

Экспериментальная зависимость $\bar{p} = p/\rho_0 c_0^2$ от t при $x/L=0,43$, взятая из данных [7], представлена на фиг. 3. Там же показана теоретическая зависимость, вычисленная по формулам [2] для $m=0,25$. Такое значение m соответствует концевой поправке для трубы, открытый конец которой не имеет фланца. Совпадение теоретических и экспериментальных данных можно считать удовлетворительным. Заметим, что прямой расчет показывает, что при $m=0,3$ теоретическая зависимость незначительно отличается от зависимости с $m=0,25$.

Анализ нелинейного граничного условия, принятого в работах [9, 10], и сравнение его с (2) показывает, что значения эмпирических коэффициентов из [9, 10] воспроизводятся при $0,4 \leq m \leq 0,5$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Keller J. J. Subharmonic Non-linear Acoustic Resonances in Open Tubes. Pt. I: Theory // ZAMP. 1977. S. 28. P. 419–431.
2. Галиуллин Р. Г., Пермяков Е. И. Субгармонические нелинейные резонансные колебания большой амплитуды в полукрытой трубе // Акуст. журн. 1986. Т. 32. № 5. С. 605–609.
3. Галиуллин Р. Г., Коркишко Л. В. Стоячие волны конечной амплитуды в экспоненциальном канале // Акуст. журн. 1985. Т. 31. № 4. С. 520–522.
4. Галиуллин Р. Г., Ревва И. П. Истечение пульсирующей струи из цилиндрического канала при колебаниях большой амплитуды // Изв. вузов. Энергетика. 1987. № 3. С. 61–64.
5. Hersch A. S., Rogers T. Fluid Mechanical Model of the Acoustic Impedance of Small Orifices // AJAA Pap. 1975. V. 495. P. 1–10.
6. Рэлей. Теория звука. Т. 2. М.: Гостехиздат, 1955. 475 с.
7. Галиуллин Р. Г., Халимов Г. Г. Исследование нелинейных колебаний газа в открытых трубах // Инж.-физ. журн. 1979. Т. 37. № 6. С. 1043–1050.
8. Sturtevant B., Keller J. J. Subharmonic nonlinear acoustic resonances in open tubes. Pt II. Experimental Investigation of the open and boundary condition // ZAMP. 1978. V. 29. P. 473–485.
9. Van Wijngaarden L. On the oscillations near and at resonance in open pipes // J. Eng. Math. 1968. V. 2. № 3. P. 225–240.
10. Chester W. Resonant oscillations of a gas in an open-ended tube // Proc. R. Soc. Lond. 1981. A337. P. 449–467.

