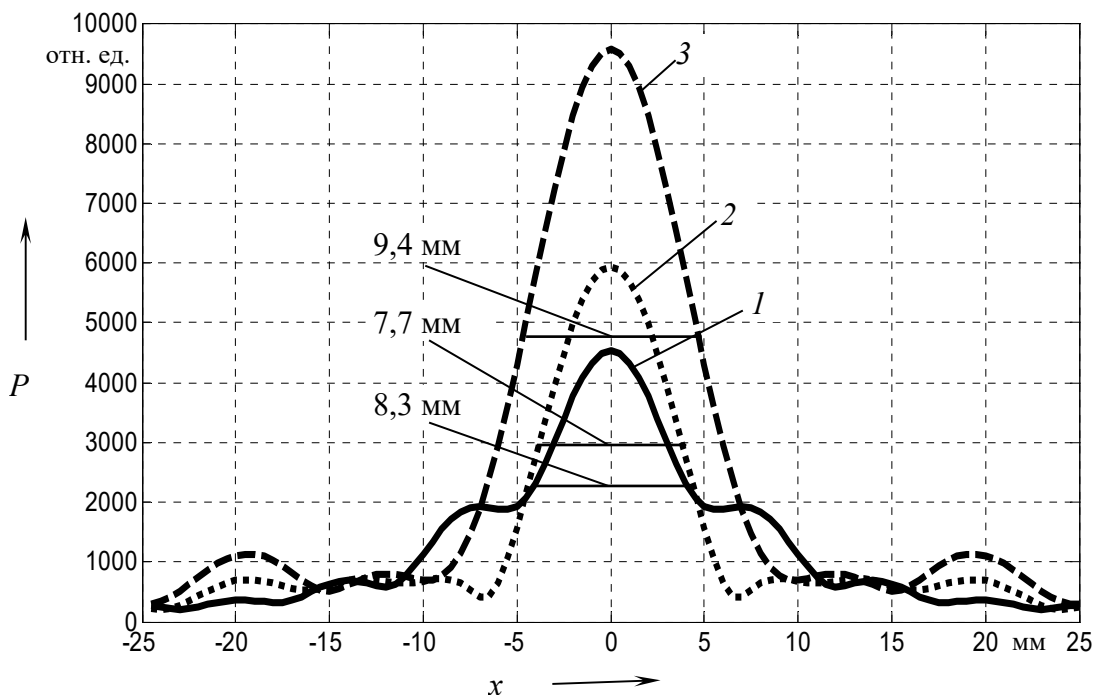


Рис. 5. Поперечное распределение давления акустических волн, генерируемых двухпластинчатым ПЭП, на расстоянии 93,3 мм от пьезопластин при разных начальных фазах и амплитудах на круговой и кольцевой пластинах

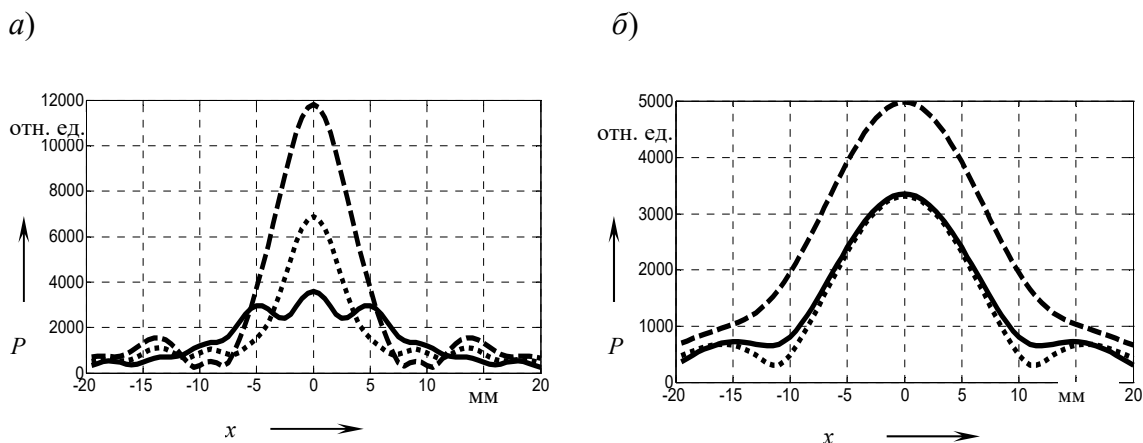


Рис. 6. Поперечное распределение давления акустических волн, генерируемых двухпластинчатым ПЭП, на расстоянии 65 (а) и 175 мм (б) от пьезопластин при разных начальных фазах и амплитудах на круговой и кольцевой пластинах

Из рис. 5 видно, что гладкая структура акустического пучка вблизи акустической оси ПЭП наблюдается в случае опережающего сдвига начальной фазы акустических волн, генерируемых

кольцевой пьезопластинкой, как для случая равенства амплитуд волн на обеих пластинах, так и в случае увеличенной амплитуды волн, генерируемых кольцевой пьезопластинкой. При этом

полуширина акустического пучка в случае увеличенной амплитуды волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной, увеличивается и составляет 9,4 мм.

