

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 534.86

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

АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ВИДЕ ДВУХМЕРНОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ФАЗИРОВАННОЙ РЕШЕТКИ

UDC 534.86

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

ACOUSTIC RADIATION FIELD OF A PIEZOELECTRIC TRANSDUCER IN THE FORM OF A TWO-DIMENSIONAL RECTANGULAR PHASED ARRAY

Аннотация

Методом численного анализа рассчитано акустическое поле излучения акустических преобразователей в виде квадратных двухмерных фазированных акустических решеток. Показано, что при изменении сдвига фаз на отдельных пьезоэлементах решетка может работать не только в режиме фокусировки акустических волн на акустической оси решетки, но и во внеосевых точках. В результате фокусировки в акустическом поле излучения решетки кроме основного акустического пучка в заданной точке пространства наблюдаются дополнительные пучки, по величине соизмеримые с основным.

Ключевые слова:

акустическое поле, акустическая фазированная решетка, пьезоэлектрический преобразователь, акустическая ось, дальняя зона, ближняя зона, акустическая волна, акустическое давление, фокальная плоскость, фокус.

Abstract

The acoustic radiation field of acoustic transducers in the form of square two-dimensional phased acoustic arrays is calculated by the method of numerical analysis. It is shown that when the phase shift on individual piezoelectric elements changes, the grating can operate not only in the mode of focusing acoustic waves on the acoustic axis of the grating, but also at off-axis points. As a result of focusing, in the acoustic field of grating radiation the additional beams are observed at a given point in space, in addition to the main acoustic beam, which are comparable in magnitude to the main beam.

Keywords:

acoustic field, acoustic phased array, piezoelectric transducer, acoustic axis, far zone, acoustic wave, acoustic pressure, focal plane, focus.

В настоящее время пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) в виде фазированных акустических решеток (ФАР) все больше применяются для решения задач неразрушающего акустического контроля материалов и технических изделий, т. к. они позволяют расширить функциональные и метрологиче-

ские характеристики физических измерений [1, 2]. Это достигается благодаря возможности динамической перестройки акустического поля излучения-приема. Конструктивные исполнения современных ФАР весьма разнообразны.

Приведены результаты расчета акустического поля излучения пьезо-

электрического преобразователя в виде плоской прямоугольной фазированной решетки, представляющей собой набор из 81 квадратной пьезопластинки. Схема пьезопреобразователя изображена на рис. 1. Пьезопреобразователь содержит девять рядов, каждый из которых содержит девять квадратных элементарных пьезопластин размерами 1×1 мм, расположенных параллельно друг другу с зазором между рядами 0,5 мм.

Предполагается, что двухмерная ФАР позволит осуществить не только динамическую фокусировку ПЭП, но и

динамическое пространственное сканирование узкого акустического пучка в контролируемом объекте.

Расчеты акустического поля излучения проводились для непрерывного режима работы элементарных пьезопреобразователей, работающих на частоте 4,545 МГц, нагруженных на воду, что соответствует длине акустической волны 0,33 мм.

Результирующая величина давления в точке A с координатами X, Y, z будет пропорциональна следующему интегралу [3, 4]:

$$P(X, Y, z) = \int_S \frac{P_0}{R} \cos \varphi (\cos(\omega t - kR + \psi_i)) dS, \quad (1)$$

где R – расстояние от точечного излучателя площадью dS , расположенного в точке с координатами $x, y, 0$, до точки A ; k – модуль волнового вектора (волновое число), $k = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ – длина волны в

материале среды, где распространяется акустическая волна; φ – угол, учитыва-

ющий наклон элементарной площадки dS к направлению на рассматриваемую точку; ψ_i – начальная фаза акустической волны, дополнительно вводимая при работе ПЭП в режиме фазированной решетки.