Казанский госуниверситет
им. В. И. Ульянова–Ленина

Поступило в редакцию
12.VII.1987

УДК 534.8:534.22

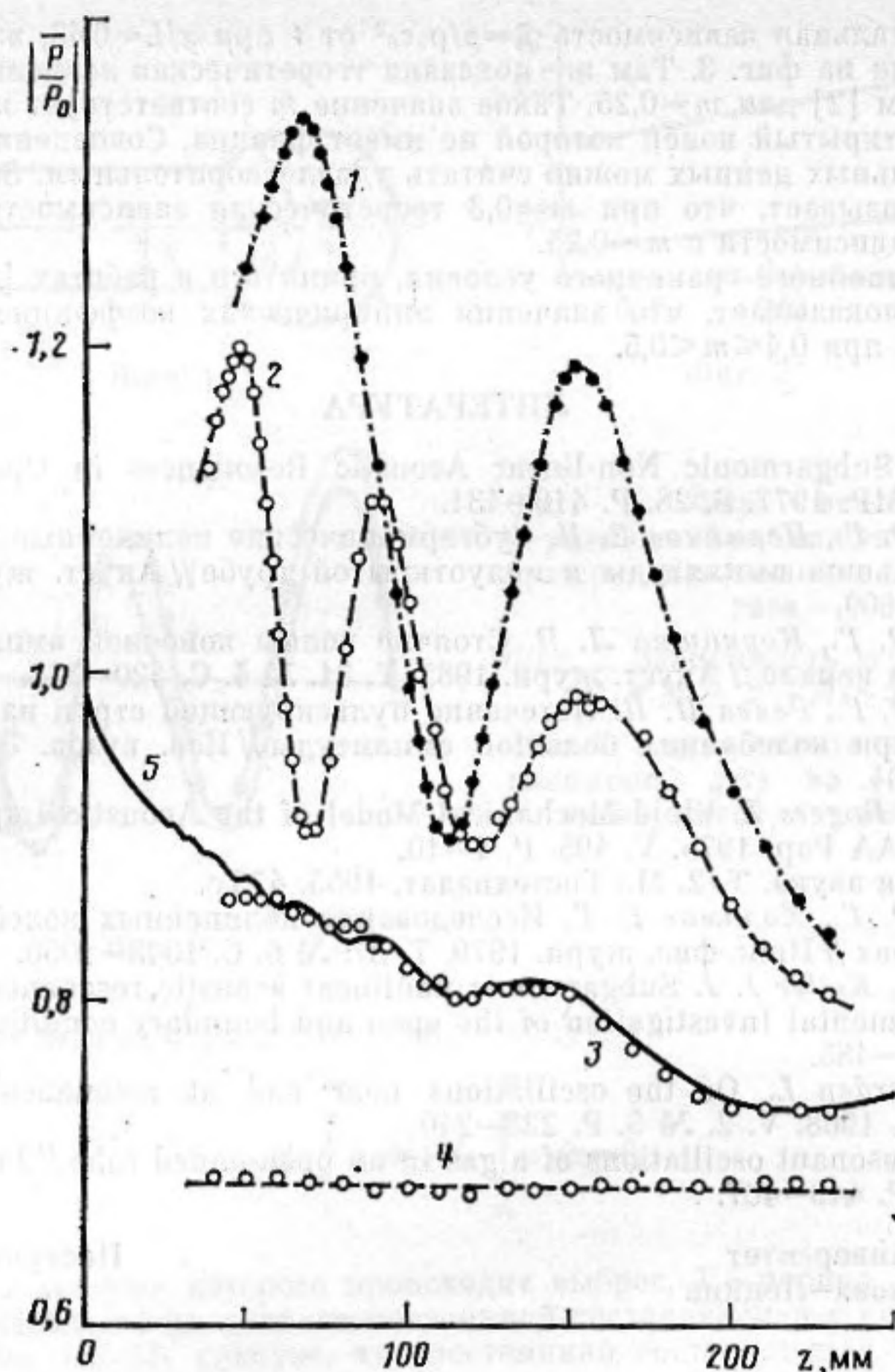
О ВЛИЯНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА АКУСТИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Гитис М. Б., Химунин А. С.

Экспериментально исследованы зависимости амплитуды отраженного сигнала от расстояния между излучателем и рефлектором при различных электрических нагрузках. Измерения проводились в режиме возбуждения излучателя радиоимпульсом с прямоугольной огибающей, длительность которого превышала расчетную протяженность электромеханических и акустических переходных процессов.

Испытаниям подвергался серийный недемпфированный пьезоэлемент из керамики ЦТС-19 диаметром $2a=20$ мм и толщиной 1 мм с частотами резонанса и антирезонанса 1,9 и 2,2 МГц. Пьезоэлемент вклеен своей цилиндрической образующей в отверстие металлического экрана диаметром 90 мм. Рабочие плоскости излучателя и экрана совпадают, а их обратные стороны граничат с воздухом. Экран является частью дна юстируемой камеры с дистиллированной водой ($200 \times 200 \times 150$ мм), смонтированной на основании оптического длиномера. На подвижной пиноли длиномера закреплен перемещаемый в воде рефлектор, активная поверхность которого диаметром 90 мм выполнена в виде туго натянутой фольги из нержавеющей стали толщиной 15 мкм; обратная сторона фольги граничит с воздухом. Пьезоэлемент соединен с низкоомным выходом генератора радиоимпульсов ($R_i < 10$ Ом) через развязывающий резистор R_1 и со входом вертикального отклонения осциллоскопа. Параллельно пьезоэлементу включались либо шунтирующие резисторы R_2 , либо компенсирующая индуктивность L . Частота заполнения радиоимпульсов f_0 всегда соответствовала максимуму амплитуды установившейся части первого отраженного сигнала.

