

УДК 534.1

В.Т. Мацыпура¹, д-р физ.-мат. наук, Т.Ю. Шкварницкая², канд. техн. наук

Импульсный режим работы открытого пьезокерамического кольца вблизи экранов конечных размеров

Исследовано влияние экранов на характеристики звукового поля в импульсном режиме работы кольца в зависимости от расстояния между экранами и свойств поверхности экранов.

Influence of screens on characteristics of a sound field in a pulse operating mode of a ring depending on distance between screens and a ring and properties of a surface of screens is investigated.

Введение

Излучатели звука в виде открытых (водозаполненных) колец находят широкое применение в гидроакустике [1]. Однако, в основном, теоретические исследования проводились в предположении, что в окрестности кольца отсутствовали какие-либо тела [2]. В реальных излучающих системах возможны ситуации, когда некоторые конструктивные элементы и тела могут располагаться относительно близко к кольцу. Данная статья является продолжением работы [3], в которой построено решение задачи об излучении открытым пьезокерамическим кольцом вблизи экранов в виде шаровых сегментов.

1. Теория

Согласно работе [3] рассмотрим осесимметричную задачу излучения звука (рис. 1) открытым пьезокерамическим кольцом 1, вблизи которого на расстоянии H расположены экраны 2 в виде шаровых сегментов. Излучающая система погружена в бесконечную идеальную сжимаемую среду, характеризующуюся плотностью ρ и скоростью звука c . Пьезокерамическое кольцо поляризовано радиально, а электроды, на которые подается электрическое напряжение $U(t)$, расположены на цилиндрической поверхности кольца. Постановка такой "сквозной" задачи позволяет определить важные для практики характеристики – акустическое давление, мощность, скорость колебания поверхности кольца и другие – с учетом реакции окружающей среды на колеблющуюся поверхность преобразователя, физических и геометрических параметров кольца, вида электрического сигнала, поступающего на преобразователь. Предметом особого внимания в данном исследовании будет оценка влияния свойств поверхностей экранов и расстояния по отношению к кольцу на звуковое поле, излучаемое преобразователем.

Экраны формируются внешними ($r = r_0; 0 \leq \theta \leq \theta_0$) и

внутренними ($0 \leq R \leq a; z = \pm(h/2 + H)$) поверхностями (рис. 1). Внешние поверхности экранов будем полагать акустически жесткими, а внутренние – либо акустически жесткими, либо акустически мягкими. Для краткости, будем говорить как о жестких или мягких экранах.

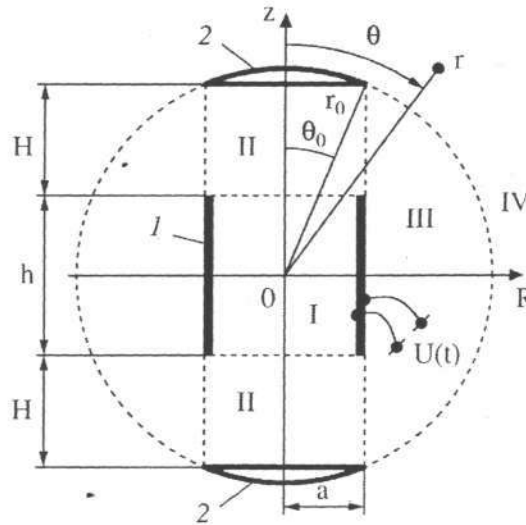


Рис. 1. Геометрия задачи: 1-кольцо, 2- экраны

На практике часто основным режимом излучающей системы является импульсный. В связи с этим естественно возникает вопрос: какие новые особенности, обусловленные наличием экранов вблизи кольца, возникают при колебании кольца в таком режиме? В работе [3] исследован, в основном, непрерывный режим работы кольца и приведены некоторые данные об импульсном режиме. В данной статье проведем более детальный анализ импульсного режима работы кольца.

