

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

# АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том XVII

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

2

---

МОСКВА - 1971

УДК 534.612

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА  
В АКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ

С. Н. Бугулавская, Е. В. Романенко, Л. И. Холод

Исследована возможность использования пироэлектрического эффекта в акустике. Экспериментально установлено, что при некоторых условиях пироэлектрический способ регистрации звуковых волн на 2—3 порядка более чувствителен, чем пьезоэлектрический при равных размерах пиро- и пьезоэлементов. Применение пироэффекта возможно при разработке инфразвуковых микрофонов и тепловых приемников ультразвука. Пироэффект обязательно должен учитываться при градуировке инфразвуковых пьезоэлектрических гидрофонов акустическими методами.

Арсенал технической акустики насчитывает много физических явлений, положенных в основу работы измерительных приборов. Здесь и ставшие классическими электродинамические, электромагнитные, пьезоэлектрические, магнитострикционные, термоэлектрические явления, и сравнительно недавно вошедшее в практику акустических измерений явление ядерного магнитного резонанса [1]. Однако есть еще один физический эффект, который пока еще не нашел достойного применения в акустических измерениях, но, по крайней мере, необходимость учета которого становится все более очевидной. Речь идет о пироэлектрическом эффекте.

До сих пор пироэлектрический эффект использовался главным образом при тепловых измерениях [2]. Полезно напомнить, что акустические явления, как правило, сопровождаются тепловыми эффектами, обусловленными прежде всего адиабатичностью процессов сжатия и разрежения в звуковой волне и поглощением звуковых волн. А это значит, что пироэлектрический эффект может и должен найти применение в акустике. Согласно терминологии, введенной Кэди [3], пироэлектричество определяется как изменение поляризации диэлектрика с температурой. Пироэлектричеством обладают 10 классов кристаллов. Значительным пироэлектричеством, в частности, обладает монокристаллический и поликристаллический  $\text{BaTiO}_3$  и пьезокерамика других составов.

Пироэлектрический эффект усложняется тем фактом, что каждый пироэлектрический кристалл является также и пьезоэлектрическим. Изменение температуры нестесненным ничем кристалла вызывает деформацию, а последняя в свою очередь порождает вторичную поляризацию пьезоэлектрического происхождения, налагающуюся на первичную пироэлектрическую поляризацию.

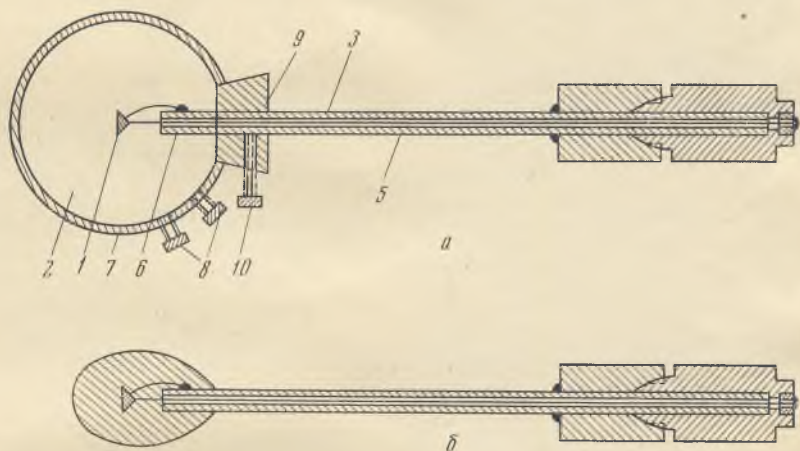
Первичное пироэлектричество — то, которое наблюдалось бы в полностью закрепленном кристалле. Вторичное пироэлектричество зависит еще и от того, равномерен нагрев или нет. В результате экспериментов, подтверждающих существование пироэлектричества двух родов, выяснилось, что в турмалине и сегнетовой соли первичный пироэлектрический эффект составляет 10—20% от общего пироэлектрического эффекта. В керамике  $\text{BaTiO}_3$  первичный пироэффект преобладает над вторичным и оба эффекта имеют разные знаки [4].