Анализ результатов измерений, позволяющий судить о равномерности возбуждения излучателя, выполнялся путем сравнения полученных экспериментальных зависимостей с теоретическими, рассчитанными для равномерно возбуждаемых преобразователей [1, 2]. При таком анализе исключаются трудности практической реализа-



Фиг. 1. Зависимости амплитуды отраженного сигнала от расстояния для различных режимов измерения: 1 — $R_1=2$ кОм, $R_2=\infty$, $L=\infty$, $f_0=2,25$ МГц; 2 — $R_1=1$ кОм, $R_2=\infty$, $L=5$ мкГн, $f_0=2,32$ МГц; 3 — $R_1=50$ Ом, $R_2=1$ Ом, $L=\infty$, $f_0=1,94$ МГц; 4 — $R_1=200$ Ом, $R_2=20$ Ом, $L=\infty$, $f_0=1,99$ МГц; 5 — теоретическая зависимость $|\bar{P}(z)/p_0|$ для $ka=80$

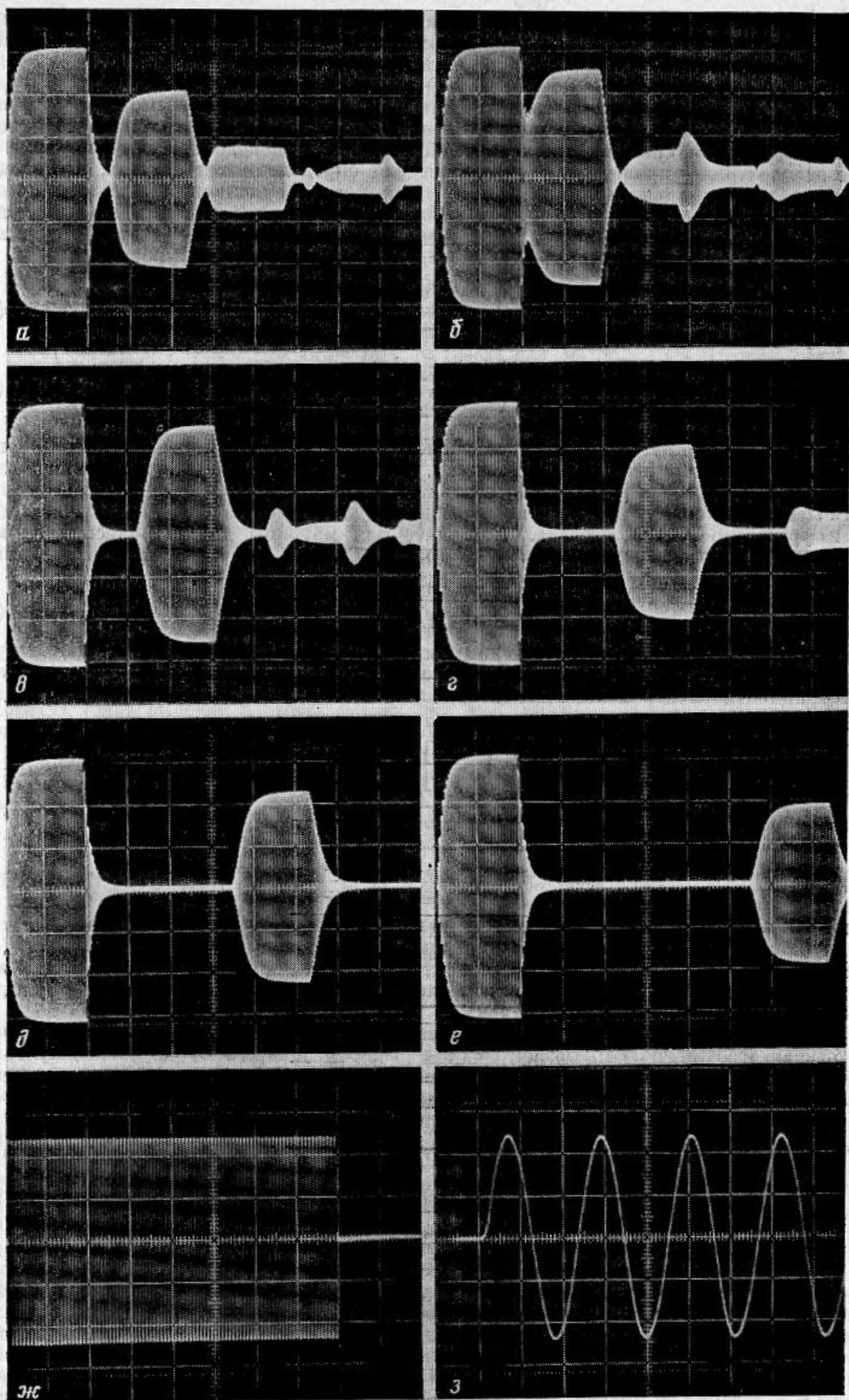
ции миниатюрных измерительных гидрофонов, размер чувствительного элемента которых должен удовлетворять заданной погрешности воспроизведения исследуемой структуры поля [3].