Зависимости, приведенные на рис. 6, демонстрируют динамику изменения вышерассмотренных акустических пучков на разных расстояниях от плоскости, в которой располагаются пьезопластины. Видно, что при изменении этого расстояния от 65 до 175 мм аподизация акустических пучков наблюдается для случая опережающей фазы акустических волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной, как при равных амплитудах волн, генерируемых обеими пьезопластинами, так и при увеличенной амплитуде волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной. При увеличении расстояния от пьезопластин более 175 мм для акусти-

ческого пучка в случае увеличенной амплитуды волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной, появляются боковые максимумы, как для зависимости 1 на рис. 5, но для двух остальных пучков наблюдается аподизация.

При изменении величины начальной фазы акустических волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной, по сравнению с начальной фазой волн, генерируемых круговой пьезопластиной, наблюдается заметное изменение формы генерируемого акустического пучка. К примеру, на рис. 7 приведено поперечное распределение давления акустических волн P , генерируемых двухпластинчатым ПЭП, на расстоянии 93,3 мм от пьезопластин при запаздывающей начальной фазе волн, генерируемых кольцевой пьезопластиной, 1,9 рад.

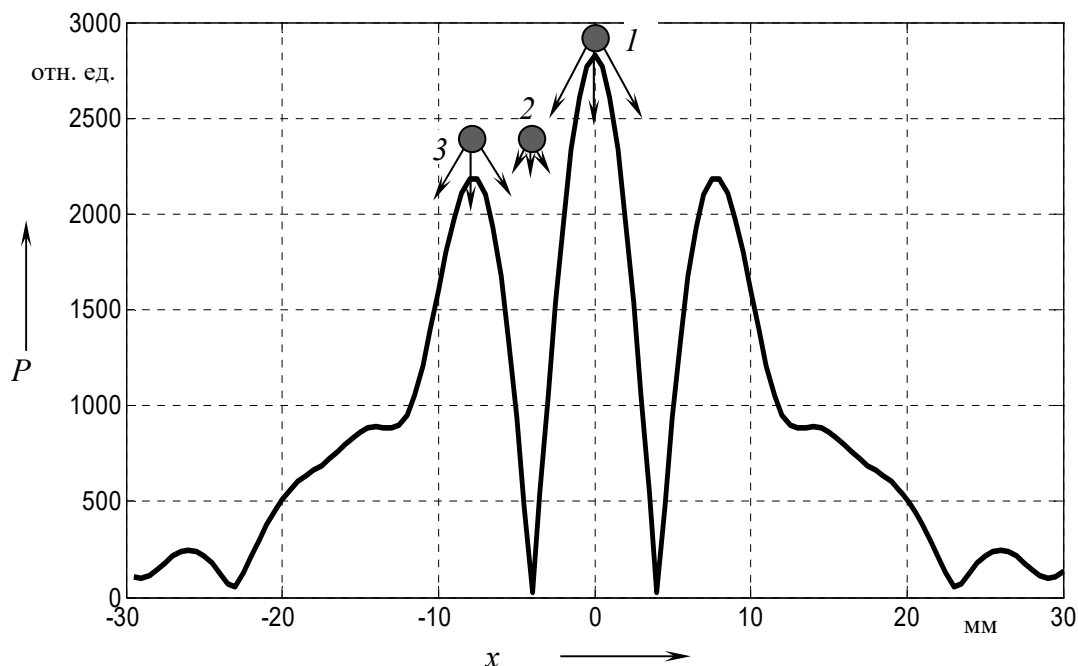


Рис. 7. Распределение давления акустических волн, генерируемых ПЭП, вдоль оси x на расстоянии 93,3 мм от пьезопластин при запаздывающей начальной фазе на кольцевой пьезопластине 1,9 рад и равных амплитудах волн, генерируемых круговой и кольцевой пьезопластинами

Из рис. 7 видно, что вдоль акустической оси ПЭП распространяется глад-

кий акустический пучок, окруженный кольцевым пучком со сравнимыми зна-

чениями максимального давления. При этом полуширина центрального пучка составляет 5,5 мм, а минимум между пучками практически равен нулю. Такая структура двойного акустического пучка может быть полезна при контроле изделий с одиночными локальными дефектами с размерами порядка 1...2 мм. При сканировании такого дефекта амплитуда отраженного от дефекта акустического сигнала увеличивается при сканировании областью максимума пучка и уменьшается при сканировании областью минимума, как это видно из рис. 7, где цифрами 1–3 обозначены локальные дефекты, а стрелками – амплитуды отраженных акустических пучков.

Сканирование таким пучком объекта контроля с локальными дефектами дает возможность оценить размеры таких дефектов.

Таким образом, расчеты показали, что двухпластинчатая круглая схема ПЭП позволяет проводить аподизацию генерируемого акустического пучка за счет изменения начальных фаз и амплитуд акустических волн, излучаемых круглой и кольцевой пьезопластинами. Описанные возможности перестройки акустического поля излучения ПЭП позволяют расширить информативность 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. 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 (48). – С. 102–108.

Статья сдана в редакцию 18 апреля 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.
Елена Николаевна Прокопенко, ст. преподаватель, Белорусско-Российский университет.
E-mail: enprokopenko@yandex.ru.

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.
Elena Nikolayevna Prokopenko, senior lecturer, Belarusian-Russian University.
E-mail: enprokopenko@yandex.ru.