АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XXIV 1978 Вып. 3

УДК 534.232

ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Э. П. Ланина

Рассмотрен перестраиваемый излучатель большой мощности из двух пьезокерамических пластин с согласующим жидким слоем изменяющейся толщины. Приведены теоретические и экспериментальные амплитудно-частотные характеристики системы.

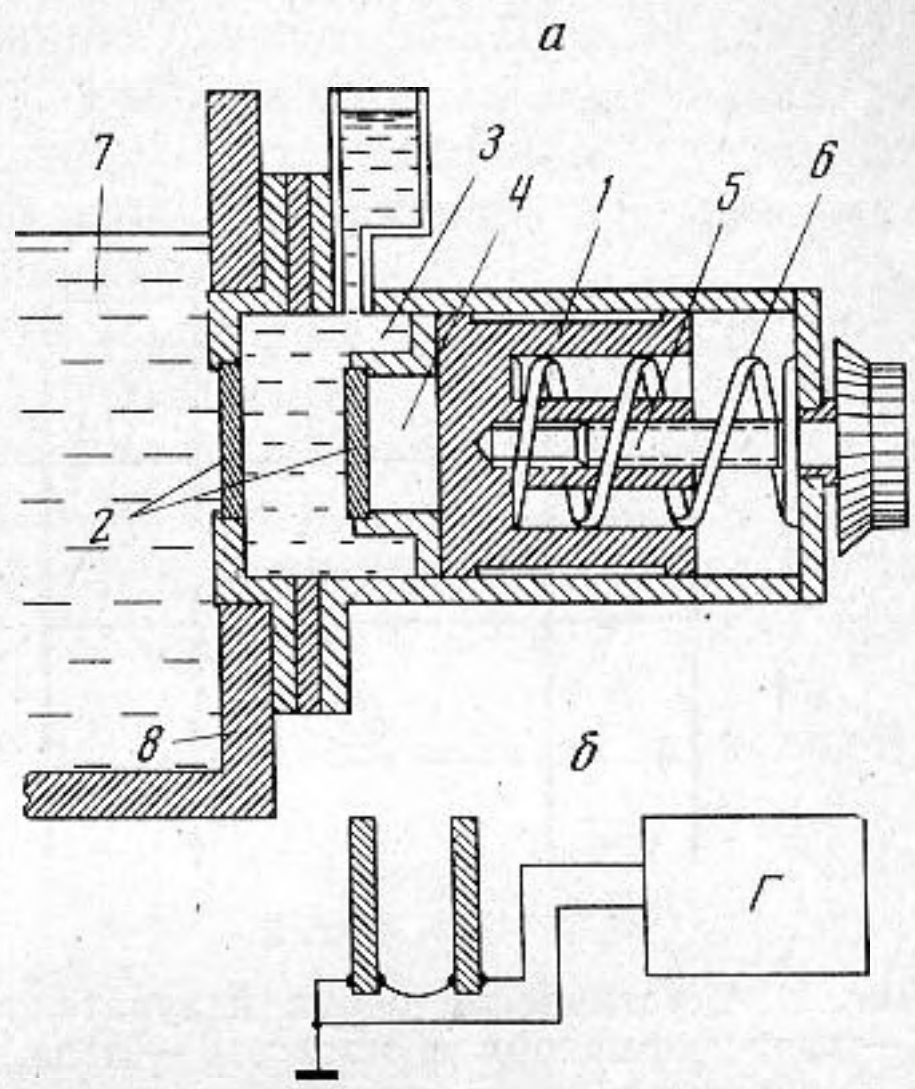
Для расширения рабочей полосы пьезокерамических излучателей широко используют системы, состоящие из одного или нескольких пассивных согласующих слоев. С увеличением числа слоев с оптимальными параметрами полоса рабочих частот возрастает, однако интенсивность излучения при резонансе снижается [1, 2]. При исследованиях в области нелинейной акустики часто возникает потребность в мощном излучателе, перестраиваемом в некотором диапазоне частот. В работе [3] описан излучатель, состоящий из пьезопластины и прилегающего к ней жидкого слоя, толщину которого можно изменять, настраивая в резонанс всю систему в целом. Экспериментальные исследования показали возможность перестройки в полосе частот от 40 до 800 *кгц* на уровне 0,5 максимальной мощности. Теоретическое исследование подобной системы проводится в работе [4], где сделано заключение о возможности перестройки излучателя в некотором диапазоне частот без изменения излучаемой мощности.