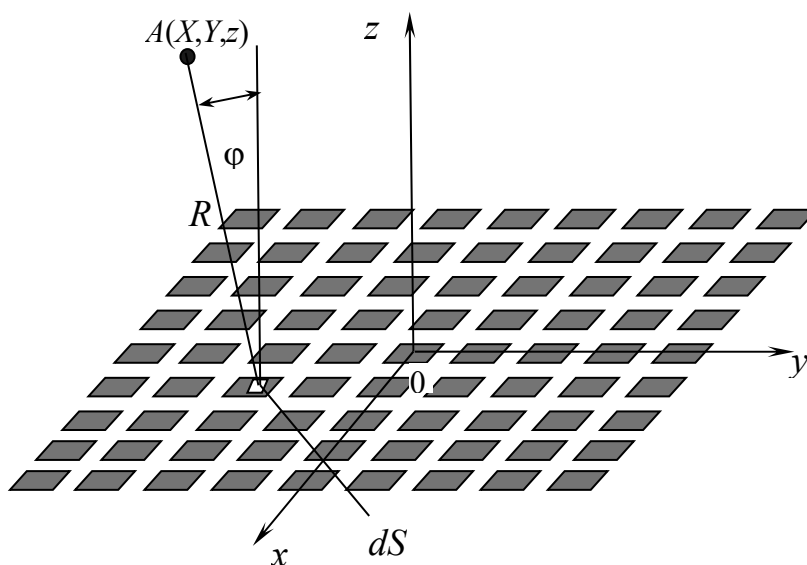


Рис. 1. Схема двухмерной фазированной решетки

Расчет интеграла (1) проводился по методике, приведенной в [5].

Для решения задачи фокусировки всех генерируемых акустических волн ПЭП в выбранной точке пространства на основании конструктивной схемы фазированной акустической решетки производится расчет расстояний от каждого элементарного излучателя ФАР до этой точки и с учетом скорости акустических волн определяются величины фазовых сдвигов при распространении акустических волн от конкретного излучателя до выбранной точки. После этого проводится коррекция начальных фаз на каждом элементарном излучателе таким образом, чтобы акустические волны, излучаемые отдельными квад-

ратными пьезоизлучателями, приходили в выбранную точку в одной и той же фазе. Считается, что выбранная точка и будет фокальной точкой ФАР.

К примеру, на рис. 2 приведено рассчитанное распределение акустического давления P вдоль акустической оси ПЭП z для различных случаев значений начальных фаз элементарных квадратных пьезоэлектрических излучателей. Считается, что акустическая ось ФАР совпадает с перпендикуляром, восстановленным от центра фазированной решетки, который в рассматриваемом случае совпадает с центром элементарного пьезоизлучателя, расположенного в пятом горизонтальном и вертикальном рядах фазированной решетки.

