АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2002, том 48, № 1, с. 16–21

УДК 534.8

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КАК ИСТОЧНИКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

© 2002 г. А. А. Аносов[1, 2], В. И. Пасечник[1]

[1] Институт радиотехники и электроники РАН, НИЦ "ЭЛДИС" ИРЭ РАН
101000 Москва, Старосадский пер. 8
E-mail: passech@orc.ru

[2] Московская медицинская академия им. И.М. Сеченова

Поступила в редакцию 21.02.2001 г.

Экспериментально показана линейная зависимость выходного напряжения акустотермометра от разности температур источника и пьезопреобразователя. Постоянная составляющая выходного напряжения определяет шумовую температуру приемного устройства. Главная особенность теплового акустического излучения как источника акустических сигналов в том, что собственно сигналом является не полное тепловое излучение объекта, пропорциональное его абсолютной температуре, а лишь его часть, пропорциональная разности температур объекта и преобразователя.

В настоящее время в литературе активно обсуждается возможность создания пассивного акустического термотомографа для биомедицинских приложений [1–8]. С этой целью проводятся исследования параметров датчиков термотомографа – акустотермометров (АТ) – приемников теплового акустического излучения (ТАИ) [1, 9–13]. Тем не менее ряд фундаментальных вопросов, качающихся физики ТАИ, остается открытым. Главный из них – как учесть вклад в измеряемый сигнал шумов, создаваемых нагретым телом и пьезопреобразователем (ПП).

Измерение ТАИ имеет принципиальное ограничение, связанное с необходимостью учета собственного излучения преобразователя. Тело, нагретое до температуры T, должно испускать излучение, интенсивность которого пропорциональна этой величине [12]. С другой стороны, ПП – приемник излучения – также имеет вполне определенную температуру T_{TR}, и потому также должен создавать тепловое излучение, определяемое этой температурой. В результате в среде, примыкающей к преобразователю, распространяются навстречу друг другу два потока излучения. Суммарный поток излучения определяется их разностью. Если температура тела больше температуры ПП, $T > T_{TR}$, то на последний падает извне поток излучения; если $T < T_{TR}$, то ПП излучает в окружающую среду; если выполняется равенство температур $T = T_{TR}$, суммарный поток излучения равен нулю. Измеряемой величиной является так называемая акустояркостная температура T_A [9, 12], определяемая как температура черного акустического тела, которое создает тот же поток акустического излучения, что и исследуемый объект. Эта температура пропорциональна среднему квадрату звукового давления $\overline{p^2}$, измеряемому преобразователем. До настоящего времени остается до конца неясным, как связать значения T_A с температурами объекта и преобразователя. Подобную задачу рассматривали для потока теплового электромагнитного излучения теоретически [14], для акустического излучения подобные исследования пока не выполнены.

Из-за отсутствия ясного понимания механизма формирования электрического сигнала за счет ТАИ возникают трудности с интерпретацией результатов измерения температуры корреляционным способом [5, 15]. При таком способе приема излучения регистрируются электрические напряжения с двух ПП по отдельности, а затем они перемножаются и усредняются. В результате измеряется так называемая акустояркостная температура корреляционного сигнала T_{AC}. Экспериментально получены два результата:

(1) максимальная величина корреляционного сигнала T_{AC} пропорциональна разности температур $T - T_{TR}$;

(2) инкременты акустояркостных температур T_{A1}^M и T_{A2}^M, измеряемые модуляционным способом первым и вторым датчиками в отдельности, также пропорциональны этой же величине. Оцененные по этим данным значения коэффициента корреляции $R = T_{AC}/\sqrt{T_{A1}^M T_{A2}^M}$ достигали значений 0.6–0.7.

Первый из этих результатов не представляется очевидным. Если интенсивность теплового излучения тела определяется его абсолютной температурой, то, по аналогии с измерением шумового сигнала от активных источников, следовало

ожидать, что максимальная величина коррелированного сигнала будет пропорциональна величине T, а не $T - T_{TR}$. Таким образом, налицо отличие экспериментальных данных и теоретических оценок. Выяснение причин этого расхождения имеет также практическое значение, поскольку отличия величин сигнала в несколько десятков раз могут существенно повлиять на возможности решения обратных задач пассивной акустической термотомографии [5].

