

УДК 534.86

Акустическое поле излучения пьезопреобразователя в виде одномерной фазированной решетки

The acoustic radiation field of the piezoelectric transducer in the form of a one-dimensional phased array

Борисов В.И., Сергеев С.С., Прокопенко Е.Н.
Borisov V.I., Sergeev S.S., Prokopenko E.N.

В работе представлена математическая модель преобразователя в виде одномерной фазированной решетки. Проведен расчет поля излучения преобразователя при различном сдвиге фаз между элементами решетки, а также расчет поля излучения в зависимости от количества элементов и частоты генерируемых колебаний.

The paper presents a mathematical model of the converter in the form of a one-dimensional phased array. The calculation of the radiation field of the transducer at different phase shifts between the lattice elements, as well as the calculation of the radiation field depending on the number of elements and the frequency of generated fluctuations.

Ультразвуковые методы неразрушающего контроля в настоящее время находят широкое применение для дефектоскопии различных материалов и изделий в процессе их производства и эксплуатации. Одной из важнейших характеристик, влияющих на информационные возможности и достоверность контроля, является акустическое поле используемых преобразователей и его временные параметры [1, 2].

В последние годы все большее применение в автоматизированных и механизированных системах неразрушающего контроля находят ультразвуковые фазированные решетки

Фазированной решеткой называют преобразователь в виде излучающих и принимающих ультразвук элементов, расположенных на определенном расстоянии друг от друга. Возбуждающие электрические импульсы на элементы подают со сдвигом фазы (времени). Аналогичные электрические временные задержки для каждого принимающего элемента вводят в приемный тракт. Изменяя сдвиг фазы, управляют акустическим полем преобразователя. Иногда также изменяют амплитуды сигналов, подаваемых на различные элементы и снимаемых с них [1].

В работах [3–5] рассмотрены основные принципы формирования сигналов линейного прямого преобразователя с фазированной решеткой, содержащего 4, 16, 64, 128 элементов, а также проведены расчеты диаграмм направленности в зависимости от числа излучающих элементов, размеров решетки и расстояния до нее с учетом временной задержки при подаче импульсов на элементы решетки.

Как следует из работ [1–5], обычно для расчета акустического поля фазированных решеток используется теория дифракции света на оптических дифракционных решетках. При этом выполняются условия, при которых период дифракционной решетки превышает длину волны дифрагирующего на решетке излучения и каждая точка волнового фронта в плоскости дифракционной решетки является источником сферической волны, что не в полной мере соответствует излучению акустических волн, так как элементарный излучатель акустических волн является косинусным.

В данной работе представлен численный анализ особенностей акустического поля излучающего преобразователя в виде фазированной решетки, расположенной в плоскости XOY , содержащей 16, 32 и 64 элементарных излучателей с периодом 1 мм, размерами $0,5 \times 10$ мм, нагруженных на воду и работающих в непрерывном режиме на разных частотах.

Расчетная схема преобразователя в виде фазированной решетки представлена на рисунке 1.

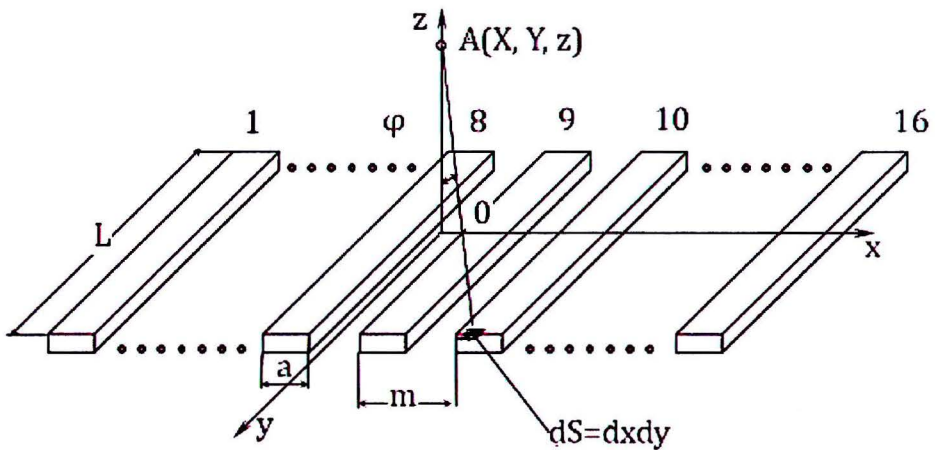


Рисунок 1. Схема для расчета акустического поля преобразователя в виде фазированной решетки