В работе [5] рассматривается способ согласования акустических импеданцев, основанный на использовании резонанса в системе из двух переходных слоев малой толщины. Резонатор позволяет изменять частоту настройки во время работы.

Ниже рассматривается мощный перестраиваемый излучатель, состоящий из двух активных пьезокерамических слоев, разделенных согласующим жидким слоем. Конструкция излучателя и электрическая схема соединения пьезопластин приведены на фиг. 1, *а*, *б*. Одна пьезопластина жестко закреплена на внешнем фланце, вторая крепится к подвижному поршню. Пластины вклеиваются эпоксидной смолой по периметру в держатели из оргстекла. Поршень перемещается при помощи микрометрического винта и пружины, что позволяет плавно изменять расстояние между пластинами от 0,5 до 15 *мм*. На резонансной частоте пьезопластин интенсивность излучения максимальна для слоя масла толщиной $L=(2n-1)\lambda_м/2$, $n=1, 2, 3, \ldots$ $\lambda_м$ — длина волны в масле на заданной частоте. При экспериментах расстояние между пластинами изменялось в пределах от 0,5 до 2—3 *мм* в зависимости от рабочей частоты излучателя.

Конструкция предусматривает возможность регулировки параллельности пластин, причем контроль удобно проводить непосредственно по уровню излучаемого ультразвука. Изменением масляного зазора излучатель настраивается на максимум излучения на резонансной частоте пьезопластин, затем подбирается частота, на которой при установленном зазоре излучение минимально и производится регулировка параллельности, так

как настройка по минимуму более острая, чем настройка по максимуму. Отклонение от параллельности при перемещении поршня не превышает 0,05 *мм* благодаря тщательному изготовлению поршня и направляющего цилиндра. Интенсивность излучения при согласованной работе пьезопластин на резонансной частоте в четыре раза превышает интенсивность излучения одной пластины.



Фиг. 1. *а* — конструкция излучателя: *1* — подвижный поршень, *2* — пьезоэлементы, *3* — масло, *4* — воздух, *5* — микрометрический винт, *6* — пружина, *7* — вода, *8* — стенка кюветы; *б* — электрическая схема соединения пьезоэлементов

Поскольку поперечные размеры пластин значительно больше длины волны, систему можно считать одномерной. Для акустической схемы, приведенной на фиг. 2, на основании уравнений пьезоэффекта можно написать, используя в качестве граничных условий равенство упругих напряжений и смещений на каждой из границ раздела, систему из восьми уравнений, подобно тому как это сделано в работе [6]. Решение этой системы уравнений позволяет получить амплитудно-частотную характеристику излучателя. Расчет был проведен на ЭВМ «Мир-1» для керамики ЦТС-19 с пьезоэлектрической постоянной $e=4{,}3\cdot10^6$ *дин*$^{1/2}$/*см*. Скорость звука в керамике $c=3\cdot10^5$ *см/сек*, плотность $\rho=7{,}3$ *г/см*^{3}; промежуточный слой — трансформаторное масло с параметрами $\rho_м=0{,}92$ *г/см*^{3}, $c_м=1{,}39\cdot10^5$ *см/сек*. Результаты расчета при оптимальной настройке согласующего слоя для пластин толщиной $d_1=d_3=1{,}4$ *мм*, с резонансной частотой $f_р=1{,}1$ *Мгц* приведены на фиг. 3, где показана в относительных единицах зависимость излучаемой мощности от частоты. Отличительной особенностью рассматриваемой системы является то, что максимальная мощность в некотором диапазоне частот практически не зависит от частоты настройки.