Пусть электрическое напряжение $U_i(t)$ подается на электроды кольца в виде периодически повторяющихся радиоимпульсов с периодом повторения T_i и длительностью τ_i :

$$U_i(t) = \begin{cases} U_0 \sin(\omega_r t), & 0 \leq t \leq \tau_i; \\ 0, & \tau_i \leq t \leq T_i, \end{cases}$$

где U_0 – амплитуда несущей радиоимпульса; $\omega_r = 2\pi f_r = 2\pi/T_r$; f_r – частота; T_r – период несущей. Далее, выражение для $U_i(t)$

раскладывается в ряд Фурье по гармоникам с частотами, кратными частоте следования импульсов $\Omega_j = 2\pi/T_i$, и находится решение поставленной задачи при подаче на электроды кольца гармонического электрического

напряжения $U(t) = U_0 \exp(-im\Omega t)$, $m = 1, 2, 3, \dots$. Естественно, на практике бесконечный ряд ограничивался конечной суммой. В силу линейного характера рассматриваемой задачи, отклик кольца на импульсное воздействие, то есть колебательная скорость кольца $V(t)$ или звуковое давление в поле $p(t, r, \theta)$, определялся в виде суперпозиции откликов на указанные выше гармонические воздействия.

2. Анализ численных результатов

В проведенных расчетах полагались следующие параметры кольца: $a = 0,075\text{ м}$; $h = 0,05\text{ м}$; $m = 1,5\text{ кг}$; $h/2a = 1/3$. Кольцо выполнено из пьезокерамики ЦТБС-3: $d_{31} = 1,6 \cdot 10^{-10}\text{ Кл/Н}$,

$S_{11}^E = 11,3 \cdot 10^{-12}\text{ м}^2/\text{Н}$, механическая добротность равнялась 25, а собственная частота кольца в вакууме $f_0 = 7440\text{ Гц}$. Кольцо погружено в среду с плотностью $\rho = 10^3\text{ кг/м}^3$ и скоростью звука $c = 1500\text{ м/с}$.

Параметры подаваемого на кольцо электрического сигнала были таковы: скважность импульсной последовательности $Q_i = T_i / \tau_i = 3$, количество периодов несущей в импульсе $N_i = \tau_i / T_r = 10$. Рассмотрим наиболее интересную с практической точки зрения ситуацию, когда частота несущей находится в районе частоты резонанса кольца в среде, а именно $f_r / f_0 = 0,72$.



Рис. 2. Колебательная скорость (а, в, д) кольца и давление (б, г, е) в дальнем поле (в плоскости $z = 0$) при наличии жестких экранов: а, б - $H/h = 0,3$; в, г - $H/h = 0,5$; д, е - $H/h = 1$.

Зависимость электрического напряжения от времени $U_i(t)$ аппроксимировалась отрезком ряда Фурье, в котором удерживалось 60 членов ряда. При этом оценка точности приближения функции $U_i(t)$ определялась путем вычисления величины невязки по формуле

$$\delta = \frac{\int_0^{T_i} |U_i(t) - \bar{U}_i(t)|^2 dt}{\int_0^{T_i} |U_i(t)|^2 dt},$$

где $\bar{U}_i(t)$ - приближенное значение функции $U_i(t)$,

вычисляемое с помощью отрезка соответствующего ряда Фурье, в котором суммирование проведено при $1 \leq n \leq N$. При выбранном значении $N = 60$ выполнялось условие $\delta < 0,001$.

На рис. 2 и 3 представлены нормированные к некоторой постоянной величине значения колебательной скорости кольца $V(t)$ и давления $p(t)$ в дальней зоне в плоскости $z=0$. По оси абсцисс отложено нормированное время t/τ_i (на графике показан отрезок времени чуть больше одного периода следования радиоимпульсов).

Рис. 2 соответствует присутствию вблизи кольца акустически жестких экранов, рис. 3 - мягких.