Результирующая сила давления в точке A с координатами X, Y, Z будет определяться интегралом:

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

где R – расстояние от элементарного излучателя площадью $dS = dxdy$, расположенного в точке с координатами x, y , до точки A ;

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

λ – длина волны в материале среды, где распространяется акустическая волна;

P_0 – амплитуда акустической волны на единичном расстоянии от элементарного излучателя;

S – общая площадь всех элементов фазированной решетки;

ψ – фаза.

В этом выражении расстояние R от точечного излучателя площадью $dS = dxdy$, расположенного в точке с координатами x, y , до точки A определяется следующим выражением:

$$R = \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + z^2} \quad (2)$$

В выражении (1) считаем, что от элементарного излучателя площадью dS излучается сферическая акустическая волна, что не совсем соответствует действительности. 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.

Этот коэффициент определяется следующим выражением:

$$\cos \varphi = \frac{z}{R} = \frac{z}{\sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + z^2}}. \quad (3)$$

Тогда с учетом выражений (2) и (3) формулу (1) можно переписать следующим образом:

$$\begin{aligned}
 F(X, Y, z) &= \int_S \frac{P_0 z}{R^2} \left(\cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} R - \psi \right) \right) dS = \\
 &= \int_S \frac{P_0 z}{\left((X-x)^2 + (Y-y)^2 + z^2 \right)} \left(\cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\left((X-x)^2 + (Y-y)^2 + z^2 \right)} - \psi \right) \right) dS \quad (4)
 \end{aligned}$$

Расчет этого интеграла будем проводить путем численного интегрирования, на основе методики приведенной в работе (6).

Амплитуда результирующего давления определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned}
 P(X, Y, z) &= \sqrt{\left(\sum_1^N \sum_0^M \frac{z}{R^2} \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} R - \psi_N \right) \right)^2 + \left(\sum_1^N \sum_0^M \frac{z}{R^2} \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} R - \psi_N \right) \right)^2} = \\
 &= \sqrt{\left(\sum_1^N \sum_0^M \frac{z}{\left((X-x)^2 + (Y-y)^2 + z^2 \right)} \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\left((X-x)^2 + (Y-y)^2 + z^2 \right)} - \psi_N \right) \right)^2 + \left(\sum_1^N \sum_0^M \frac{z}{\left((X-x)^2 + (Y-y)^2 + z^2 \right)} \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\left((X-x)^2 + (Y-y)^2 + z^2 \right)} - \psi_N \right) \right)^2} \quad (5)
 \end{aligned}$$

Полученное выражение (5) позволяет определить амплитуду давления акустической волны, генерируемой фазированной решеткой, состоящей из N пластин, в любой точке пространства.

На рисунке 2 приведено распределение амплитуды результирующей волны P вдоль оси пьезопреобразователя на различных расстояниях z от плоскости решетки. Расчет проведен для случая равных амплитуд и отсутствия сдвига фаз акустической волны на каждом из элементов решетки.