Первым шагом на пути решения поставленного вопроса об особенностях ТАИ как акустического сигнала должно стать исследование сигналов, полученных при некорреляционном приеме. В работах [9, 16] для измерения интенсивности ТАИ его источник – тело с температурой T – помещали в аквариум с температурой T_{AQ}, в котором находился и ПП, температура которого T_{TR} совпадала с температурой аквариума T_{AQ}. Уже в одной из первых экспериментальных работ по акустотермографии [16] показано, что сигнал, снимаемый с выхода АТ, растет, если в поле его зрения оказывается тело с температурой выше температуры аквариума T_{AQ}, и падает, если температура этого тела ниже T_{AQ}. Оказалось, что величина сигнала пропорциональна разности температур $T - T_{AQ}$. Этот результат был позднее подвержен в работах [9, 12]. Однако, в силу особенностей модуляционной схемы приема теплового акустического излучения, использованной в этих работах, нельзя однозначно ответить на вопрос, действительно ли акустояркостная температура определяется разностью температур $T - T_{TR}$.

Для описания сигналов, измеряемых АТ, в работе [10] предложена полуэмпирическая формула для среднего квадрата электрического напряжения $\overline{u^2}$, снимаемого с ПП, в которую входит член, зависящий от разности температур объекта и преобразователя $T - T_{TR}$. Однако строгий вывод этой формулы отсутствует.

В настоящей работе поставлена задача – измерить зависимость акустояркостной температуры от термодинамических температур источника ТАИ и преобразователя, а также получить соответствующее теоретическое выражение, описывающее эту зависимость.

Чтобы выбрать оптимальную схему эксперимента, рассмотрим особенности модуляционной схемы измерений [9, 12]. Тело с температурой T помещали в аквариум с температурой T_{AQ}, в котором находился и ПП, температура которого T_{TR} совпадала с температурой аквариума. Поток ТАИ периодически перекрывали с частотой в несколько герц. В один из полупериодов на ПП приходило тепловое акустическое излучение от объекта, а в другой полупериод – от аквариума. Измеряли разность сигналов, полученных в оба полупериода.

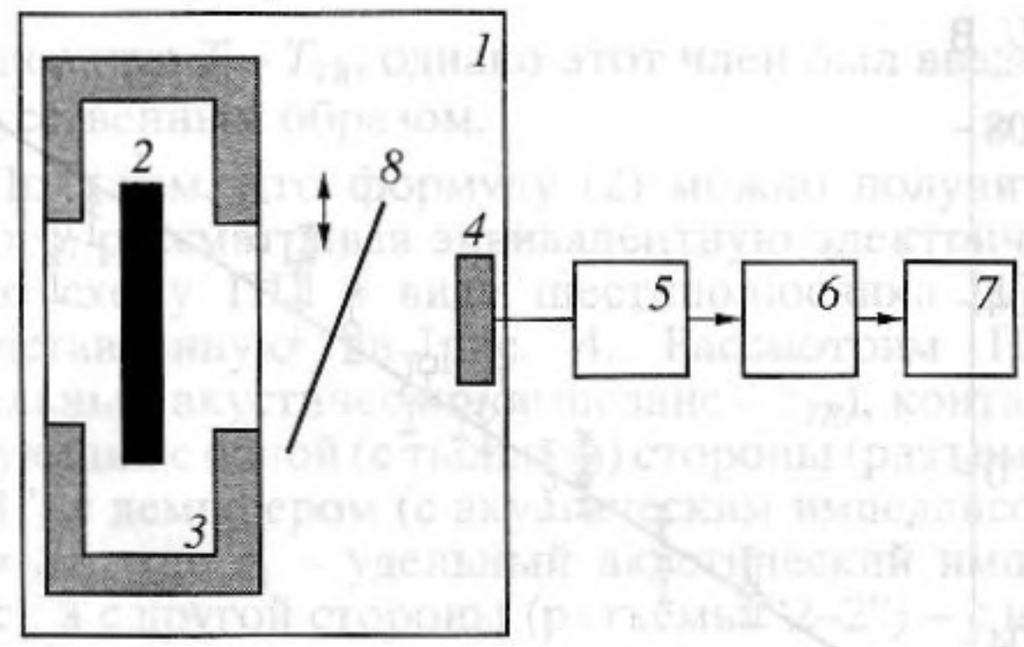

Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *1* – заполненный водой аквариум, *2* – пластилиновая полоса, *3* – кювета с пенопластовыми стенками и акустически прозрачными окнами, также заполненная водой, *4* – пьезопреобразователь, *5* – усилитель, *6* – квадратичный детектор, *7* – персональный компьютер, *8* – отражательная дюралевая пластина.