На фиг. 1 кривыми 1–4 представлены результаты измерения амплитуды установившейся части первого отраженного сигнала в функции от удвоенного расстояния z между пьезоэлементом и рефлектором, полученные для некоторых из исследованных режимов измерения. Теоретическая кривая 5 рассчитана по данным работы [4] для $ka=80$, $a=10$ мм, где $k=2\pi/\lambda$, $\lambda=0,74$ мм — длина волны ультразвука на частоте 2 МГц.

В режимах измерения, близких к холостому ходу (кривые 1 и 2, $R_1=2$ и 1 кОм), экспериментальные зависимости среднего давления от расстояния имеют большие осцилляции, свидетельствующие о значительной неравномерности возбуждения излучателя и весьма неравномерной локальной чувствительности преобразователя в режиме приема. С уменьшением сопротивления шунтирующего резистора амплитуда этих осцилляций падает, и в режимах измерения, близких к короткому замыканию, теоретические и экспериментальные зависимости оказываются практически полностью совпадающими (кривая 3, $R_2=1$ Ом). Последнее означает, что в случае короткозамкнутой электрической нагрузки пьезокерамический преобразователь работает как жесткий равномерно возбуждаемый поршень в режиме излучения и имеет равномерную по поверхности чувствительность в режиме приема¹.

Осциллограммы сигналов для режима измерения 2 при различных расстояниях между пьезоэлементом и рефлектором представлены на фиг. 2. Изменение амплиту-

¹ Для основной толщинной моды колебаний преобразователя в виде пьезокерамической пластины с коэффициентом электромеханической связи $\beta \geq 0,4$ (например, ЦТС-19, ПКР-7М, PZT-5Н) режим короткого замыкания реализуется при $\gamma R < 10^3$ Ом, режим холостого хода — при $\gamma R > 10^4$ Ом, где $\gamma = s/l^2$, s — площадь пластины, l — ее толщина [5].



Фиг. 2. Осциллограммы сигналов при различных расстояниях для режима измерения 2; z , мм: $a - 55,2$, $b - 69,0$, $c - 91,4$, $d - 122,0$, $e - 159,0$, $e - 220,0$, $ж, з$ - зондирующий импульс и его начальный участок

ды установившейся части первого отраженного сигнала на этих осциллограммах наглядно иллюстрирует необычно большие осцилляции кривой 2 на фиг. 1.

Необычным оказался также и вид экспериментальной зависимости 4 на фиг. 1 ($R_i = 20$ Ом), соответствующей режиму измерения, при котором сопротивление шунтирующего резистора примерно равно сопротивлению излучения. В этом режиме амплитуда первого отраженного сигнала практически не зависит от расстояния

(в исследованном диапазоне его изменения). Вариация возбуждающей частоты в пределах $f_0 \pm 10$ кГц слегка изменяет характер зависимости 4, однако максимальные отклонения ее от горизонтальной прямой остаются в рукаве шириной 1...2% от амплитуды принятого сигнала.

Для качественного объяснения наблюдаемых эффектов рассмотрим условия возбуждения пьезоэлемента в виде бесконечно длинной полосы шириной $2b$ и толщиной l . Полная система уравнений, описывающая поведение упругих волн в пьезодиэлектрике, приведена в [6]. Если для определенности считать, что пьезоэлемент выполнен из керамики ЦТС-19 (для которой численные значения пьезокоэффициентов e_{33} и e_{31} мало различаются), возбуждающее электрическое поле направлено вдоль оси x_3 (толщина), зависимость от координаты x_2 (длина) отсутствует, то для деформаций в упругой волне u_{ik} остаются только два уравнения:

$$c_{11} \frac{\partial^2 u_{11}}{\partial x_1^2} + \frac{c_{55}}{2} \frac{\partial^2 u_{11}}{\partial x_3^2} + \left(c_{13} + \frac{c_{55}}{2} \right) \frac{\partial^2 u_{33}}{\partial x_1^2} - \rho \frac{\partial^2 u_{11}}{\partial t^2} = e_{31} \frac{\partial^2 E_3}{\partial x_1^2}, \quad (1)$$

$$\frac{c_{55}}{2} \frac{\partial^2 u_{33}}{\partial x_1^2} + c_{33} \frac{\partial^2 u_{33}}{\partial x_3^2} + \left(c_{13} + \frac{c_{55}}{2} \right) \frac{\partial^2 u_{11}}{\partial x_3^2} - \rho \frac{\partial^2 u_{33}}{\partial t^2} = e_{33} \frac{\partial^2 E_3}{\partial x_3^2}. \quad (2)$$