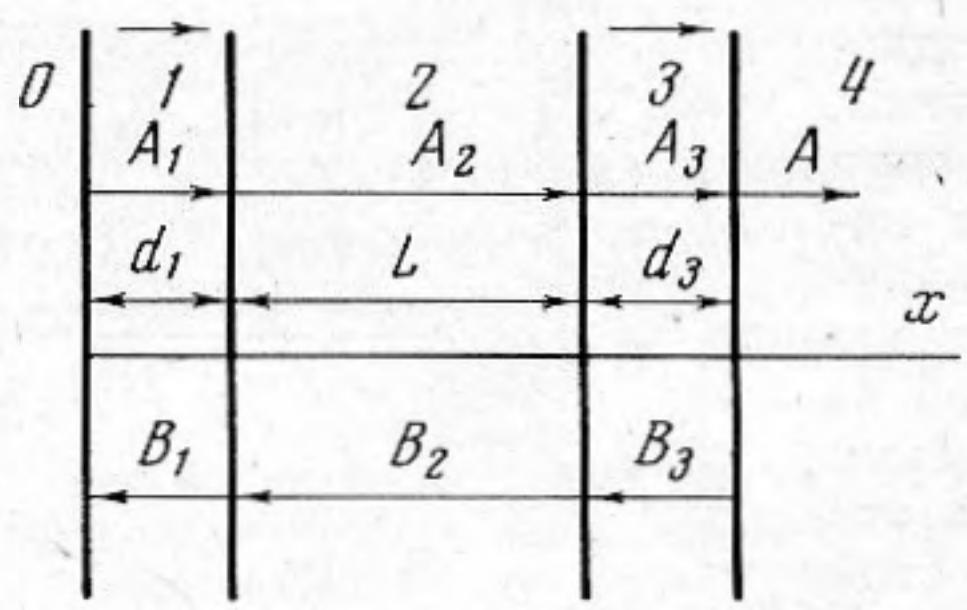
Для проверки полученной зависимости была собрана экспериментальная установка. Напряжение на пьезопластины излучателя подавалось от мощного импульсного генератора. Мощность генератора достигала восьми киловатт в импульсе при скважности 100 и частоте следования 50 *гц*. Частота заполнения изменялась в пределах от 0,9 до 2,5 *Мгц*.

Определение интенсивности излучения проводилось одновременно двумя методами — калориметрическим и расчетом по экспериментально измеренной нелинейной длине [7]. Расхождение не превышало 20%.

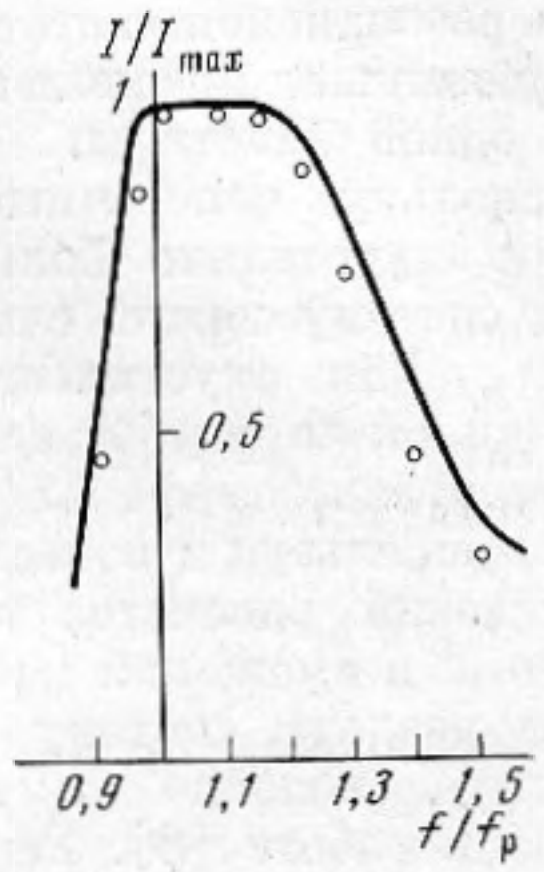
Экспериментальные результаты показаны на фиг. 3 точками. Из характеристик излучателя видно, что интенсивность излучения практически не изменяется при расстройке до 20% от резонансной частоты пьезопластин при условии, что вся система подстраивается путем изменения L. Диапазон перестройки на уровне 0,5 максимальной мощности составляет 45—50% от $f_р$. Примерно такая же относительная полоса излучателя была получена на более низкой частоте в воде с пассивным резонатором [5]. Однако использование второй пьезопластины излучателя в качестве внешней стенки перестраиваемого резонатора позволяет не только расширить полосу частот, но и получить при этом довольно большую интенсивность излучения.

