

ИМПУЛЬСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАПРАВЛЕННОСТИ ЛИНЕЙНОЙ РЕШЕТКИ ИЗ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ КОЛЕЦ

В. Г. БАСОВСКИЙ

*Институт гидромеханики НАН Украины
ул. Желябова, 8/4, 03680, Киев-180, ГСП, Украина
e-mail: basovsky@ukr.net*

Решена задача об излучении звука линейной решеткой из пьезокерамических колец в случае возбуждения колец электрическим сигналом в форме периодической последовательности радиоимпульсов. Представлен численный анализ дальнего поля решетки в зависимости от параметров радиоимпульсов. Установлен ряд закономерностей давления в дальнем поле решетки от времени и направления.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что в гидролокации чаще всего основным режимом работы является импульсный. Импульсные сигналы также практически незаменимы при акустических исследованиях в ограниченных объемах, когда необходимо исключить влияние отраженных сигналов. Здесь особо следует выделить задачи измерения и тестирования акустических характеристик преобразователей в ограниченных бассейнах или естественных водоемах. Вместе с этим, в акустической литературе традиционно значительно большее внимание уделяется анализу акустических характеристик преобразователей, когда они возбуждаются монохромным гармоническим сигналом. Такой режим работы преобразователей принято называть в акустике непрерывным. Поэтому представляет большой научный и практический интерес изучения акустических излучателей и приемников в импульсных режимах работы.

Целью настоящего доклада является исследование дальнего поля линейной решетки из пьезокерамических колец в импульсном режиме работы.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим линейную решетку (рис. 1, а) из пульсирующих пьезокерамических колец. Кольца поляризованы в радиальном направлении и их внутренняя и внешняя поверхности полностью покрыты электродами, на которые подается электрическое напряжение.

В отличие от статьи [1] будем полагать, что электрическое напряжение $U_i(t)$ подается на электроды колец в виде периодически повторяющихся радиоимпульсов:

$$U_i(t) = \begin{cases} U_0 \sin(\omega_r t), & lT_i \leq t \leq lT_i + \tau_i, \\ 0, & lT_i + \tau_i < t \leq (l+1)T_i. \end{cases} \quad (1)$$

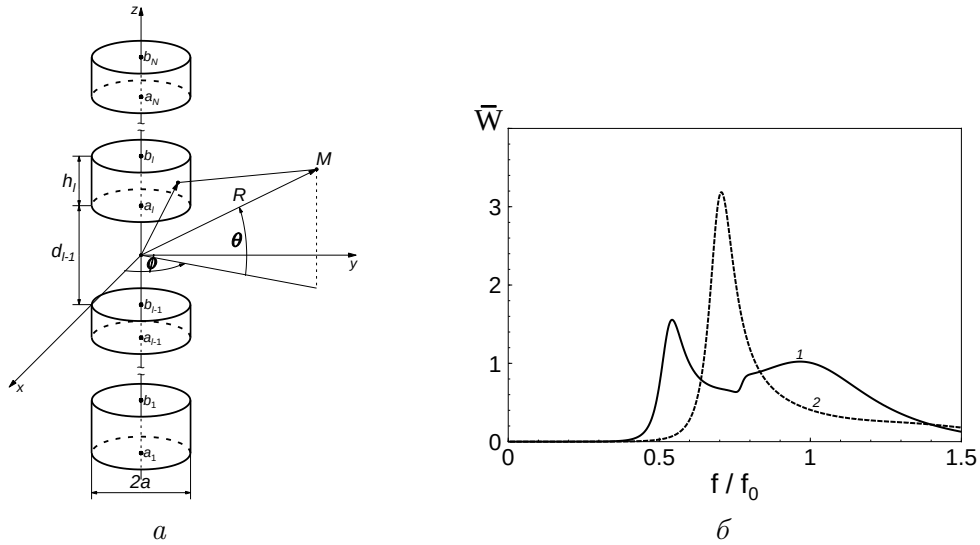


Рис. 1. Геометрия решетки (а) и зависимости полной излучаемой мощности трехэлементной решетки в непрерывном режиме излучения при разных значениях расстояния между кольцами (б)

Здесь U_0 – амплитуда несущей радиоимпульса; $\omega_r = 2\pi f_r = 2\pi/T_r$ – круговая частота несущей, где f_r и T_r соответственно частота и период несущей; T_i , τ_i – соответственно период повторения и длительность радиоимпульса; $l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Для удобства рассмотрения введем такие общепринятые в импульсной технике параметры как скважность импульсной последовательности $q_i = T_i/\tau_i$ и количество периодов несущей в импульсе $N_i = \tau_i/T_r$.