Здесь значения упругих модулей c_{ik} должны браться при постоянной напряженности электрического поля E ; индексы их, как обычно, соответствуют компонентам векторов или тензоров [7]; ρ — плотность пьезоматериала. Уравнения (1) и (2) должны быть дополнены уравнением непрерывности для вектора электрической индукции D и уравнением пьезоэффекта. Последнее для матрицы диэлектрической проницаемости и пьезокоэффициентов керамики ЦТС-19 (в случае металлизированных электродов, перпендикулярных оси x_3) имеет вид

$$D_3 = \epsilon_{33} E_3 + e_{31} u_{11} + e_{33} u_{33}. \quad (3)$$

Отсюда следует, что при возбуждении пьезоэлемента генератором напряжения (режим короткого замыкания с электрической стороны $E_3 = 0$ с точностью до квадрата коэффициента электромеханической связи. В этом случае из уравнений (1) и (2) с учетом $l \ll b$ ($u_{11} < u_{33}$) получаем

$$\frac{\partial^2 u_{33}}{\partial x_1^2} \left[c_1 c_2 + \left(\frac{c_{55}}{2} \right)^2 \frac{e_{33}}{e_{31}} \right] - \rho \frac{\partial}{\partial t^2} \left(\frac{c_{55}}{2} \frac{e_{33}}{e_{31}} u_{33} \right) = 0, \quad (4)$$

где

$$c_1 = c_{11} \frac{e_{33}}{e_{31}} + c_{13} + \frac{c_{55}}{2}, \quad c_2 = c_{33} - \left(c_{13} + \frac{c_{55}}{2} \right) \frac{e_{33}}{e_{31}}.$$

Если пьезоэлемент зажат по периметру (как это и имеет место в эксперименте), то произвольные постоянные, появляющиеся при интегрировании уравнения (4), для рассматриваемого режима не зависят от x_1 , т. е. поверхность пьезоэлемента в режиме его короткого замыкания колеблется как жесткий равномерно возбуждаемый плоский поршень.

Если же с электрической стороны реализован режим холостого хода, что соответствует возбуждению пьезоэлемента генератором тока, то $D_3 = 0$, поскольку генератор тока обеспечивает постоянство заряда на металлизированных поверхностях, а $E_3 \neq 0$. Комбинируя уравнения (1)–(3), получаем

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 u_{33}}{\partial x_1^2} \left(c_1 + \frac{e_{33} c_{55}^2}{4 e_{31} c_2} \right) - \rho \frac{e_{33}}{e_{31}} \frac{\partial^2 u_{33}}{\partial t^2} \left(1 + \frac{c_{55}}{2 c_2} \right) = \\ & = - \frac{\partial^2 E_3}{\partial x_1^2} \left(1 + \frac{\epsilon c_{11}}{e_{31}} \right) - \frac{\epsilon c_{55}}{2 e_{31}} \frac{\partial^2 E_3}{\partial x_3^2} - \rho \frac{e_{33}}{e_{31}} \frac{\partial^2 E_3}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Два первых слагаемых в правой части уравнения (5) вызывают появление волн, распространяющихся в однородно поляризованной керамике от границ пьезоэлемента. Эти волны полностью аналогичны толщинным модам колебаний, но они распространяются в направлении координаты x_1 . Если, как это имеет место в эксперименте, пьезоэлемент зажат по периметру, то эти волны должны отсутствовать. Третье слагаемое в правой части уравнения (5) описывает возбуждающую силу, действующую по всей поверхности пьезоэлемента. При зажатых краях такая сила вызывает изгибные колебания пьезоэлемента, модулирующие распределение u_{33} на его излучающей поверхности. Возникновение изгибных мод колебаний и их взаимодействие с толщинными и не полностью подавленными радиальными модами существенно искажает поршневой характер колебаний поверхности пьезоэлемента в режиме холостого хода с его электрической стороны.

Для пьезоэлементов с малым коэффициентом электромеханической связи, например для кварца X-среза, эффект взаимодействия различных мод колебаний в режиме холостого хода пренебрежимо мал. Именно этим можно объяснить широко распространенное мнение о том, что пьезокерамические преобразователи по сравнению с кварцевыми имеют худшую равномерность распределения амплитуд колеба-

тельной скорости по поверхности. Изменением количества обертонов изгибных колебаний и их различным взаимодействием с радиальными и толщинными модами объясняется также и обнаруженная в работе [8] существенная зависимость эффективного радиуса коммерческих пьезокерамических преобразователей от возбуждающей частоты. К сожалению, в указанной работе отсутствуют сведения о величине внутреннего сопротивления R_i генератора радиоимпульсов. Можно предположить, однако, что при $R_i \rightarrow 0$ [$R_i < 10^3 l^2 / (\pi a^2)$] и $l \ll 2a$ эффективный радиус исследованных в работе [8] преобразователей будет практически постоянным при изменении частоты (несмотря на то, что наличие демпфера усложнит механизм взаимодействия различных мод колебаний).