Зная значение общей пироконстанты керамики титаната бария (по данным работы [4] пироконстанта  $\text{BaTiO}_3$   $\gamma = -2,0 \cdot 10^{-8}$  кулон/см<sup>2</sup>·град)

легко оценить чувствительность керамической пластинки известного размера, использованной в качестве пироэлемента. Если пластинка, представляющая собой емкость  $C$ , нагружена на бесконечно большое сопротивление, то разность потенциалов  $\Delta U$ , возникающая на обкладках пластинки при повышении ее температуры на  $\Delta T$ , будет [5]

$$\Delta U = \frac{4\pi h}{\epsilon} \cdot \gamma \cdot \Delta T \cdot 10^{12} b. \quad (1)$$

Так например, на обкладках пластинки из керамики  $\text{BaTiO}_3$  с  $\epsilon = 1200$  и  $h = 0,1$  см при нагревании ее на  $1^\circ\text{C}$  развивается разность потенциалов около 20 в. Для сравнения отметим, что термо-э.д.с. развиваемая медь-кон-



Фиг. 1

стантановой термопарой при аналогичных условиях, составляет всего  $42 \cdot 10^{-6}$  в/град.

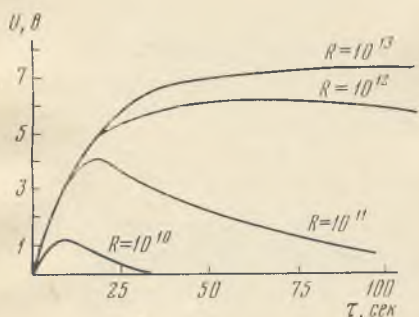
Значительно более высокая чувствительность пироэлементов к температурным изменениям по сравнению с чувствительностью термопар и термисторов позволяет использовать их для приема ультразвуковых колебаний в конструкциях, подобных тем, в которых используются термопары [6] и термисторы. Это, так называемые, тепловые приемники ультразвука, принцип действия которых основан на измерении повышения температуры поглотителя в результате поглощения в нем ультразвуковой энергии. Если термоэлектрические приемники позволяют измерять ультразвук, начиная с интенсивности порядка  $0,1$  вт/см<sup>2</sup>, то тепловые приемники с пироэлектрическим чувствительным элементом снижают этот предел до  $0,001$ — $0,0001$  вт/см<sup>2</sup>.

Недостатком таких приемников является высокое внутреннее сопротивление. Однако этот недостаток можно обойти, если использовать в качестве регистрирующего прибора промышленный электрометр с входным сопротивлением порядка  $10^{11}$ — $10^{14}$  ом.

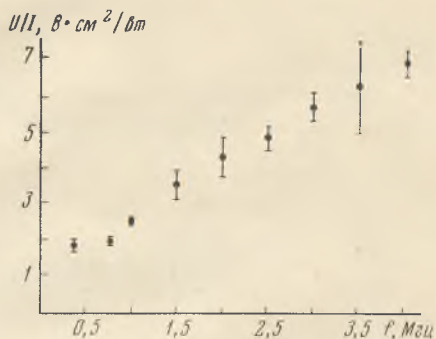
Исследованные в настоящей работе пироэлектрические приемники, как и известные термоэлектрические приемники, можно подразделить по типу поглотителя на два вида: приемники с жидким поглотителем; приемники с твердым поглотителем. Конструкция приемника с жидким поглотителем показана на фиг. 1, а. Чувствительным элементом приемника является плоская пластинка 1 из керамики ЦТС. Пластинка в данном случае имеет форму равнобедренного треугольника ( $h = 2,4$  мм); форма роли не играет и может быть любой. В описываемом приемнике поглотителем является касторовое масло 2. Пироэлемент укреплен на держателе 3, снабженном патроном 4. В качестве держателя используется медицинская игла макси-