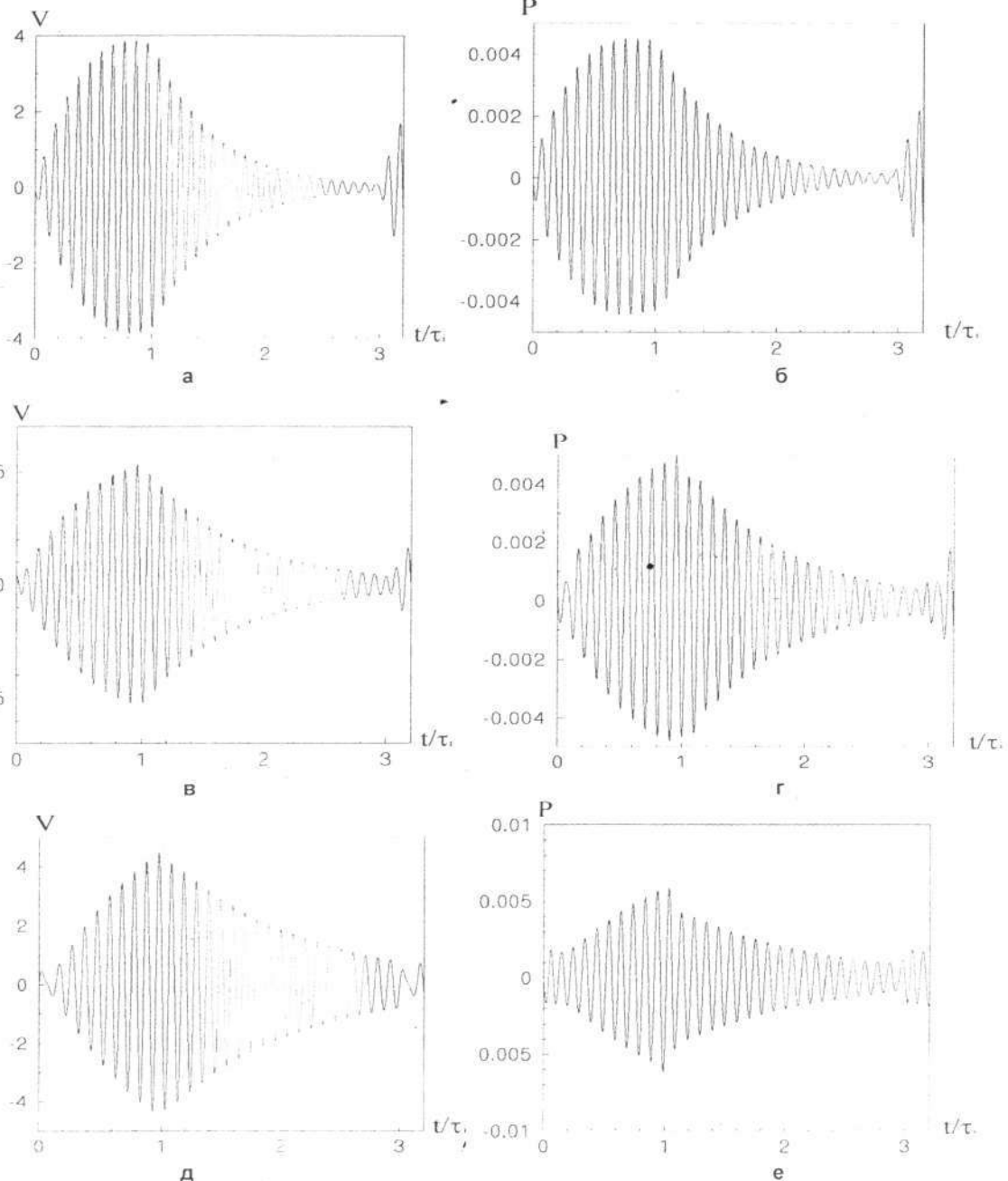


Рис. 3. Колебательная скорость (а, в, д) кольца и давление (б, г, е) в дальнем поле (в плоскости $z = 0$) при наличии мягких экранов: а, б - $H/h = 0,3$; в, г - $H/h = 0,5$; д, е - $H/h = 1$