Покажем, что зависимость величины сигнала от температуры аквариума, полученная при модуляционном приеме, не допускает однозначной интерпретации. В работах [9, 12] исследуемое тело и аквариум рассматривались как два независимых объекта, у которых сравниваются интенсивности теплового излучения. Температура ПП фигурировала лишь постольку, поскольку она определяла собственные шумы ПП. То обстоятельство, что она имела с аквариумом одну и ту же температуру, на давало оснований считать, что регулируется сигнал, пропорциональный именно разности температур объекта и ПП: $T - T_{TR}$. Таким образом, вопрос о том, какую же именно величину измеряет приемник ТАИ, остается открытым.

С практической точки зрения эта неопределенность не влияет на результаты измерений температуры некорреляционным способом. Всегда можно провести калибровку приемного устройства по нескольким температурам объекта и получить однозначную связь между средним квадратом напряжения $\overline{u^2}$, снимаемого с ПП, и температурой объекта T. Тем не менее, как отмечено выше, этот вопрос является ключевым при корреляционных измерениях.

Чтобы исключить неоднозначность, связанную с модуляционными приемом, мы измеряли ТАИ немодуляционным способом (рис. 1). Измерения проводили в аквариуме *1* размером $40 \times 28 \times 30$ см^3, заполненном водой. Источником ТАИ служила широкая пластилиновая полоса *2* (коэффициент поглощения ультразвука в пластине на частоте около 2 МГц – 5 см$^{-1}$ [12]), которая выполняла роль акустического "черного" тела. Полосу поместили в кювету *3* (термостат) с толстыми пенопла-