Пусть в радиоимпульсе содержится целое число периодов несущей, тогда функцию $U_i(t)$ можно разложить в ряд Фурье по тригонометрическим функциям:

$$U_i(t) = U_0 \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega_i t) + b_n \sin(n\omega_i t)) = U_0 \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (a_n + jb_n) e^{-jn\omega_i t} \right\}, \quad (2)$$

где a_n , b_n – коэффициенты ряда Фурье; $\omega_i = 2\pi/T_i$; j – мнимая единица.

Так как здесь имеем дело с линейной задачей, для которой выполняется принцип суперпозиции, то полное решение для вынужденных колебаний колец под воздействием электрического напряжения (1) можно искать, пользуясь разложением (2), следующим образом: выбираем последовательно электрические напряжения на электродах колец в виде гармонических сигналов $U_n(t) = U_0(a_n + jb_n) \exp(-jn\omega_i t)$ ($n = 1, 2, \dots$) и решаем задачи излучения для непрерывного режима работы решетки [1]. После чего полное решение задачи получим как действительную часть ряда Фурье по соответствующим решениям задачи для непрерывного режима работы решетки.

2 АНАЛИЗ ЧИСЛЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ниже приведены численные результаты анализа для эквидистантных трехэлементных решеток из идентичных пьезокерамических колец, на электроды которых подавался одинаковый электрический импульс (1). Кроме того, считалось, что решетки

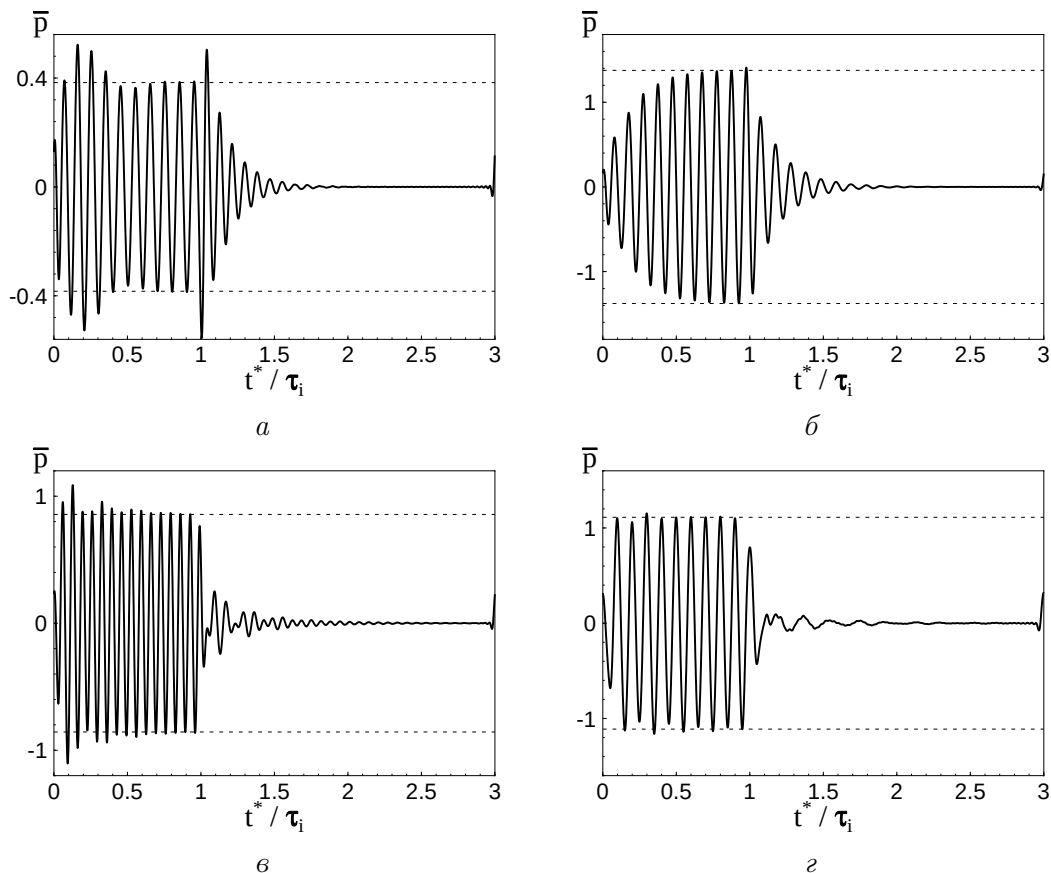


Рис. 2. Импульс давления в направлении $\theta=0^\circ$ в дальнем поле трехэлементной решетки при расстояниях между кольцами $d=0.001$ м:

$a - f_r/f_0=0.45, q_i=3, N_i=10$; $б - f_r/f_0=0.542, q_i=3, N_i=10$; $в - f_r/f_0=0.753, q_i=3, N_i=20$; $г - f_r/f_0=1.0, q_i=3, N_i=10$

погружены в безграничную жидкость с волновым сопротивлением $\rho c = 1.5 \cdot 10^6$ кг/(м²·с) и кольца изготовлены из пьезокерамики ЦТБС-3. Геометрические размеры колец следующие: высота $h = 0.035$ м, толщина стенки $\delta = 0.05$ м, внешний диаметр $2(a + \delta) = 0.113$ м, где a – радиус срединной поверхности кольца. Механическая добротность кольца равна 15. При решении задачи ряд Фурье (2) заменялся частной суммой из конечного числа первых членов этого ряда. За меру уклонения такой частной суммы от функции $U_i(t)$ принимали относительное квадратичное уклонение [2]. Во всех приведенных ниже расчетах значение этой меры уклонения меньше 0.001.

Известно, что трехэлементные решетки являются ключевыми в понимании основных закономерностей излучения звука многоэлементными антенными решетками. Особенностью этих решеток является то, что центральное и крайние кольца нагружены акустической средой по разному, даже при одинаковой разности электрических напряжений на их электродах. Учитывая это, вначале рассмотрим давление в дальнем поле трехэлементной решетки при малом расстоянии между кольцами ($d = 0.001$ м). Частотная зависимость полной излученной мощности такой решетки в непрерывном режиме излучения показана на рис. 1, б, кривая 1. Здесь значения мощности $\bar{W}$ нормированы относительно величины $W_0 = (NU_0)^2/(\rho c S)$, где N – коэффициент электро-

механической трансформации, S – площадь боковой поверхности кольца. Как видим, два явно выраженных максимумов на частотах $f/f_0 = 0.542$ и $f/f_0 = 1$ (f_0 – собственная частота пульсирующего пьезокерамического кольца в вакууме) выделяют резонансную область, в которой уровни излучаемой мощности решетки большие. Интересно, что природа этих максимумов, как показано в [1], разная. Первый максимум обусловлен первой модой продольных колебаний внутреннего объема жидкости решетки, второй – резонансом колебания самих колец. В окрестности этих частот, а также вне резонансной зоны кольца в решетке колеблются синфазно. Совершенно иная картина наблюдается в окрестности частоты минимума полной мощности излучения $f/f_0 = 0.753$. Здесь из-за возбуждения второй моды колебаний внутреннего объема жидкости решетки центральное кольцо колеблется в противофазе с крайними и при этом поглощает энергию из внешнего акустического поля. Естественно, что упомянутые выше частоты наиболее интересно рассмотреть в качестве частот несущей электрического импульса (1). Поэтому на рис. 2 представлены относительные значения импульса давления в дальнем поле $\bar{p}(t^*) = p(t^*)/p_0$ ($p_0 = (NU_0/S) \cdot (a/R)$, $t^* = t - R/c$) при $\theta = 0$ для частот несущей импульса: $f_r/f_0 = 0.542$, $f_r/f_0 = 0.753$ и $f_r/f_0 = 1$, а также для частоты вне резонансной зоны $f_r/f_0 = 0.45$. При этом везде скважность импульсной последовательности $q_i = 3$, что позволило соблюсти условие независимости каждого отрезка синусоиды от предшествующего. Здесь и ниже зависимости показаны для отрезка времени равному одному периоду следования импульса.