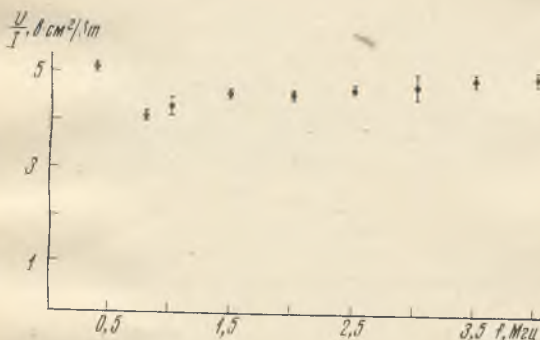
мального размера. Внутри иглы проходит вывод 5 от электрода пироэлемента, второй вывод 6 припаян к игле. Приемник с держателем помещается в рамку из плексигласа 7, диаметром 40 мм; держатель закрепляется в отверстии 9 с помощью винта 10. Рамка с двух сторон заклеивается тонкой (около 10 мк) тефлоновой пленкой. Для заполнения внутреннего объема рамки маслом служат отверстия 8.



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5

Конструкция приемников с твердым поглотителем показана на фиг. 1, б. В качестве чувствительных элементов приемников были выбраны: плоская пластинка из керамики ЦТС, по своим размерам и форме эквивалентная пластинке, описанной выше; цилиндр из керамики BaTiO<sub>3</sub>. Высота цилиндра  $h = 3$ , диаметр 2,5 мм. В качестве твердого поглотителя использовался сплав воска с канифолью. Крепление приемников аналогично описанному выше.

Эквивалентная схема теплового приемника с пироэлектрическим чувствительным элементом, включенного на входе электрометра, очень проста. Она представляет собой емкость пироэлемента  $C_0$ , параллельно которой включены сопротивление утечки пироэлемента  $R_0$ , емкость  $C_{вх}$  и сопротивление  $R_{вх}$  электрометра.

Простой расчет [7] показывает, что потенциал на обкладках плоского пироэлемента, покрытого слоем поглотителя и облучаемого ультразвуком интенсивностью  $I$  с момента времени  $t = 0$ , изменяется в зависимости от времени по закону, графически представленному на фиг. 2, при различных значениях входного сопротивления  $R_{вх}$  электрометра и при суммарной емкости пироэлемента и электрометра, равной 350 пф. Зависимость имеет экстремальный характер, причем экстремум достигается тем быстрее, чем меньше  $R_{вх}$ . При этом также уменьшается и величина экстремума, определяющая чувствительность приемника. Оптимальное значение времени

достижения экстремума, которое представляет собой время отсчета показания, регулируется входным сопротивлением электрометра и выбирается исходя из условий измерения. При наличии значительных электростатических помех и при отсутствии стабилизации источников питания время отсчета следует выбирать небольшим (единицы — десятки секунд). Следует отметить, что приемники с твердым поглотителем характеризуются значительно меньшим временем нарастания потенциала, чем приемники с жидким поглотителем. В то же время приемники с твердым поглотителем имеют более равномерную частотную характеристику. Именно поэтому они более предпочтительны для измерения интенсивности ультразвука.

На фиг. 3 и 4 показаны частотные характеристики описанных пьроэлектрических приемников с жидким и твердым поглотителем. На фиг. 5 и 6 показаны диаграмма направленности и динамическая характеристика приемника с твердым поглотителем. На



Фиг. 6

фиг. 7 показана зависимость чувствительности приемника с твердым поглотителем от толщины поглотителя.

Тепловые приемники с пьроэлектрическим чувствительным элементом обладают еще одним чрезвычайно полезным качеством. Дело в том, что пьроэлектрик является одновременно и пьезоэлектриком. А это значит, что тепловой пьроэлектрический приемник может быть одновременно использован и как пьезоэлектрический, т. е. с его помощью можно в одной и той же точке поля одновременно измерять мгновенный (давление) и квадратичный (интенсивность) параметры.

С целью исключить влияние нестабильности температуры окружающей среды на показания пьроэлектрического приемника ультразвука иногда полезно применять в приемнике не один чувствительный пьроэлемент, а два идентичных элемента, включенных навстречу друг другу и разнесенных в пространстве. В этом случае приемник вводится в измеряемое ультразвуковое поле таким образом, чтобы ультразвук понадал только на один элемент. Второй элемент служит лишь для термокомпенсации подобно холодному спаю дифференциальной термопары [6] или компенсационному термистору [8].