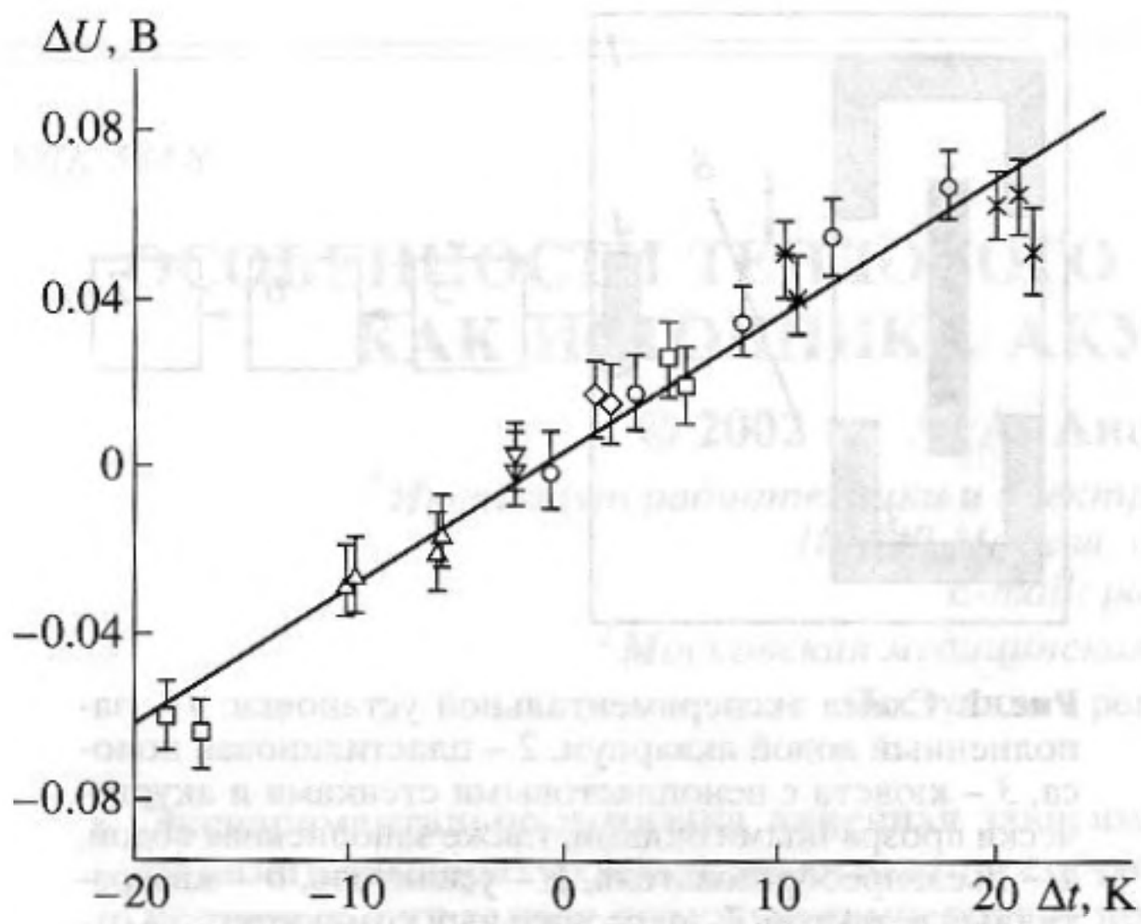

Рис. 2. Зависимость инкремента $\Delta U = U_O - U_C$ напряжений при регистрации сигнала U_O от черного тела и U_C от аквариума от разности Δt температур черного тела и аквариума при различных значениях температуры аквариума: ○ – температура аквариума 29.1°C; × – 30.0°C; * – 34.5°C; □ – 39.2°C; ◇ – 44.4°C; ▽ – 42.2°C; △ – 40.5°C.

стовыми стенками и акустически прозрачными окнами, также заполненную водой. В эксперименте независимо меняли температуру аквариума и кюветы от ~20° до ~45°C. Температуры контролировали ртутными термометрами с точностью 0.2°C.

Приемником излучения служил расположенный в аквариуме круглый плоский ПП *4* с радиусом $a = 5$ мм. ПП был снабжен одним четвертьволновым слоем, нагружен на согласующий трансформатор и настроен на частоту 2.2 МГц. Температура ПП совпадала с температурой аквариума. Звуковое давление, создаваемое ТАИ из аквариума с кюветой, преобразовывалось ПП в электрическое напряжение. Полный сигнал включал в себя также собственные шумы ПП.

Электрический сигнал через усилитель *5* с полосой пропускания 200 кГц подавали на вход квадратичного детектора *6*, выполненный на микросхеме MLT04 Analog Devices. Полученное выходное напряжение U, пропорциональное квадрату напряжения на выходе ПП $\overline{u^2}$, усредняли фильтром низких частот первого порядка с постоянной времени $\tau = 1$ с, а затем посредством платы сопряжения L-154 (L-card SoftWare Lab Limited, Россия) записывали в течение $t = 20$ с в персональный компьютер *7*. Немодуляционная схема измерений сохраняет постоянную составляющую сигнала, которая исчезает при модуляционном приеме акустического сигнала. Это в свою очередь снимает вопрос: температуру ПП или аквариума мы измеряем.

Для исключения дрейфа выходного сигнала за счет ПП и усилителя на пути сигнала помещали отражательную дюралевую пластину *8*. Если убрать пластину, то регистрируется сигнал от черного тела (положение "открыто" – пластина отодвинута – $U = U_O$). Если возвратить пластину на место, то измеряется сигнал из аквариума $U = U_C$ (положение "закрыто" – пластина перекрывает акустическое окно кюветы). Смена положений "открыто – закрыто", осуществляемая с периодом в несколько десятков секунд, позволяла скорректировать дрейфы установки и точнее определить разность напряжений при открытом и закрытом положении пластины, которую мы назвали инкрементом $\Delta U = U_O - U_C$ напряжений. Инкременты были, естественно, много меньше, чем каждое из измеренных напряжений U_O, U_C.

Зависимости инкремента ΔU напряжений от разности Δt температур черного тела и ПП $\Delta t = T - T_{TR}$ представлены на рис. 2. Если разность Δt температур положительна, то температура черного тела выше температуры аквариума, если же отрицательна, то температура аквариума выше температуры черного тела. На рис. 2 разными значками показаны экспериментальные данные, полученные при различных значениях температуры аквариума в диапазоне от 29°C до 45°C, а также прямая, аппроксимирующая приведенные данные.

Погрешности измерений σ инкремента ΔU напряжений, показанные на рис. 2, определяли, учитывая число независимых отсчетов $N = t/2\tau$ за время измерения t: $\sigma = \sqrt{2/N}\,\sigma_m$, где σ_m – среднеквадратическая ошибка измерения напряжений U_O, U_C, множитель $\sqrt{2}$ связан с тем, что рассчитывали разность напряжений.