Из рис. 2 хорошо видно, что форма импульса давления в дальнем поле решетки определяется как параметрами подводимого к кольцам электрического импульса, так и резонансными свойствами самой антенной решетки. В начале действия электрического импульса значение давления изменяется со временем, но не является периодической функцией, и лишь по прошествии некоторого времени в дальнем поле устанавливаются периодические колебания давления с периодом, равным периоду несущей подводимого электрического импульса и амплитудой равной значению давления в дальнем поле для соответствующего непрерывного режима работы решетки. Здесь и ниже штриховыми горизонтальными линиями указаны уровни амплитуды давления для соответствующего непрерывного режима работы решетки. Как и в случае любой линейной колебательной системы, здесь процесс установления колебаний также представляет собой результат наложения вынужденных установившихся колебаний и затухающих собственных колебаний системы “решетка – внешняя среда”. В момент прекращения действия внешнего электрического воздействия кольца в решетке начинают совершать только затухающие собственные колебания. Затухают эти собственные колебания за тоже время, в течение которого происходило установление вынужденных колебаний колец. Поэтому продолжительность импульса давления в дальнем поле больше времени действия подводимого электрического импульса на величину времени установления вынужденных колебаний колец. Сравнивая на рис. 2 импульсы давления в дальнем поле для разных частот несущей электрического импульса видим, что картина установления и затухания импульса давления в дальнем поле может кардинально отличаться для разных частот несущей. Так импульс давления на рис. 2, б для частоты несущей $f_r/f_0 = 0.542$ вначале представляет собой колебания с амплитудой, нарастающей до значения амплитуды непрерывного режима по закону $1 - \exp(-\alpha t)$, где α – показатель затухания. Такой закон установления колебаний указывает на то, что в этом случае частота несущей электрического импульса совпадает с частотой собственных колебаний системы “ре-

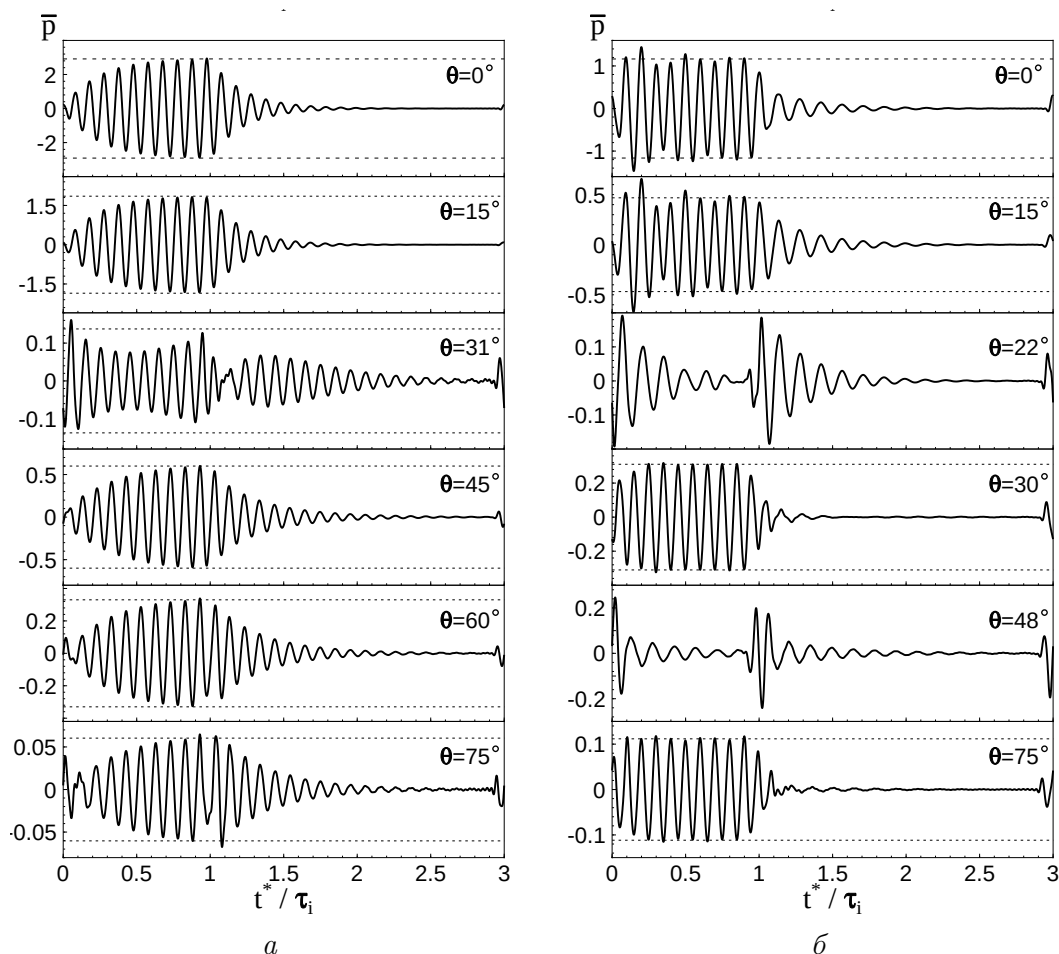


Рис. 3. Импульс давления для разных углов θ в дальнем поле трехэлементной решетки при расстоянии между кольцами $d=0.1$ м:
 а – $f_r/f_0=0.706$, $q_i=3$, $N_i=10$; б – $f_r/f_0=1.0$, $q_i=3$, $N_i=10$