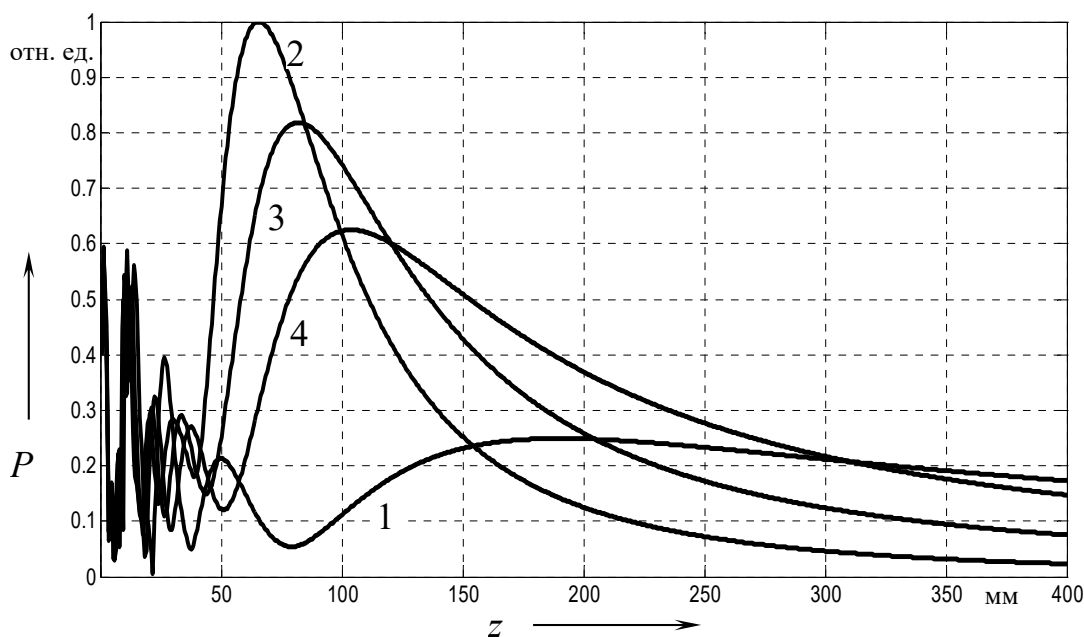


Рис. 2. Распределение давления акустических волн вдоль оси двумерной фазированной решетки для различных случаев значений начальных фаз элементарных излучателей: 1 – начальные фазы на всех элементарных квадратных пьезоэлементах имеют нулевое значение; 2 – начальные фазы пьезоэлементов выбраны для фокусировки волн на расстоянии 75 мм от плоскости ПЭП; 3 – начальные фазы пьезоэлементов выбраны для фокусировки волн на расстоянии 100 мм от плоскости ПЭП; 4 – начальные фазы выбраны для фокусировки волн на расстоянии 150 мм от плоскости ПЭП

Кривая 1 соответствует условию, когда начальные фазы на всех элементарных квадратных пьезоэлементах имеют нулевое значение.

Кривая 2 соответствует условию,

когда начальные фазы на элементарных пьезоэлементах выбраны таким образом, что излучаемые ими акустические волны приходят с одинаковой фазой в точку на акустической оси фазирован-

ной решетки, расположенную на расстоянии 75 мм от плоскости, где расположены элементарные пьезоизлучатели.

Кривая 3 соответствует условию прихода в одной и той же фазе акустических волн в точку на акустической оси фазированной решетки, расположенную на расстоянии 100 мм от плоскости, где расположены элементарные пьезоизлучатели.

Кривая 4 соответствует условию фокусировки акустических волн в точке на акустической оси фазированной решетки, расположенной на расстоянии 150 мм от плоскости, где расположены элементарные пьезоизлучатели.

Из рис. 2 видно, что для всех вышерассмотренных случаев наблюдается ближняя зона с немонотонным изменением давления акустических волн, а также максимумы давления и монотонное уменьшение давления в дальней зоне. При этом максимальное значение давления акустических волн для случая одинаковых начальных фаз на всех элементарных пьезоплощадках (кривая 1) наблюдается на расстоянии 185 мм от пьезопластин. Характерной особенностью акустического поля для рассматриваемой ФАР, работающей в режиме фокусировки акустических волн на акустической оси ПЭП, является то, что фокальная точка, где наблюдается максимум давления акустических волн, находится ближе к решетке пьезоэлементов, чем точка, для которой рассчитывалось фокусное расстояние. Так, из кривой 2 видно, что максимум давления акустических волн, соответствующий реальному фокусу, наблюдается на расстоянии 65 мм от пьезоэлементов, хотя рассчитываемое фокусное расстояние составляет 75 мм. Для фокусирующего режима работы ФАР, рассчитанной на фокусировку в точке, отстоящей на 100 мм от плоскости пьезопреобразователей, реальное фокусное расстояние составило 84 мм (кривая 3). Выбор же начальных фаз излучения на отдельных пьезопластинах ФАР для фокуси-

ровки на расстоянии 150 мм от пьезоэлементов показал, что максимум давления акустических волн в этом случае составляет 103 мм (кривая 4). Такой характер изменения акустического давления обусловлен тем, что акустические волны, излучаемые элементарными площадками dS , представляют собой волны со сферическим волновым фронтом, амплитуда которых убывает обратно пропорционально проходимому расстоянию. Сферический характер генерируемых акустических волн приводит также к тому, что эффективная перестройка фокусного расстояния наблюдается в диапазоне от 50 до 100 мм при изменении начальных фаз на элементарных пьезоизлучателях, рассчитанных на фокусировку акустических волн рассматриваемой ФАР с фокусным расстоянием от 75 до 150 мм.

Из рис. 2 также видно, что при увеличении фокусного расстояния амплитуда давления акустических волн уменьшается, что связано с убыванием амплитуды сферических волн с расстоянием и уширением пучка акустических волн. Так, диаметр акустического пучка в соответствующей фокальной плоскости по уровню половинной амплитуды для кривой 2 на рис. 2 составляет 2 мм, для кривой 3 – 2,54 мм, а для кривой 4 – 3,2 мм.