Видно, что полученные данные могут быть аппроксимированы линейной функцией $\Delta U = (A \pm \delta A)\Delta T$, где среднее значение углового коэффициента A имеет смысл крутизны преобразования AT, δA – ошибка его определения. Как можно определить методом наименьших квадратов, значения $A \pm \delta A = 3.3 \pm 0.3$ мВ/K.

Для оценки постоянной составляющей сигнала и ее дрейфа на рис. 3 представлена зависимость напряжения U_C, измеряемого ПП в случае закрытого обтюратора. В этом случае изменения выходного напряжения связаны с дрейфами установки. Видно, что дрейфы составляют величину порядка 10 мВ при среднем значении $U_0 \approx 2.37$ В. Когда ПП был отключен от входного усилителя, уровень шума составил $U_A = 0.4$ В – это вклад в измеряемый сигнал шумов усилителя.

Таким образом, с учетом влияния дрейфов установки и шумов сигнала средний квадрат $\overline{u^2}$ выходного напряжения АТ складывается из боль-

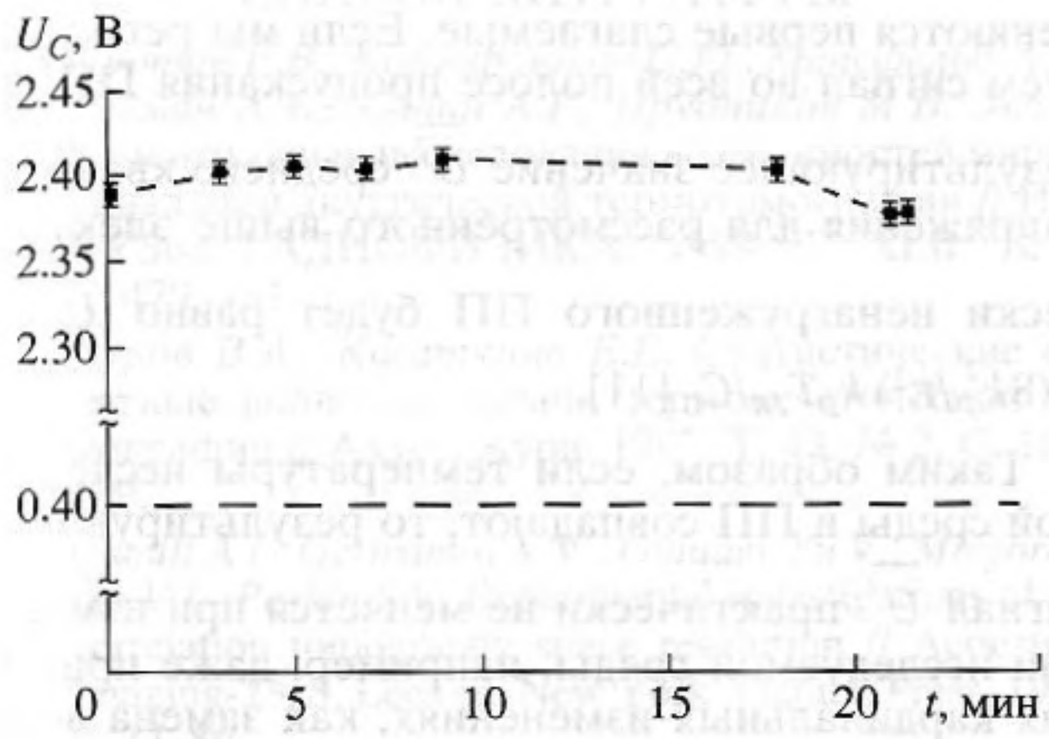

Рис. 3. Временна́я зависимость (дрейф) постоянной составляющей сигнала U_C при температуре аквариума 29.5 ± 0.5°С. 0.4 В – вклад в измеряемый сигнал шумов усилителя.