шетка – внешняя среда“. Для других частот несущей картина установления усложняется: амплитуда колебаний давления в дальнем поле нарастает не монотонно, а проходя через ряд минимумов и максимумов. При этом амплитуда импульса давления может превышать значения амплитуды для соответствующего непрерывного режима работы решетки. Здесь следует отметить, что для установления вынужденных колебаний на частоте несущей электрического импульса $f_r/f_0=0.753$ необходимо вдвое больше периодов несущей, чем для других рассмотренных частот несущей. Что касается затухания импульса давления, то на частоте несущей совпадающей с собственной частотой решетки и вблизи этой частоты амплитуда импульса давления затухает по закону $\exp(-\alpha t)$. Для других частот, из-за сложных волновых процессов в ближнем поле решетки, закон затухания импульса давления определяется наложением нескольких затухающих колебаний.

Выше импульс давления в дальнем поле рассмотрен только для углов $\theta = 0$. Для других направлений, как показали расчеты, импульс давления практически сохраняет свою форму. Этого и следовало ожидать, поскольку для рассмотренной выше решет-

ки максимальная возможная разность времен прихода возмущений от концов решетки намного меньше периода несущей.

Теперь выясним характер влияния расстояния между кольцами в решетке на форму импульса давления в дальнем поле. С этой целью рассмотрим решетку с расстоянием между кольцами $d=0.1$ м. Кольца в такой решетке уже слабо взаимодействуют по полю и излучают звук практически как соответствующие одиночные кольца. Частотная зависимость полной излученной мощности в непрерывном режиме для такой решетки показана на рис. 1, б, кривая 2. Как видно, частотная зависимость здесь имеет только один резонансный максимум. Поэтому рассмотрим два характерных для такой решетки значения частоты несущей электрического импульса, наиболее интересные с практической точки зрения: $f_r/f_0 = 0.706$ – частота максимума излученной мощности решетки в воде и $f_r/f_0 = 1$ – резонансная частота колец в вакууме. Закономерность изменения формы импульса давления в дальнем поле решетки от угла θ для этих частот несущей показана на рис. 3. Хорошо видно, что за исключением некоторых углов, импульс давления сохраняет в целом свою форму. Здесь тоже достаточно 5–6 периодов несущей для установления амплитуды колебаний импульса давления равной амплитуде давления соответствующего непрерывного режима работы решетки. Незначительные искажения импульса давления при $\theta = 75^\circ$ в начале и сразу после прекращения действия электрического импульса связаны с тем, что разность времен прихода возмущений от концов этой решетки сравнима с периодом несущей. Особенно значительные искажения формы импульса давления можно наблюдать для частоты $f_r/f_0 = 0.706$ при $\theta = 31^\circ$, а для частоты $f_r/f_0 = 1$ при $\theta = 22^\circ$ и $\theta = 48^\circ$. Природу этих искажений можно объяснить, если обратиться к диаграммам направленности для соответствующих непрерывных режимов работы решетки. Такие диаграммы направленности в указанных выше соответствующих направлениях имеют глубокие минимумы или нули. Поэтому в этих направлениях амплитуда вынужденных колебаний давления намного меньше амплитуды собственных колебаний давления. Следовательно, здесь требуется больше периодов несущей электрического импульса для установления вынужденных колебаний давления.

ВЫВОДЫ

Решена задача об излучении звука линейной решеткой из пьезокерамических колец в случае возбуждения колец электрическим сигналом в виде периодической последовательности радиоимпульсов. На основе полученного решения проведен численный анализ давления в дальнем поле в зависимости от времени и параметров радиоимпульса. Установлено, что форма импульса давления в дальнем поле существенно изменяется в зоне углов, где диаграмма направленности решетки в непрерывном режиме имеет глубокий минимум или ноль.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басовский В. Г. Излучение звука конечной решеткой из открытых пьезокерамических колец // Акуст. вісн.– 1998.– 1, N 2.– С. 3–20.
2. Толстов Г. П. Ряды Фурье.– М.: Наука, 1980.– 384 с.