Характерной особенностью распределения акустического поля в плоскости, перпендикулярной акустической оси ФАР, является то, что кроме основного максимума на акустической оси наблюдается ряд дополнительных максимумов. К примеру, на рис. 3 приведено распределение давления акустических волн P в направлении оси x в плоскости, перпендикулярной акустической оси ФАР, отстоящей на расстоянии 185 мм от плоскости, где расположены элементарные пьезоизлучатели для случая, когда начальные фазы акустических волн, генерируемых элементарными пьезоизлучателями, имеют одинаковую фазу.

Из рис. 3 видно, что в плоскости, перпендикулярной акустической оси,

акустическое поле носит неоднородный характер. Вокруг основного максимума давления акустических волн, расположенного на акустической оси ПЭП, в радиусе 92 мм наблюдается ряд локальных максимумов, расположенных близко друг к другу. Наиболее интенсивные явно выраженные максимумы расположены на расстоянии 42 и 92 мм

от акустической оси ПЭП, величины которых составляют 39 % и 19 % от величины основного максимума. При дальнейшем увеличении расстояния от акустической оси ПЭП давление акустических волн спадает практически до нуля. Такая же картина распределения давления акустических волн наблюдается в этой же плоскости в направлении оси u .

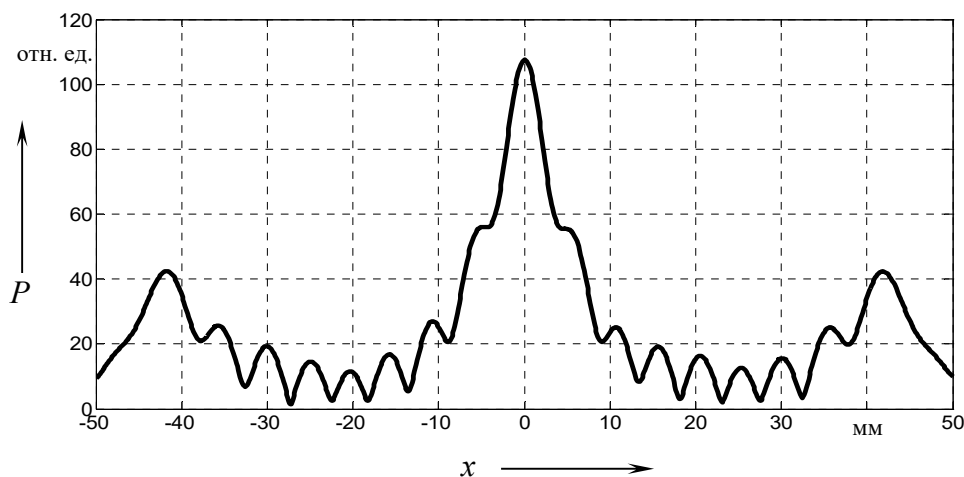


Рис. 3. Распределение давления акустических волн вдоль оси x в плоскости, перпендикулярной акустической оси ФАР, расположенной на расстоянии 185 мм от пьезопластин, при одинаковых значениях начальных фаз элементарных пьезоизлучателей

Несколько иной характер акустического поля наблюдается при работе ФАР в режиме осевой фокусировки. К примеру, на рис. 4 приведено распределение давления акустических волн P в направлении оси x в плоскости, где наблюдается максимальное давление волн, перпендикулярной акустической оси ФАР, отстоящей на расстоянии 84 мм от плоскости, где расположены элементарные пьезоизлучатели для случая, когда начальные фазы акустических волн, генерируемых элементарными пьезоизлучателями, выбраны такими, чтобы они имели одинаковое значение для акустических волн, генерируемых элементарными пьезоизлучателями в точке на оси ПЭП на расстоянии 100 мм от плоскости, в которой расположены пьезопластины.

Как видно из рис. 4, в распределе-

нии давления акустических волн наблюдается только пять явно выраженных максимумов, которые соответствуют узким акустическим пучкам. Наиболее интенсивный пучок располагается на акустической оси ФАР. При удалении от акустической оси на расстояние более 50 мм давление акустических волн практически спадает до нуля. Аналогичное распределение давления акустических волн наблюдается и для других режимов фокусировки в плоскостях, где наблюдается максимальное давление акустических волн, с той лишь разницей, что для этих случаев реализуются разные расстояния между максимумами и их величинами.