Рассмотрим случаи, когда экраны расположены близко к кольцу. Рис. 2, а, б и рис. 3, а, б соответствует величине $H/h = 0,3$, рис. 2, в, г и рис. 3, в, г величине $H/h = 0,5$. Как видно, характер влияния жёстких и мягких экранов на форму импульса колебательной скорости кольца и, соответственно, давления в поле существенно различен. В случае жестких экранов переходные процессы как в начале, так и в конце импульса весьма коротки и колебания кольца быстро выходят на стационарный режим. Совершенно иначе обстоит дело при наличии мягких экранов. Здесь переходные процессы значительно более длительны ("затянуты"), из-за чего, в некоторых случаях (рис.3, в, г) колебания кольца даже не успевают выйти на стационарный режим. Это указывает на акустическую разгрузку кольца за счет акустического короткого замыкания между внутренней и внешней поверхностями кольца и, как следствие, увеличение его добротности. Такое "затягивание" импульса обусловлено обменом энергией между элементами акустической системы "кольцо-экраны".

При дальнейшем увеличении H/h ситуация меняется. На рис. 2, д, е и рис. 3, д, е представлены результаты расчетов при $H/h = 1$. Рис. 2, д, е соответствует присутствию жестких экранов. Как видим, при $H/h = 1$ влияние экранов на работу кольца практически несущественно. Оба графика иллюстрируют типичные искажения радиоимпульса при прохождении его через механическую (или электрическую) резонансную систему [4]. Действительно, в течение первых нескольких периодов несущей происходит нарастание сигнала по экспоненте и система асимптотически приближается к установившемуся (непрерывному) режиму работы. После окончания импульса возбуждения скорость и давление спадают по экспоненте.

Напротив, присутствие мягких экранов (рис. 3, д, е) при $H/h = 1$ все еще оказывает сильное влияние на работу кольца. Дальнейшее увеличение H/h начинает снижать эффект влияния мягких экранов на работу кольца и при $H/h \approx 2$ это влияние практически отсутствует. В результате временные зависимости скорости кольца и давления становятся близкими к временным зависимостям, показанным на рис. 2, д, е.

Выводы

Исследован импульсный режим открытого пьезокерамического кольца, вблизи которого расположены акустические экраны в форме круговых сегментов. При этом приведены временные зависимости колебательной скорости и давления в дальнем поле. В частности, установлено, что при импульсном режиме работы кольца, когда частота несущей радиоимпульса близка частоте резонанса кольца, влияние близко расположенных к кольцу экранов на формирование импульса колебательной скорости кольца и импульса давления в поле является существенным. При этом, если акустически жёсткие экраны сокращают время переходных процессов, возникающих в системе "кольцо-экраны", то акустически мягкие, наоборот, их удлиняют, что приводит к увеличению времени выхода системы на стационарный режим и к "послезвучанию" (реверберации) в области пространства, ограниченного экранами и кольцом, на всем межимпульсном временном интервале. Оказалось, что влияние акустически мягких экранов на работу кольца при увеличении H/h присутствует значительно дольше. Так, при определённых выше конструктивных размерах излучающей системы, для величины $H/h \geq 1$ влияние жестких экранов практически не наблюдалось, в то время как мягкие экраны практически перестали оказывать воздействие на излучающее кольцо только при величине $H/h \approx 2$.

Литература

1. Евтютов А.П., Колесников А.Е., и др. /Справочник по гидроакустике.—Л.: Судостроение, 1988.— 552 с.
2. Басовский В.Г. Излучение звука конечной решеткой из открытых пьезокерамических колец // Акуст.вісник.- 1998.- 1, N 2.- С. 3-20.
3. Вовк И.В., Мацыпура В.Т. Излучение звука открытым пьезокерамическим кольцом вблизи экранов конечных размеров // Акуст.вісник.— 2004.— N 2.— С. 25-35.
4. Боббер Р. Гидроакустические измерения. — М.: Мир, 1974.— 362 с.

¹ Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

² Национальный авиационный университет