шой "подставки" и члена, линейно зависящего от разности температур объекта и преобразователя $T - T_{TR}$:

$$\overline{u^2} = B + A(T - T_{TR}). \qquad (1)$$

Обратимся теперь к анализу полученных результатов. Полуэмпирическая формула для среднего квадрата электрического напряжения $\overline{u^2}$, снимаемого с выхода ПП, имеет вид [10]

$$\overline{u^2} = k_B[4T_{TR}\mathrm{Re}Z + (K_2^2 z_2/S)(T - T_{TR})]\Delta f, \qquad (2)$$

где k_B – постоянная Больцмана, ReZ – действительная часть комплексного электрического выходного импеданса преобразователя, K_2 – модуль коэффициента преобразования давления в электрическое напряжение, z_2 – удельный акустический импеданс исследуемой среды, S – площадь ПП, Δf – полоса пропускания приемного устройства. В эту формулу в явном виде входит разность температур $T - T_{TR}$, однако этот член был введен искусственным образом.

Покажем, что формулу (2) можно получить строго, рассматривая эквивалентную электрическую схему ПП в виде шестиполюсника [17], представленную на рис. 4. Рассмотрим ПП (удельный акустический импеданс – z_{TR}), контактирующий с одной (с тыльной) стороны (разъемы "1–1") с демпфером (с акустическим импедансом $Z_1 = Sz_1$, где z_1 – удельный акустический импеданс), а с другой стороны (разъемы "2–2") – с исследуемой средой (с акустическим импедансом $Z_2 = Sz_2$). В общем случае ПП контактирует с исследуемой средой через согласующий слой (удельный акустический импеданс – z_3). На два входа ПП действуют силы F_1 и F_2, создающие давления $p_1 = F_1/S$ и $p_2 = F_2/S$, соответственно.

Как это было сделано ранее [9], все потери в ПП будем относить только за счет демпфера. В таком случае акустические элементы схемы определяются: акустическими свойствами материала ПП (четвертьволнового согласующего слоя):

$$Z'_{TR} = z_{TR}S/j\sin(\pi\lambda_{ATR}/\lambda_{TR})$$

$$(Z'_3 = z_3S/j\sin(\pi\lambda_{A3}/2\lambda_3)),$$

$$Z''_{TR} = jz_{TR}S\,\mathrm{tg}(\pi\lambda_{ATR}/2\lambda_{TR})$$

$$(Z''_3 = jz_3S\,\mathrm{tg}(\pi\lambda_{A3}/4\lambda_3)),$$

где j – мнимая единица, λ_{TR} (λ_3) и λ_{ATR} (λ_{A3}) – длины акустических волн и длина волны на антирезонансной частоте f_A в ПП (в четвертьволновом слое), а также пьезосвойствами ПП: коэффициентом трансформации $n = k_T\sqrt{2Sz_{TR}f_AC_0}$ силы в напряжение и отрицательной емкостью $-C_0/n^2$, где k_T – коэффициент электромеханической связи, C_0 – емкость ПП.

В такой схеме средний квадрат электрического напряжения на выходе ПП (разъемы "вых-вых") можно представить как сумму независимых