Описанные выше тепловые приемники ультразвука с пьроэлектрическим чувствительным элементом не исчерпывают всех возможностей использования пьроэлектрического эффекта в акустических измерениях.

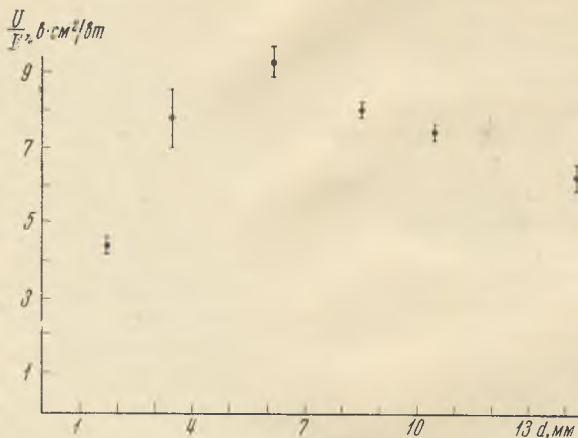
Известно, что звуковая волна характеризуется не только колебательным смещением, скоростью, ускорением и давлением, но и колебательной температурой, величина которой в градусах Цельсия определяется выражением [9]

$$T_{\sim} = \frac{\beta T_0}{\rho_1 C_{p1}} \cdot p_{\sim}, \quad (2)$$

где  $\beta$  — коэффициент объемного расширения среды, в которой распространяется звук,  $T_0$  — средняя температура среды,  $\rho_1$  — плотность,  $C_{p1}$  — удель-

ная теплоемкость при постоянном давлении,  $p_{\sim}$  — колебательное давление в звуковой волне в барах.

Оценка показывает, что при распространении звука в воздухе (при  $T_0 = 20^\circ$ )  $T_{\sim} \sim 10^{-4} p_{\sim}$ , в жидкости  $T_{\sim} \sim (10^{-8} \div 10^{-9}) p_{\sim}$ . Используя соотношения (1) и (2) и заменяя  $\Delta T$  на  $T_{\sim}$  и  $\Delta U$  на  $U_{\sim}$  для чувствитель-



Фиг. 7

ности пьезоэлемента по давлению в звуковой волне, получим выражение:

$$M_{\text{пиро}} = \frac{U_{\sim}}{p} = \frac{4\pi h\beta T_0 \gamma}{\rho_1 C_{p1}} \cdot 10^{18} \text{ мкв/бар.} \quad (3)$$

Выражение (3) представляет собой предельную чувствительность, т. е. чувствительность при условии, что пьезоэлемент в каждое мгновение принимает температуру среды (отсутствует тепловая инерция и конвекция при передаче тепла от среды к пьезоэлементу). Реальная чувствительность зависит от частоты звука [10] и может быть представлена в виде

$$M_{\text{пиро}} = \frac{4\pi h\beta T_0 \gamma \cdot 10^{18}}{\varepsilon \rho_1 C_{p1}} \cdot \frac{m}{\sqrt{m^2 + \omega^2}} \text{ мкв/бар,} \quad (4)$$

где  $m = \frac{\alpha \cdot S}{\rho_2 \cdot V \cdot C_{p2}}$ ,  $\alpha$  — коэффициент теплопередачи, равный для спо-

койного воздуха  $2 \div 8 \text{ ккал/м}^2 \text{ сек} \cdot \text{град}$ ,  $\rho_2$ ,  $C_{p2}$ ,  $S$  и  $V$  соответственно плотность, удельная теплоемкость, поверхность и объем пьезоэлемента.