Так как акустическая ось ФАР является линией пересечения плоскостей hoz и uoz , являющимися плоскостями симметрии ФАР, то распределение дав-

ления акустических волн в направлении оси y в рассматриваемых плоскостях такое же, как и в направлении оси x .

На рис. 5 приведена объемная картина акустического поля излучения ФАР, работающей в режиме осевой фокусировки излучаемых акустических волн, в плоскости, перпендикулярной акустической оси ФАР, где наблюдается максимальное значение давления аку-

стических волн, на расстоянии 65 мм от плоскости, где располагаются элементарные пьезоизлучатели, для случая, когда начальные фазы элементарных пьезоизлучателей имеют такие значения, что излучаемые ими волны приходят в точку, расположенную на акустической оси ФАР на расстоянии 75 мм от пьезоизлучателей.

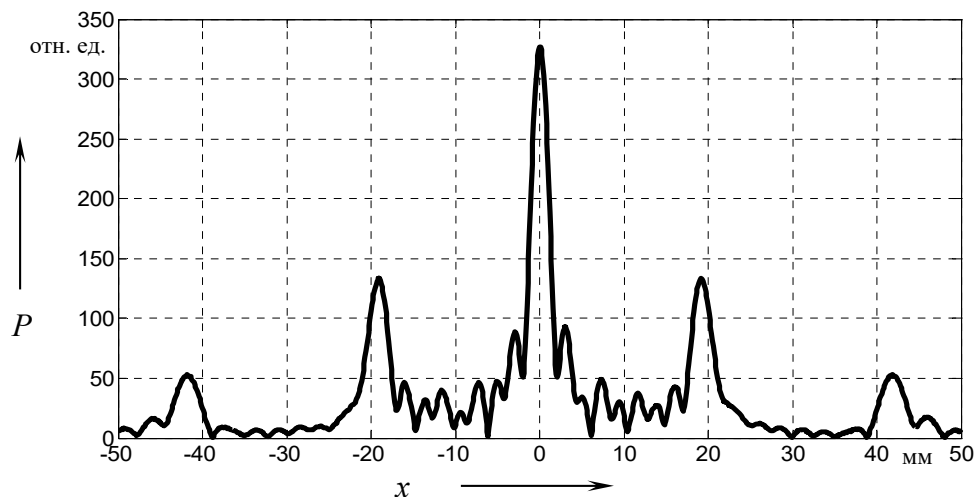


Рис. 4. Распределение давления акустических волн вдоль оси x в плоскости, перпендикулярной акустической оси ФАР, расположенной на расстоянии 84 мм от пьезопластин, при начальных фазах элементарных пьезоизлучателей, выбранных для осевой фокусировки акустических волн на расстоянии 100 мм от пьезоизлучателей