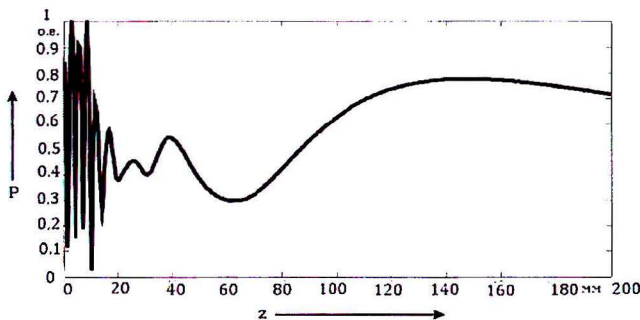
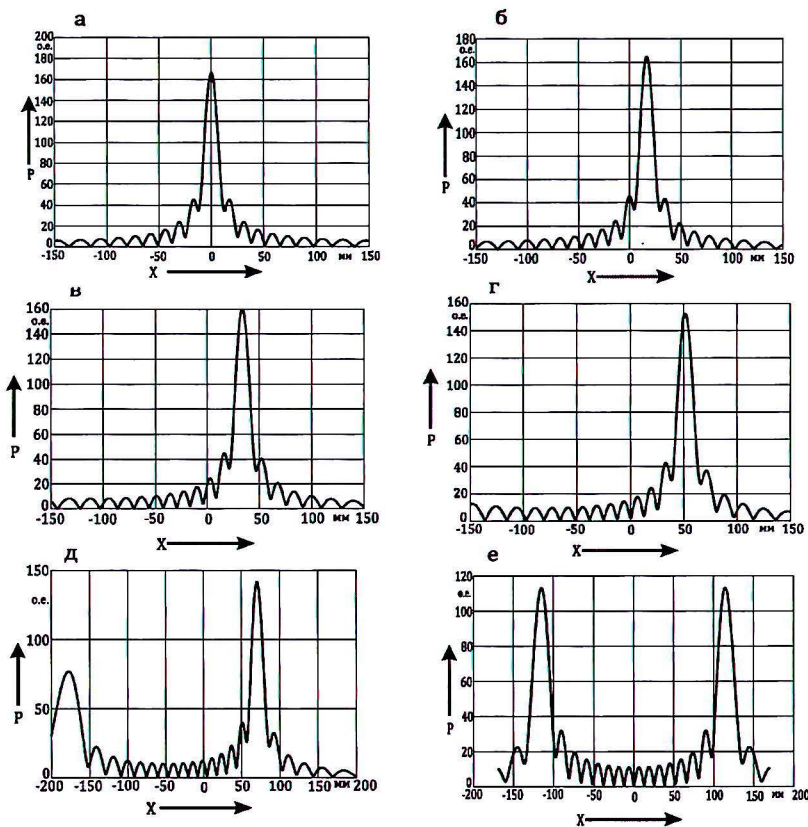


Рисунок 2. Зависимость амплитуды результирующей волны вдоль оси пьезопреобразователя на различных расстояниях

Из приведенного рисунка видно, что при изменении расстояния от 0 до 140 мм наблюдаются осцилляции давления акустической волны, что соответствует ближней зоне пьезопреобразователя, а на расстояниях, больших 140 мм, наблюдается монотонное уменьшение амплитуды результирующей акустической волны, что соответствует дальней зоне.

Характер изменения акустического поля в зависимости от сдвига фаз на соседних элементах фазированной решетки можно проследить на рисунке 3.



а – сдвиг фаз между элементами фазированной решетки 0° ; б – сдвиг фаз между элементами фазированной решетки 30° ; в – сдвиг фаз между элементами фазированной решетки 60° ; г – сдвиг фаз между элементами фазированной решетки 90° ; д – сдвиг фаз между элементами фазированной решетки 120° ; е – сдвиг фаз между элементами фазированной решетки 180°

Рисунок 3. Распределение амплитуды результирующей акустической волны в осевой плоскости фазированной решетки при различном сдвиге фаз между элементами решетки

На этом рисунке приведено распределение амплитуды результирующей акустической волны в дальней зоне на расстоянии 200 мм от решетки, содержащей 16 элементов, длиной волны излучения 1 мм, в осевой плоскости XOZ, перпендикулярной длинной стороне элементов решетки. Из рисунка 3 видно, что центральный максимум акустического поля смещается от оси пьезопреобразователя по мере увеличения сдвига фаз на различных элементах решетки, что соответствует отклонению акустической оси пьезопреобразователя от перпендикуляра к плоскости решетки. Наибольшее отклонение наблюдается при сдвиге фаз 180° , но при этом возникает дополнительный максимум, расположенный симметрично основному, относительно оси пьезопреобразователя, как это видно из рисунка 3, е. При сдвиге фазы между элементами решетки $\psi = 30^\circ$ (рисунок 3, б) угол наклона диаграммы направленности излучения $\varphi = 5,9^\circ$, при $\psi = 60^\circ$ (рисунок 3, в) – $\varphi = 9,8^\circ$, при $\psi = 90^\circ$ (рисунок 3, г) – $\varphi = 14,5^\circ$, при $\psi = 120^\circ$ (рисунок 3, д) – $\varphi = 19,4^\circ$, при $\psi = 180^\circ$ (рисунок 3, е) – $\varphi = 29,9^\circ$. Зависимость угла наклона диаграммы направленности от сдвига фазы между соседними элементами решетки представлена на рисунке 4. Из данного рисунка следует, что при увеличении сдвига фазы между соседними элементами решетки от 0° до 180° угол наклона диаграммы направленности увеличивается от 0° до $29,9^\circ$, причем эта зависимость носит линейный характер.