На фиг. 8 показано измеренное экспериментально (кривая 1) отношение чувствительности пьезоэлемента по давлению к его пьезоэлектрической чувствительности в зависимости от частоты. Материал пьезоэлемента — керамика  $\text{BaTiO}_3$ . Форма пьезоэлемента — пластина толщиной 0,01 см. Затрихована область теоретически возможных значений, определяемых соотношением (4), при  $\alpha$ , изменяющемся от 2 до 8, и известном выражении для пьезоэлектрической чувствительности

$$M_{\text{пьеzo}} = \frac{4\pi d_{\text{вс.сж}}}{\varepsilon} \cdot h \cdot 300 \cdot 10^6 \text{ мкв/бар.} \quad (5)$$

Здесь  $d_{\text{вс.сж}}$  — пьезомодуль керамики  $\text{BaTiO}_3$  при всестороннем сжатии.

Имея в виду, что формула (4) не учитывает явления конвекции и фазового сдвига между пиропотенциалом и пьезопотенциалом, согласие экспериментальных и расчетных результатов следует признать удовлетворительным. Измерения пьезоэлектрической чувствительности проводились в воздухе, пьезоэлектрической — в жидкости. При этом предполагалось



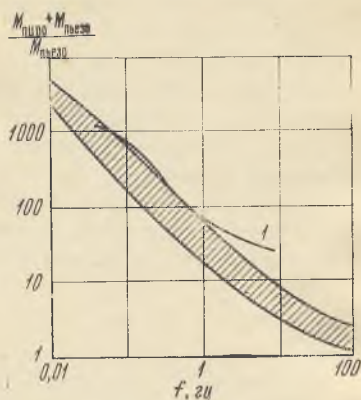
в первом приближении, что в жидкости пирозффект не проявляется (см. формулу (2)).

Результаты, приведенные на фиг. 8, позволяют сделать вывод, что при определенных условиях (тонкий пирозэлемент окружен газовой средой) и низких частотах пирозэлектрическая чувствительность пьезокерамической пластинки на 2—3 порядка выше ее пьезоэлектрической чувствительности и может быть использована для приема инфразвуковых колебаний в газах.

Принцип конструкции таких инфразвуковых микрофонов очень прост. Основной деталью его должен быть возможно более тонкий пирозэлектрический элемент, окруженный газовой средой и подключенный к высокоомному регистрирующему устройству типа электрометра. Используя набор последовательно соединенных пирозэлементов, легко получить чувствительность микрофона порядка  $100 \div 1000$  мкв/бар при собственной емкости около 1000 пф.

Главным недостатком такого микрофона будет высокое внутреннее сопротивление. Однако, выпускаемые промышленностью электрометрические приборы с высоким входным сопротивлением позволяют легко обойти этот недостаток. Кроме того, полевые транзисторы типа ТН-1 и ТН-5, а также МОП-транзисторы позволят создавать миниатюрные согласующие схемы с высоким входным сопротивлением непосредственно в корпусе микрофона между пирозэлементом и кабелем.

До сих пор мы рассматривали проявление пирозэлектрического эффекта в тех случаях, когда пирозэлемент окружен газовой средой, например, воздухом. Когда же пирозэлемент окружен жидкой средой, то при тех же значениях звуковых давлений, что и в предыдущем случае, пирозффект будет проявляться на 4—5 порядков слабее, как это следует из формулы (2). Однако не всегда можно пренебречь проявлением пирозэффекта, когда пирозэлемент окружен жидкой средой. И прежде всего это нельзя делать при градуировке инфразвуковых пьезоэлектрических гидрофонов акустическими методами. В таблице приведены рассчитанные максимально возможные значения отношения  $\frac{M_{\text{пиро}} + M_{\text{пьезо}}}{M_{\text{пьезо}}}$  для различных жидкостей при использовании пьезомодулей  $d_{\text{вс.сж}}$ ,  $d_{31}$  и  $d_{33}$ . Видно, что пирозэффект не проявляется совершенно лишь в том случае, когда при градуировке пьезоэлемент (который одновременно является и пирозэлементом) окружен водой при температуре 4°.