На фиг. 4, *а* приведены экспериментальные характеристики излучателя с пластинами толщиной 1 *мм*, диаметром 30 *мм*, с резонансной частотой 1,7 *Мгц*. Амплитуда напряжения на пластинах излучателя поддерживалась постоянной и составляла 400 *в*. Максимальная интенсивность

излучения при резонансе достигала 150 *вт/см*². Она остается постоянной в полосе частот от 1,7 до 1,9 *Мгц*. Относительный диапазон перестройки составляет 12—14% при максимальной интенсивности и 23—24% — на уровне 0,5 от $\mathcal{J}_{max}$. Кривая *4*, фиг. 4 представляет зависимость интенсив-



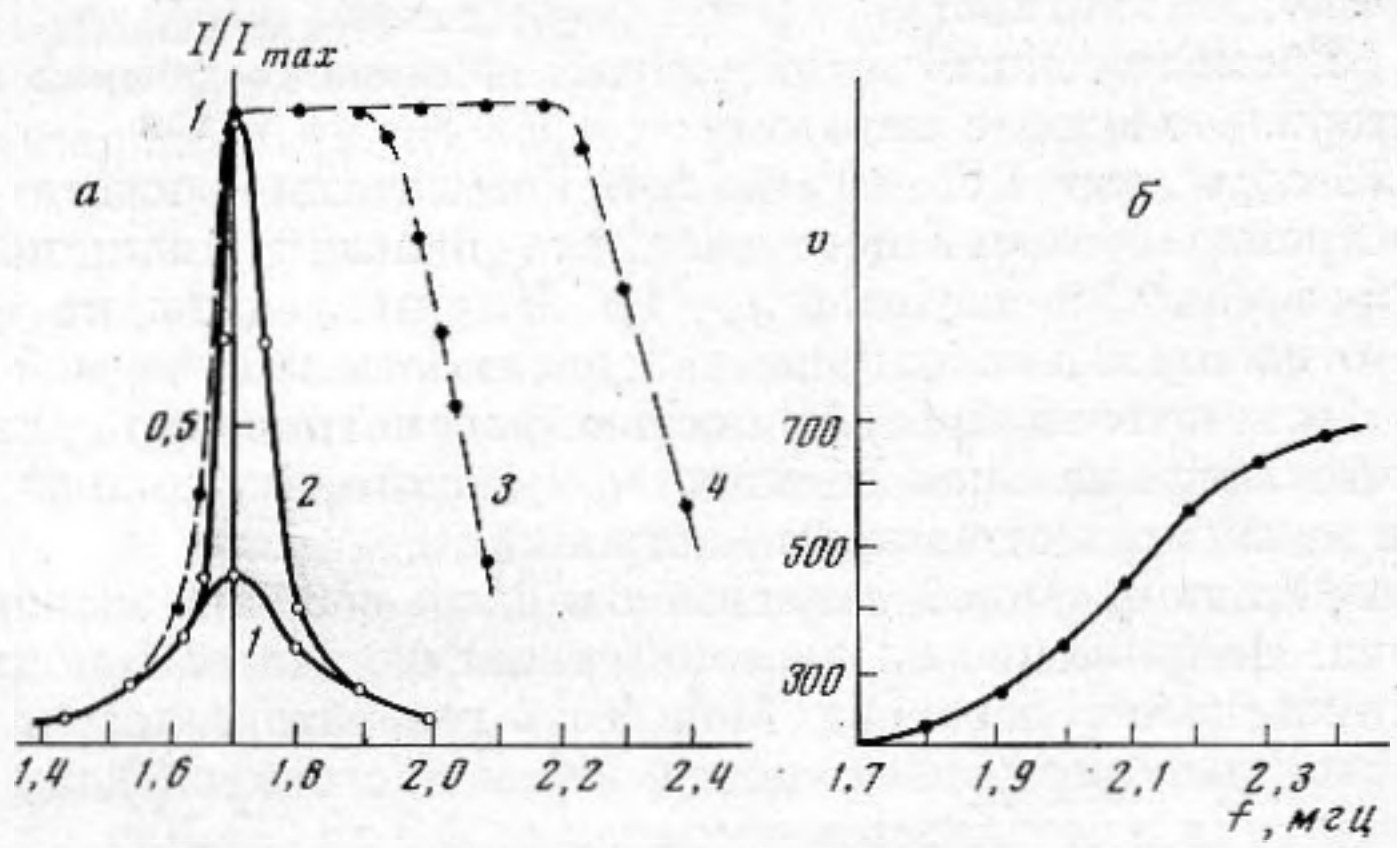
Фиг. 2



Фиг. 3

Фиг. 2. Акустическая схема излучателя. *1* и *3* — активные пьезокерамические слои, *2* — трансформаторное масло, *4* — вода, 0 — воздух, A_i — прямая волна в *i*-м слое, B_i — обратная волна, верхние стрелки указывают направление поляризации пьезокерамики