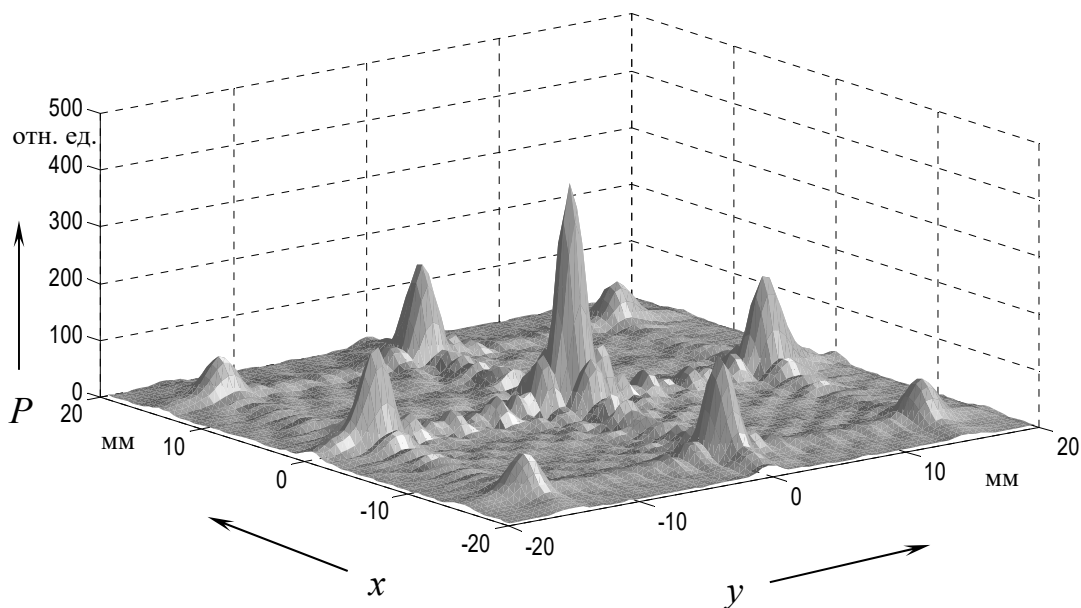


Рис. 5. Вид акустического поля пьезопреобразователя в виде двумерной фазированной решетки с фазами на элементарных пьезоэлементах, рассчитанных на фокусировку акустических волн на расстоянии 75 мм от пьезопластин в фокальной плоскости с фокусным расстоянием 65 мм

Видно, что характерной особенностью акустического поля ФАР, работающей в режиме осевой фокусировки, является наличие кроме основного акустического пучка с максимальной амплитудой, распространяющегося вдоль акустической оси ФАР, ряда дополнительных акустических пучков с меньшей амплитудой, расположенных симметрично относительно основного пучка. При увеличении фокусного расстояния ФАР расстояние между дополнительными акустическими пучками и основным увеличивается.

Из рис. 5 видно, что акустическое поле излучения носит симметричный характер относительно координатных плоскостей xoz и yoz .

Возможность пространственной перестройки акустического пучка ФАР проверялась следующим образом. Выбирались координаты точки, совпадающей с центром акустического пучка, и определялись акустические пути от всех элементарных пьезоизлучателей решетки до выбранной точки. С учетом этих акустических путей определялись начальные фазы для каждого элементарного пьезоизлучателя такие, чтобы акустические волны, излучаемые всеми элементарными пьезоизлучателями, приходили в выбранную точку в одной фазе. На рис. 6 продемонстрирован один из вариантов такой пространственной перестройки.

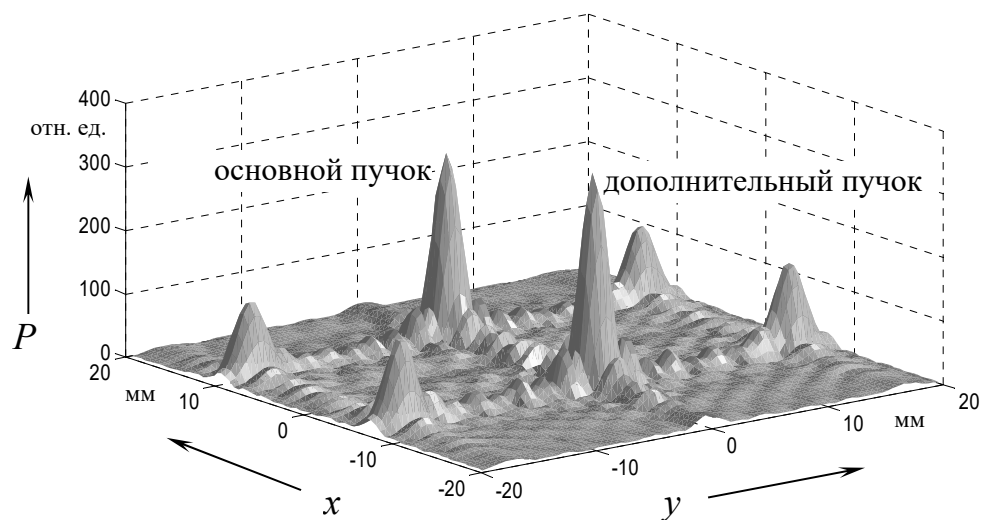


Рис. 6. Вид акустического поля ФАР на расстоянии 75 мм от пьезопластин при одинаковых фазах акустических волн, приходящих в точку с координатами $x = 10$ мм, $y = 0$ мм, $z = 75$ мм

На рис. 6 приведено пространственное распределение давления акустических волн при условии их фокусировки на расстоянии 75 мм от пьезопластин в точке с координатами $x = 10$ мм и $y = 0$ мм. Из рис. 6 видно, что в акустическом поле наблюдаются два ярко выраженных акустических пучка: основной пучок, ось которого совпадает с координатами

выбранной точки ($x = 10$ мм, $y = 0$ мм), и дополнительный акустический пучок, ось которого имеет координаты $x = -6,6$ мм, $y = 0$ мм. При этом максимальная величина давления акустических волн в дополнительном пучке в 1,16 раза больше, чем в основном. Оба акустических пучка по уровню поло-

винной амплитуды давления акустических волн имеют диаметр 2,4 мм.