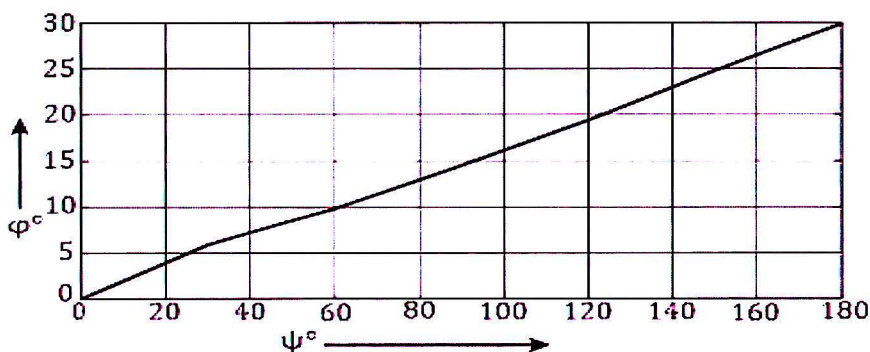
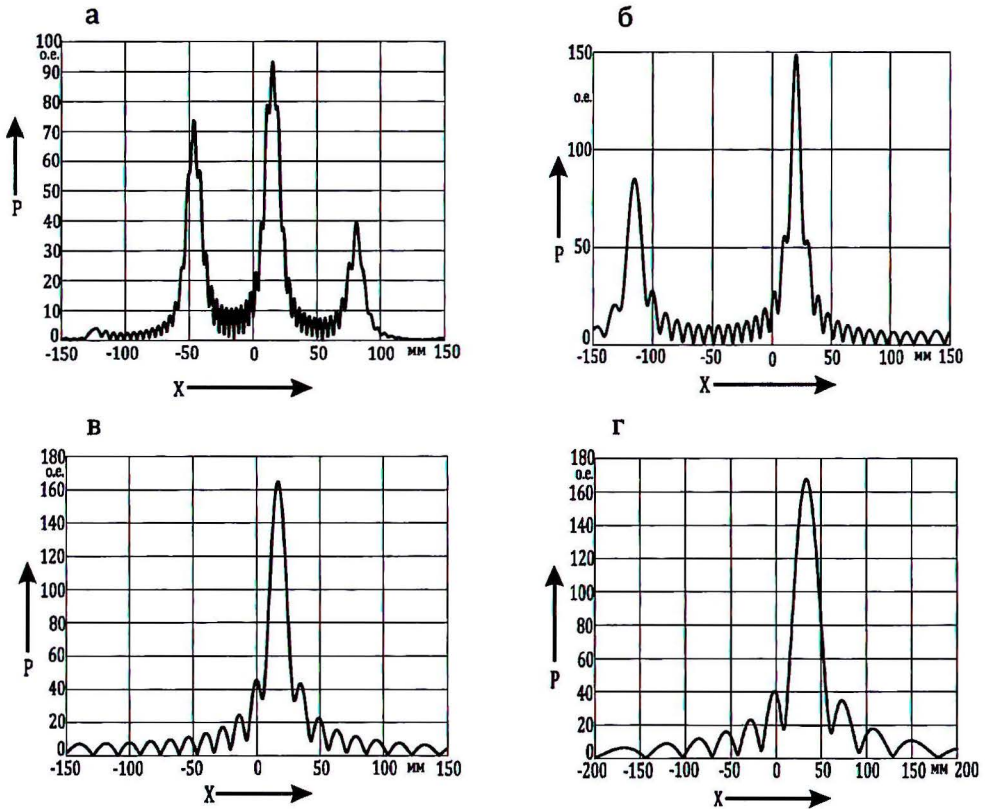


Рисунок 4. Зависимость угла наклона диаграммы направленности от сдвига фазы между соседними элементами решетки

Характер изменения акустического поля излучения фазированной решетки из 16 элементов в зависимости от частоты представлен на рисунке 5. Сдвиг фаз волн между соседними элементами решетки равен 30° .