Фиг. 3. Зависимость интенсивности излучения от частоты при оптимальной *L*



Фиг. 4. Экспериментальные характеристики излучателя (*а*): *1* — резонансная характеристика для одной пластины при напряжении возбуждения 200 *в*, *2* — то же для двух пластин с оптимальным значением *L* на резонансной частоте, *3* — характеристика перестраиваемого излучателя при оптимальной *L* на каждой частоте, амплитуда напряжения возбуждения на пластинах 400 *в*, *4* — характеристика перестраиваемого излучателя при изменении напряжения возбуждения по закону, приведенному на фиг. 4 (*б*)

ности излучения от частоты в том случае, когда напряжение на излучателе не поддерживается постоянным. Напряжение на выходе генератора возрастает с ростом частоты, что приводит к расширению относительного диапазона частот до 25—30% на уровне максимальной интенсивности и до 40% — на уровне 0,5 от $\mathcal{J}_{max}$. Соответственный закон изменения напряжения на пластинах излучателя в зависимости от частоты показан на фиг. 4, *б*. При этом выходной электрический импеданц генератора порядка 100 *ом* и в пределах перестройки частоты излучателя практически не изменяется.

Входное активное сопротивление излучателя на резонансной частоте пьезопластин составляет приблизительно 20 *ом* и с увеличением рабочей частоты излучателя возрастает до величины около 100 *ом* на границе полосы пропускания. Как следует из работы [8], оптимальная акустическая нагрузка слабо зависит от волновой длины пьезостержней φ, если $\varphi > 80°$, что и наблюдалось при экспериментах. Рабочая полоса излучателя распространяется на область более высоких частот; выходное акустическое сопротивление излучателя согласовывалось с нагрузкой по максимуму КПД путем изменения толщины масляного слоя.

Эксперимент проводился в ванне из оргстекла размером 150×150×500 *мм*, заполненной водой. Задняя стенка ванны для уменьшения отражений была покрыта резиной. Полученная мощность позволяла наблюдать нелинейные эффекты в жидкости. Так, при излучении в воду на частотах от 1,7 до 2 *Мгц* наблюдалось возникновение ударной волны на расстоянии 3—4 *см* от излучателя, что соответствует значениям числа Маха порядка 10^{-3}.

В заключение автор благодарит В. И. Шмальгаузена за руководство работой.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев Б. Н., Дианов Д. Б.* О расширении полосы пропускания пьезокерамических преобразователей с помощью переходных слоев. Акуст. ж., 1974, *20*, 5, 663—667.
2. *Меркулов Л. Г., Яблоник Л. М.* Работа демпфированного преобразователя при наличии нескольких промежуточных слоев. Акуст. ж., 1963, *9*, 4, 449—459.
3. *Fray W. J., Fray R. B., Hall W.* Variable resonant frequency Crystal systems. J. Acoust. Soc. America, 1951, *23*, 1, 94—110.
4. *Кривин Е. В., Кошевой В. В., Мизайловский В. Н.* О пьезопреобразователе с управляемой резонансной частотой. В сб.: Отбор и передачи информации. 40, Киев, «Наукова думка», 1974, 87—91.
5. *Аранович В. Б., Прудов И. А.* О резонансном согласовании в тонких переходных слоях. Акуст. ж., 1971, *17*, 4, 513—520.
6. *Бутнинг Д. П., Прохоров В. Г.* К теории плоского многослойного преобразователя. Изв. ЛЭТИ им. В. И. Ульянова, вып. 63, 1968, 127—135.
7. *Руденко О. В., Солуян С. И.* Теоретические основы нелинейной акустики. М., «Наука», 1975, 34.
8. *Островский Л. А., Турубаров В. И.* К вопросу оптимизации многослойных стержневых пьезопреобразователей. В сб.: Вопросы судостроения. Сер. Акустика, 1, ЦНИИ «РУМБ», 1974, 125—138.

Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова,
физический факультет

Поступила
3 июня 1977 г.
После переработки
21 ноября 1977 г.