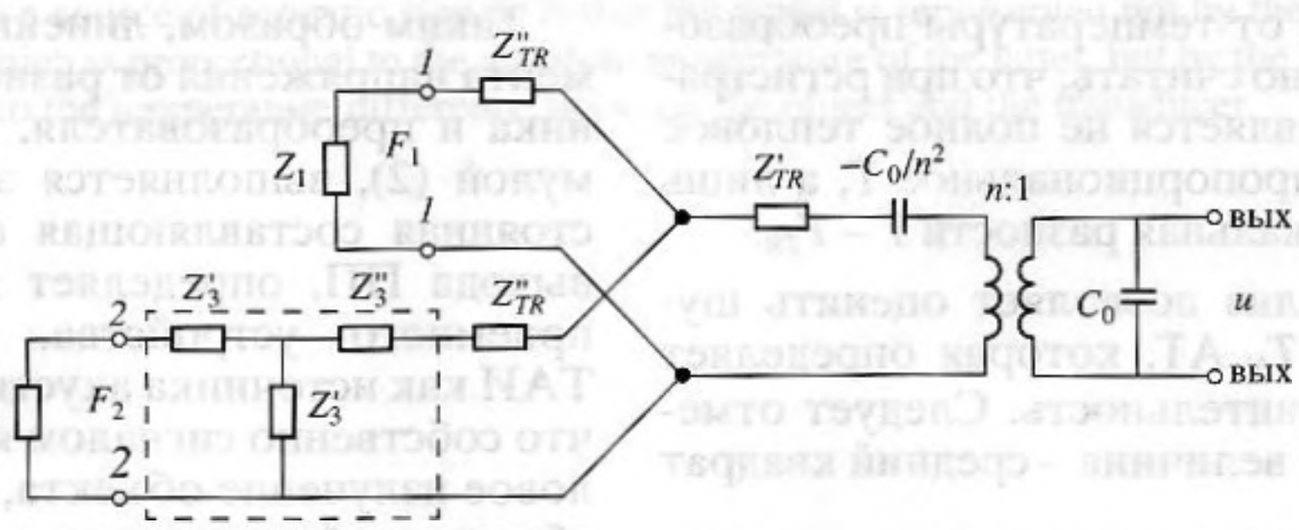

Рис. 4. Эквивалентная схема пьезопреобразователя (ПП). Пунктиром обведена схема согласующего слоя между ПП и исследуемой средой. $F_1(F_2)$ – сила, действующая на ПП со стороны демпфера (среды); u – напряжение на выходе ПП; Z'_{TR} и Z''_{TR} (Z'_3 и Z''_3) – элементы схемы, определяемые акустическими свойствами ПП (согласующего слоя); Z_1 и Z_2 – акустические сопротивления демпфера и среды, C_0 – емкость ПП, n – коэффициент трансформации силы в напряжении.

сигналов, поступающих на ПП за счет ТАИ из среды и из демпфера:

$$\overline{u^2} = k_B[(K_2^2 z_2/S)T + (K_1^2 z_1/S)T_{TR}]\Delta f, \quad (3)$$

где K_1^2 – квадрат модуля коэффициента преобразования эффективного давления в демпфере в электрическое напряжение.

Используя теорию четырехполюсников для шумовых сигналов, можно показать эквивалентность формул (2) и (3). В частности, на антирезонансной частоте для ПП без четвертьволнового слоя: $\mathrm{Re}Z = \frac{k_T^2}{\pi^2}\frac{2z_{TR}}{f_A C_0(z_1+z_2)}$, $K_1^2 = K_2^2 = \frac{k_T^2}{\pi^2}\frac{8z_{TR}S}{f_A C_0(z_1+z_2)^2}$; с четвертьволновым слоем $\mathrm{Re}Z = \frac{k_T^2}{\pi^2}\frac{2z_{TR}}{f_A C_0(z_1+z_3^2/z_2)}$, $K_1^2 = \frac{k_T^2}{\pi^2}\frac{8z_{TR}S}{f_A C_0(z_1+z_3^2/z_2)^2}$, $K_2^2 = \frac{k_T^2}{\pi^2}\frac{8z_{TR}z_3^2 S}{f_A C_0 z_2^2(z_1+z_3^2/z_2)^2}$. Большинство этих формул было получено в работах [9, 11] с использованием других эквивалентных схем ПП.

Таким образом, возможны два подхода в описании приема ТАИ. В соответствии с выражением (2) источниками являются собственные шумы ПП, вызванные как потерями в нем самом, так и потерями на излучение, а также сигнал, определяемый разностью температур объекта и ПП. При отрицательном значении этого сигнала при $T < T_{TR}$ энергия уносится от ПП. В то же время, в соответствии с выражением (3), можно считать, что сигнал, измеряемый на выходе преобразователя, создается двумя независимыми источниками. Первый из них – это ТАИ исследуемой среды, а второй – такое же излучение из демпфера. Интенсивности этих сигналов определяются абсолютными температурами этих объектов. Оба подхода эквивалентны и приводят к одинаковым расчетным соотношениям. Однако информация о существовании объекта возникает только в том случае, когда его температура отлична от температуры преобразователя. Поэтому можно считать, что при регистрации ТАИ сигналом является не полное тепловое излучение объекта, пропорциональное T, а лишь его часть, пропорциональная разности $T - T_{TR}$.

Проведенный анализ позволяет оценить шумовую температуру T_N АТ, которая определяет его пороговую чувствительность. Следует отметить, что измеряемая величина – средний квадрат напряжения $\overline{u^2}$ – практически не зависит от акустической нагрузки на ПП. Если убрать исследуемую среду, т.е. поместить ПП в воздух, а выражениях (2) и (3) исчезают вторые слагаемые, пропорциональные $T - T_{TR}$ и T, соответственно, и меняются первые слагаемые. Если мы регистрируем сигнал во всей полосе пропускания ПП, то результирующее значение $\overline{U^2}$ среднего квадрата напряжения для рассмотренного выше электрически ненагруженного ПП будет равно $\overline{U^2} = (8k_T^2/\pi^2)\, k_B T_{TR}/C_0$ [11].