а – 5 МГц; б – 2,5 МГц; в – 1,5 МГц; г – 0,75 МГц

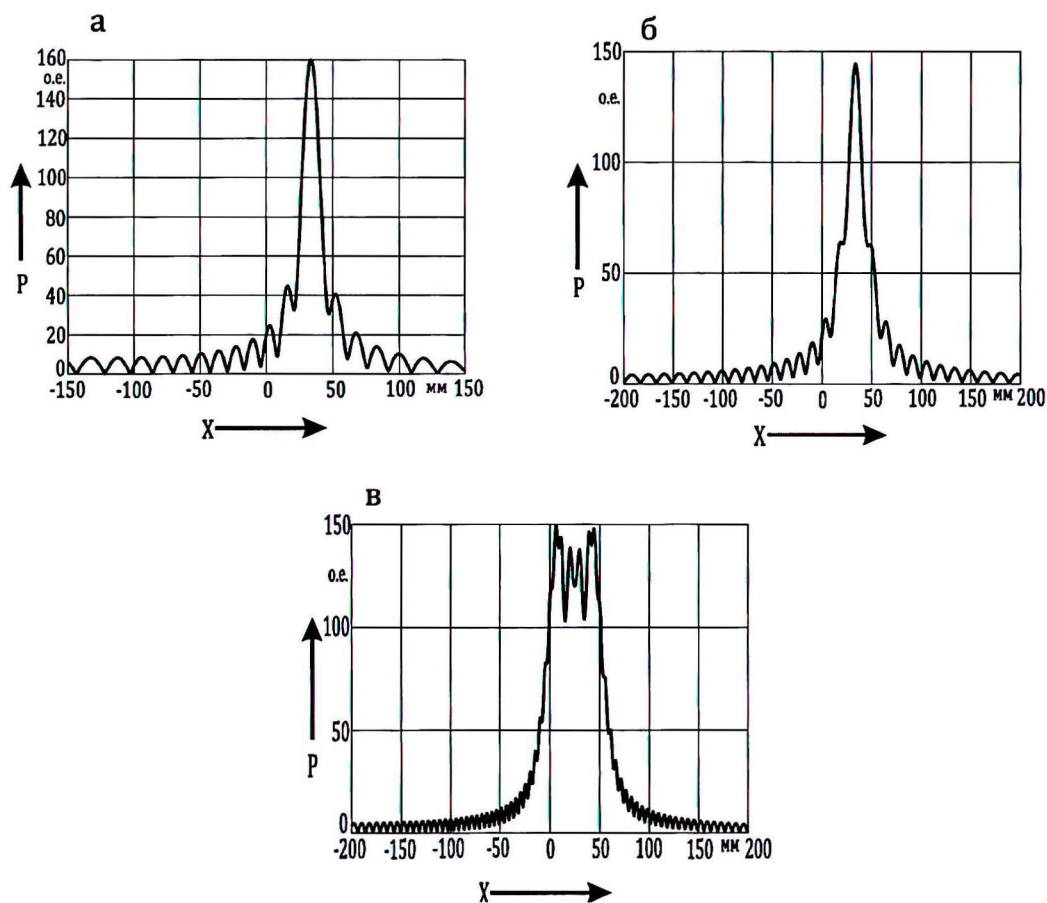
Рисунок 5. Распределение амплитуды результирующей акустической волны в осевой плоскости фазированной решетки при различных частотах

Расчеты показали, что при частоте излучения 5 МГц (рисунок 5, а) угол наклона диаграммы направленности равен $2,86^\circ$, при частоте 2,5 МГц (рисунок 5, б) – $5,71^\circ$, при частоте 1,5 МГц (рисунок 5, в) – $9,93^\circ$, а при частоте 0,75 МГц (рисунок 5, г) – $19,29^\circ$.