На рис. 7 приведена объемная картина акустического поля излучения ФАР в плоскости, перпендикулярной акустической оси решетки, на расстоянии 100 мм от пьезопластин при одинаковых фазах акустических волн, приходящих в точку с координатами $x = 10$ мм, $y = 10$ мм, $z = 100$ мм.

Из рис. 7 видно, что кроме основного акустического пучка с максимальной величиной давления акустических волн, ось которого расположена в точке

с координатами $x = 10$ мм, $y = 10$ мм, $z = 100$ мм, наблюдаются дополнительные акустические пучки, сравнимые по величине с основным пучком. Ось дополнительного акустического пучка 2 расположена в точке с координатами $x = 10$ мм, $y = -12,2$ мм, $z = 100$ мм, пучка 3 – с координатами $x = -12,2$ мм, $y = -12,2$ мм, $z = 100$ мм, пучка 4 – с координатами $x = -12,2$ мм, $y = 10$ мм, $z = 100$ мм. Диаметр всех четырех акустических пучков по уровню половинной амплитуды давления акустических волн составляет 3,3 мм.

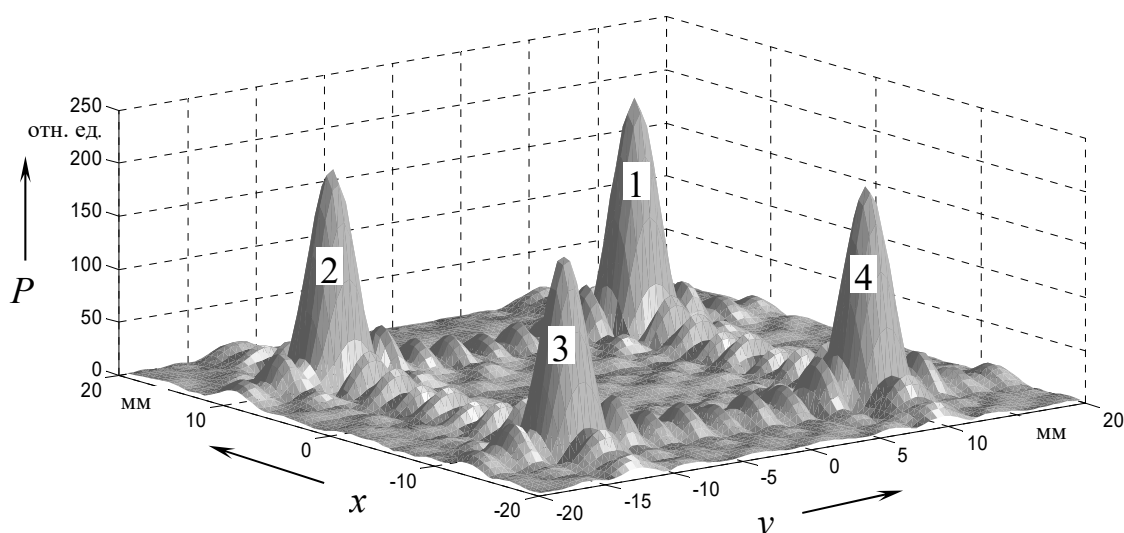


Рис. 7. Акустическое поле ФАР при одинаковых фазах акустических волн, приходящих в точку с координатами $x = 10$ мм, $y = 10$ мм, $z = 100$ мм, на расстоянии 100 мм от пьезопластин: 1 – основной акустический пучок; 2–4 – дополнительные акустические пучки

Рис. 7 соответствует отклонению основного акустического пучка от акустической оси ФАР на 5,7 град. Проведенные расчеты показали, что аналогичная картина акустического поля наблюдается и при большем отклонении основного акустического пучка от акустической оси ФАР.