ЛИТЕРАТУРА

1. Гитис М. Б., Химунин А. С. О дифракционных эффектах в ультразвуковых измерениях. Обзор // Акуст. журн. 1968. Т. 14. № 4. С. 489–513.
2. Khimunin A. S. On the ultrasound diffraction losses for circular transducers of different radii // Acustica. 1983. V. 54. № 1. P. 13–22.
3. Beissner K. Maximum hydrophone size in ultrasonic field measurements // Acustica. 1985. V. 59. № 1. P. 61–66.
4. Химунин А. С. Таблицы точных дифракционных поправок к результатам измерения коэффициента затухания и фазовой скорости ультразвука. Л.: ВНИИ токов высокой частоты, 1985. 79 с. — Рук. деп. в ВИНТИ 03.01.1985, № 122.
5. Алексеев Б. Н., Дианов Д. Б. Расчет основных характеристик пьезоприемников с учетом электрической нагрузки // Изв. ЛЭТИ. 1968. Вып. 63. С. 37–52.
6. Гитис М. Б. Преобразователи для импульсной ультразвуковой дефектоскопии. I. Основные теоретические положения. Обзор // Дефектоскопия. 1981. № 2. С. 65–84.
7. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела // М.: Мир, 1972. 307 с.
8. Chivers R. C., Bosselaar L., Filmore P. R. Effective area to be used in diffraction corrections // J. Acoust. Soc. Amer. 1980. V. 68. № 1. P. 80–84.

Всесоюзный научно-исследовательский институт токов высокой частоты им. В. П. Вологодина

Поступило в редакцию 12.VIII.1987

УДК 537.311.33:54.185

О ВЛИЯНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПЬЕЗОЭФФЕКТ В ЭЛЕМЕНТАХ С ГЕТЕРОПЕРЕХОДОМ CdSe-Se

Жариков Г. П.

Как было установлено в селеновых выпрямительных элементах с гетеропереходом CdSe-Se возможны резонансные пьезоэффекты [1, 2] и они могут быть использованы для определения вязкости жидкости [3]. Резонансные колебания выпрямительного элемента в звуковом диапазоне частот являются колебаниями изгибного типа [1]. Помещая элемент в магнитное поле таким образом, чтобы плоскость его гетероперехода была направлена вдоль магнитного поля, обнаружили, что с увеличением магнитного поля резко ослабевают как обратный, так и прямой пьезоэффекты. Подключение элемента в цепь осуществлялось с помощью прижимных электродов, расположенных у самого края элемента. Размеры селенового выпрямительного элемента с алюминиевой подложкой были равны $36 \times 90 \times 0,9$ мм³. Зазор между полюсами магнита составлял 44 мм. Звуковое давление при обратном пьезоэффекте фиксировалось с помощью удаленного на большое расстояние от элемента и электромагнита пьезомикрофона, присоединенного к селективному усилителю. Возбуждающий колебания элемента генератор переменного напряжения, частотомер и селективный усилитель подключались к сети через стабилизатор напряжения. Действующее напряжение на них контролировалось и оставалось постоянным при изменении силы тока в электромагните. Величина постоянной магнитной индукции измерялась тесламетром Ф4354/1. Измерения проводились на основной резонансной частоте изгибных колебаний элемента — 3412 Гц. Изменялась зависимость действующего напряжения U_m на пьезомикрофоне, пропорционального звуковому давлению, от величины магнитной индукции B . Было установлено, что U_m убывает с ростом индукции B по экспоненциальному закону (фигура, кривая 1). Отметим, что магнитодиодный эффект, связанный с ростом сопротивления диода при увеличении магнитного поля, в наших полях не наблюдался ввиду узкой базы диода вентиля.

Если вместо электромагнита использовался сильный постоянный магнит подковообразной формы, то при внесении между полюсами его колеблющегося селенового выпрямительного элемента наблюдалось уменьшение интенсивности излучаемого звука как по приборам, так и просто непосредственно на слух. Прямой пьезо-