Из рисунка 5 следует, что с увеличением длины волны, т.е. уменьшением частоты, наблюдается увеличение угла наклона диаграммы направленности решетки. Также на частотах 2,5 и 5 МГц наблюдается появление дополнительных несимметричных максимумов.

На рисунке 6 представлено изменение акустического поля излучения в зависимости от количества элементов фазированной решетки при сдвиге фазы между соседними элементами 60° и частоте 1,5 МГц.

Расчеты показали, что угол наклона диаграммы направленности решетки из 16 элементов (рисунок 6, а) составляет 10° , решетки из 32 элементов (рисунок 6, б) – 10° и решетки из 64 элементов (рисунок 6, в) – 10° .



а – 16 элементов; б – 32 элемента; в – 64 элемента

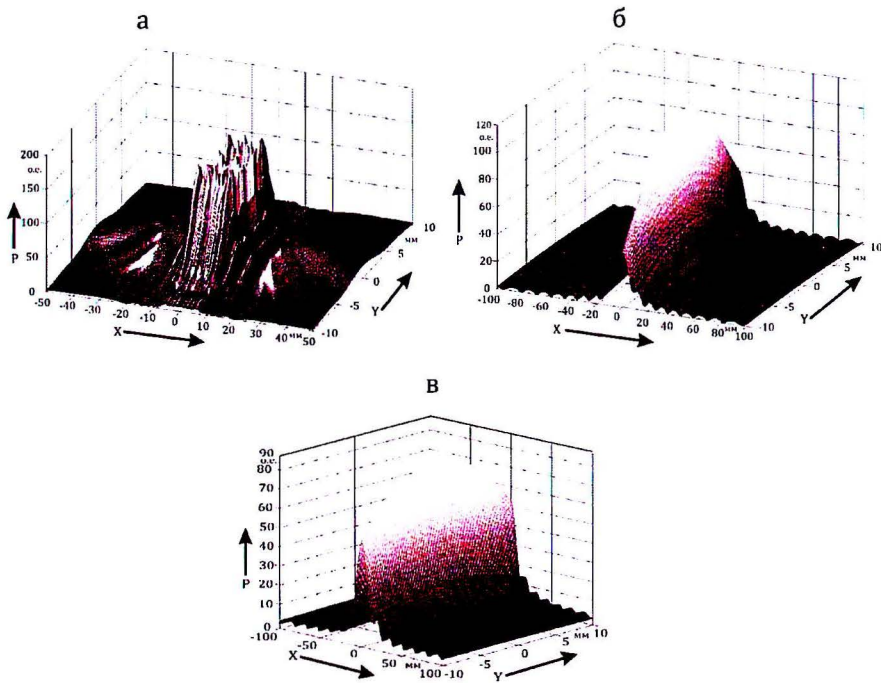
Рисунок 6. Распределение амплитуды результирующей акустической волны в осевой плоскости фазированной решетки в зависимости от количества элементов

Из рисунка 6 видно, что увеличение количества элементов фазированной решетки ведет к нарушению симметрии диаграммы направленности, но при этом не влияет на угол ее наклона. У фазированной решетки, состоящей из 64 элементов, наблюдается «разложение» центрального максимума на несколько, сравнимых по амплитуде с основным.

Характерные особенности акустического поля излучения фазированной решетки из 16 элементов с длиной волны излучения, равной 1 мм, на различном расстоянии от плоскости решетки прослеживаются на рисунке 7, где приведено трехмерное распределение давления акустических волн P (в относительных единицах).

На рисунке 7, а приведено распределение амплитуды давления акустических волн в плоскости, отстоящей от решетки на расстоянии 5 мм. Видно, что в ближней зоне наблюдается неоднородная структура акустического поля с максимальным значением давления акустических волн по краям решетки.

На рисунке 7, б приведено распределение амплитуды давления акустической волны в плоскости, отстоящей от решетки на расстоянии 140, а на рисунке 7, в – в плоскости, отстоящей от решетки на расстоянии 200 мм.