Фиг. 8

Жидкость	$\frac{M_{\text{пиро}} + M_{\text{пьезо}}}{M_{\text{пьезо}}}$			Жидкость	$\frac{M_{\text{пиро}} + M_{\text{пьезо}}}{M_{\text{пьезо}}}$		
	при $d_{\text{вс.сж}} = 0,8 \cdot 10^{-6}$ CGSE	при $d_{31} = 1,4 \cdot 10^{-6}$ CGSE	при $d_{33} = 3,6 \cdot 10^{-6}$ CGSE		при $d_{\text{вс.сж}} = 0,8 \cdot 10^{-6}$ CGSE	при $d_{31} = 1,4 \cdot 10^{-6}$ CGSE	при $d_{33} = 3,6 \cdot 10^{-6}$ CGSE
Вода при 4° С	1	1	1	Оливковое масло	-0,1	+1,61	+0,78
Вода при 20° С	+0,88	+1,065	+0,98	Серная кислота	+0,45	+1,30	+0,89
Вода при 25° С	+0,85	+1,08	+0,97	Керосин	-0,53	+1,85	+0,70
Ацетон	-1,1	+2,15	+0,58	Сероуглерод	-1,20	+2,23	+0,55
Глицерин	+0,57	+1,23	+0,92	Скипидар	-0,25	+1,68	+0,75
Спирт этил.	-0,30	+1,70	+0,75	Эфир	-1,55	+2,43	+0,48

Если температура воды равна  $25^{\circ}$ , то пренебрежение пирозэффектом может дать погрешность градуировки до 15% в случае использования пьезомодуля  $d_{\text{вс.сж}}$ . Если же в качестве рабочей жидкости используется не вода, а, например, оливковое масло, то ошибка может достигать 90%.

В заключение полезно сказать несколько слов об интервале рабочих температур пирозэлектрических приемников. В частности, точка Кюри у  $\text{PbNb}_2\text{O}_6$  близка к  $570^{\circ}$  [2], а у бариевоциркониевого метаниобата она превышает  $1400^{\circ}$ . Не исключено также, что удастся создать низкотемпературные акустические приемники с пирозэлектрическими чувствительными элементами из колеманита, который, как сообщалось [2], обладает пирозэлектрическими свойствами в интервале температур от  $-6^{\circ}$  до температуры жидкого гелия.

При выполнении настоящей работы был использован ряд ценных советов М. А. Исаковича, который принимал также живое участие в обсуждении результатов, за что авторы ему искренне благодарны.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. G. A. Alers, P. A. Fleury. Strain amplitude of mc/sec ultrasonic waves in solids. J. Acoust. Soc. America, 1964, 36, 7, 1297—1304.
2. С. Лэнг. Использование пирозэлектрического эффекта для измерения малых изменений температуры. В кн. «Измерение нестационарных температур и тепловых потоков». М., «Мир», 1966, 261—276.
3. У. Кэди. Пьезоэлектричество и его практическое применение. М., ИЛ, 1949, 640—651.
4. T. A. Perls, T. J. Diesel, W. J. Dobrov. Primary pyroelectricity in ceramic  $\text{BaTiO}_3$ . J. Appl. Phys., 1958, 29, 9, 45—50.
5. A. G. Chynoweth. Dynamic method for measuring the pyroelectric effect with special reference to Barium Titanate. J. Appl. Phys., 1956, 27, 1, 78—84.
6. Л. К. Зарембо. О термоэлектрических приемниках ультразвука. Измерит. техника, 1958, 5, 74—77.
7. Л. И. Холод. Разработка и исследование пирозэлектрических приемников ультразвука. Дипломная работа, М., МГИ, 1969.
8. Ю. Л. Бенькович, Ю. С. Быховский, Ю. В. Пшеничников, О. П. Скобелев. Измерение ультразвуковой мощности. Контрольно-измерительные ультразвуковые приборы. Сб. докл. на Всес. н.-т. конф. по применению ультразвука в промышл. М., 1960, 135—141.
9. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред. М., ГИИ, 1944, 257.
10. Г. М. Кондратьев. Тепловые измерения. М.—Л., Машгиз, 1957.

Акустический институт АН СССР  
Москва

Поступила в редакцию  
29 октября 1970 г.