К примеру, проведенные расчеты показали, что в плоскости, перпендикулярной акустической оси решетки, на расстоянии 100 мм от пьезопластин при

одинаковых фазах акустических волн, приходящих в точку с координатами $x = 15$ мм, $y = 15$ мм, $z = 100$ мм, что соответствует отклонению основного акустического пучка от акустической оси ФАР на 8,5 град, также наблюдаются четыре акустических пучка, как на рис. 7. Кроме основного акустического пучка 1, ось которого расположена в точке с координатами $x = 15$ мм, $y = 15$ мм, $z = 100$ мм, наблюдаются дополнительные акустические пучки.

дополнительного акустического пучка 2 расположена в точке с координатами $x = 15$ мм, $y = -7$ мм, $z = 100$ мм, пучка 3 – с координатами $x = -7$ мм, $y = -7$ мм, $z = 100$ мм, пучка 4 – с координатами $x = -7$ мм, $y = 15$ мм, $z = 100$ мм. Диаметр всех четырех акустических пучков по уровню половинной амплитуды давления акустических волн составляет порядка 3 мм. Но отличительной особенностью акустического поля в этом случае является то, что максимальная величина давления акустических волн наблюдается для дополнительного пучка 3, а минимальная – для основного пучка 1, которая составляет 0,64 от величины дополнительного пучка 3. Величина давления акустических волн для дополнительных пучков 2 и 4 составляет 0,75 величины дополнительного пучка 3.

При дальнейшей угловой отстройке основного акустического пучка от акустической оси ФАР наблюдается уменьшение интенсивности основного акустического пучка и увеличение интенсивности дополнительных пучков.

Таким образом, проведенные исследования акустического поля излучения ПЭП в виде квадратной двумерной фазированной решетки показали, что такая решетка может работать в режиме фокусировки акустических волн на оси ФАР. При этом фокусное расстояние, на котором наблюдается наибольшая ин-

тенсивность акустических волн, меньше расстояния от плоскости, содержащей элементарные пьезоизлучатели, до точки на акустической оси ФАР, в которую акустические волны от всех элементарных пьезоизлучателей приходят в одной фазе. Изменением начальных фаз акустических волн, излучаемых элементарными пьезоизлучателями, можно сфокусировать акустические волны в виде узких акустических пучков во внеосевых точках пространства.

При работе ФАР в режиме как осевой, так и внеосевой фокусировки кроме основных акустических пучков наблюдаются дополнительные акустические пучки, пространственное расположение и интенсивности которых зависят от координат точек, в которые акустические волны от всех пьезоизлучателей приходят в одной фазе. Наличие дополнительных акустических пучков может затруднять проведение акустического неразрушающего контроля с помощью рассмотренных ФАР.

Проведенные расчеты показали, что наибольшая интенсивность основных акустических пучков, по сравнению с интенсивностью дополнительных пучков, реализуется при условии, когда разность акустических путей от каждого элементарного пьезоизлучателя до выбранной точки составляет порядка двух длин акустических волн в среде, в которой они распространяются.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фалькевич, С. А.** Фазированные решетки в ультразвуковой дефектоскопии (обзор) / С. А. Фалькевич // Дефектоскопия. – 1984. – № 3. – С. 3–16.
2. **Борисов, В. И.** Акустическое поле излучения пьезопреобразователя в виде одномерной фазированной решетки / В. И. Борисов, С. С. Сергеев, Е. Н. Прокопенко // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2018. – № 1. – С. 27–37.
3. Ультразвуковые пьезопреобразователи для неразрушающего контроля / Под ред. И. Н. Ермолова. – Москва: Машиностроение, 1986. – 280 с.
4. **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.

5. **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.

Статья сдана в редакцию 12 апреля 2021 года

Василий Иванович Борисов, д-р физ.-мат. наук, проф., магистр техн. наук, Белорусско-Российский университет.

Сергей Сергеевич Сергеев, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

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

Александр Сергеевич Никитин, аспирант, Белорусско-Российский университет.

Vasily Ivanovich Borisov, DSc (Physics and Mathematics), Prof., MSc (Engineering), Belarusian-Russian University.

Sergey Sergeevich Sergeev, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.

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

Aleksandr Sergeevich Nikitin, PhD student, Belarusian-Russian University.