а – 5 мм; б – 140 мм; в – 200 мм

Рисунок 7. Распределение амплитуды давления акустических волн в плоскости на различном расстоянии от решетки

Из рисунков 7, б и 7, в видно, что акустическое поле излучения решетки при увеличении расстояния от плоскости излучения имеет разный характер для двух ортогональных плоскостей XOZ и YOZ , пер-

пендикулярных плоскости решетки. Угловой размер основного лепестка диаграммы направленности на расстоянии 140 мм от плоскости решетки (рисунок 7, б) по половинному уровню в плоскости XOZ равен $15,3^\circ$, в плоскости YOZ – $6,8^\circ$, а на расстоянии 200 мм от плоскости излучения решетки (рисунок 7, в): 2° – в плоскости XOZ и $19,3^\circ$ – в плоскости YOZ. Следовательно, с увеличением расстояния от плоскости излучения происходит сужение основного лепестка диаграммы направленности вдоль плоскости XOZ и увеличение основного лепестка в плоскости YOZ.

Заключение

В результате проведенных исследований была построена математическая модель преобразователя на фазированной решетке и показано, что акустическое поле излучения фазированной решетки при непрерывном режиме работы в ближней зоне носит сложный характер с наличием большого числа локальных минимумов и максимумов. В дальней зоне формируется акустическое поле излучения в виде одного наибольшего максимума вблизи акустической оси, расходимость которого различается в двух ортогональных плоскостях, одна из которых параллельна большей оси решетки, а вторая перпендикулярна ей, и ряда дополнительных максимумов, интенсивность которых меньше интенсивности основного максимума. Увеличение числа элементов решетки ведет к увеличению протяженности ближней зоны и сужению основного лепестка диаграммы направленности в направлении оси X, но при этом угол наклона диаграммы направленности не изменяется.

Уменьшение частоты колебаний ведет к увеличению угла наклона диаграммы направленности излучения и подавлению дополнительных максимумов акустического поля.

Список литературы

1. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. под общ. ред. В.В. Клюева. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.: ил.
2. Ермолов, И.Н. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн.2. Акустические методы контроля: Практич. пособие/ И.Н. Ермолов, Н.П. Алешин, А.И. Потапов; Под ред. В.В. Сухорукова. – М.: Высш. шк., 1991.-- 283 с.: ил.
3. Фалькевич, С.А. Фазированные решетки в ультразвуковой дефектоскопии (обзор)/С.А. Фалькевич//Дефектоскопия. – 1984, № 3. – с. 3–16.

4. Данилов, В.Н. Моделирование работы прямого преобразователя с фазированной решеткой в режиме излучения/В.Н. Данилов, И.В. Воронков//Дефектоскопия. – 2010, № 7. – с. 3–17.
5. Данилов, В.Н. О некоторых особенностях сигнала прямого линейного преобразователя с фазированной решеткой в режиме излучения/В.Н. Данилов//Дефектоскопия. – 2010, № 10. – с. 59–74.
6. Борисов, В.И. Тонкая структура акустического поля излучения прямоугольных пьезопластин / В.И. Борисов, С.С. Сергеев, А.С. Никитин // Вестник Белорусско-Российского университета,–2014, №2(43).--С. 105–113.
7. Реука, С.В. Введение в технологию применения ультразвуковых фазированных решеток. Перевод/ С.В. Реука –СП.: СПГЭТУ ЛЭТИ, 2011 – 210 с. : ил.
8. Расчет акустического поля излучения одномерной фазированной решетки / В.И. Борисов [и др.] // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: материалы междунар. науч.-техн.конф. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2014. – С. 44–47.
9. Прокопенко, С.А. Влияние параметров фазированной решетки на акустическое поле излучения/С.А. Прокопенко // Информационные технологии, энергетика и экономика: сборник трудов XII МНТК студентов и аспирантов. Т. 1, Смоленск, 16–17 апреля 2015 г. / МЭИ (Смоленский филиал). – Смоленск, 2015. – С. 285–289.
10. Прокопенко, С.А. Расчет акустического поля излучения одномерной фазированной решетки / С.А. Прокопенко // 51-я студенческая научно-техническая конференции Белорусско-Российского университета: материалы конф., 21–22 мая 2015 г. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2015. – С. 164.

Статья поступила в редакцию 21.03.18