Таким образом, если температуры исследуемой среды и ПП совпадают, то результирующий сигнал $\overline{U^2}$ практически не меняется при изменении исследуемой среды, например, даже при таких кардинальных изменениях, как замена воды на воздух. Этот сигнал реально определяет шумовую температуру АТ.

Выражение (2) позволяет теоретически оценить шумовую температуру $T_{N_{TR}}$ ПП. Эти оценки дали разумные результаты $T_{N_{TR}} \le 2T_{TR}$ [9, 18]. Результаты, представленные на рис. 2 и 3, позволяют экспериментально оценить шумовую температуру T_N АТ. Согласно формуле (1), это отношение постоянного члена B к крутизне преобразования A [10]:

$$T_N = B/A. \quad (4)$$

Нетрудно получить, что шумовая температура АТ с учетом шумов усилителя составляет: $T_N = 720$ K, а без учета шумов усилителя $T_{N_{TR}} \approx 600$ K. Отметим, что шумовая температура ПП приблизительно в два раза больше его термодинамической температуры, а вклад шумов усилителя составляет 17%. Эти величины ранее измеряли разными косвенными методами [9, 13, 18]. Представленные оценки совпадают с результатами, полученными нами ранее [18], и близки к результатам работы [13], полученным другим методом.

Отметим, что зависимость (1) получена для случая, когда "черное" тело заполняет всю апертуру ПП. Уменьшение размера теплового источника приводит только к уменьшению крутизны преобразования A.

Таким образом, линейная зависимость инкремента напряжения от разности температур источника и преобразователя, предсказываемая формулой (2), выполняется экспериментально. Постоянная составляющая сигнала, снимаемого с выхода ПП, определяет шумовую температуру приемного устройства. Главная особенность ТАИ как источника акустических сигналов в том, что собственно сигналом является не полное тепловое излучение объекта, пропорциональное его абсолютной температуре T, а лишь его часть, пропорциональная разности температур объекта и преобразователя $T - T_{TR}$.

Работа поддержана грантом РФФИ № 00-02-16370.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кротов Е.В., Ксенофонтов С.Ю., Мансфельд А.Д., Рейман А.М., Санин А.Г., Прудников М.Б.* Экспериментальные исследования возможностей многоканальной акустической термотомографии // Изв. ВУЗов РАДИОФИЗИКА. 1999. Т. XLII. № 5. С. 479–484.
2. *Буров В.А., Касаткина Е.Е.* Статистические обратные волновые задачи термоакустической томографии // Акуст. журн. 1997. Т. 43. № 2. С. 162–169.
3. *Chmill A.I., Gerasimov V.V., Guluaev Yu.V., Mirgorodsky V.I., Peshin S.V.* Experimental investigations of the correlation tomography space resolution // Acoustical Imaging-23, S. Lees ed. New York: Plenum Press, 1997. P. 77–86.
4. *Kruger R.A., Reinecke D.R., Kruger G.A.* Thermoacoustic computed tomography – technical consideration // Med. Phys. 1999. V. 26. P. 1832–1837.
5. *Пасечник В.И., Аносов А.А., Бограчев К.М.* Основы и перспективы пассивной термоакустической томографии // Биомедицинская радиоэлектроника, 1999. № 2. С.3–26.
6. *Бограчев К.М., Пасечник В.И.* Оценки точности восстановления температуры в пассивной термоакустической томографии // Акуст. журн. 1999. Т. 45. № 6, С. 742–752.
7. *Passechnik V.I., A.A. Anosov, Bograchev K.M.* Passive Thermoacoustic Tomography – A New Kind of Acoustic Imaging for Material Testing and Medicine // J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 105. № 2. P. 1209.
8. *Brian Fowlkes.* Hot topics in medical acoustics // J. Acoust. Soc. Amer. V. 101. № 5. P. 3120.
9. *Пасечник В.И.* Оценка чувствительности метода акустотермографии // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 4. С. 718–724.
10. *Пасечник В.И.* Оценка пороговой чувствительности акустотермометров // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 1. С. 140–143.
11. *Аносов А.А., Пасечник В.И.* Сравнение чувствительности акустотермометров различных типов // Акуст. журн. 1993. Т. 39. № 2. С. 207–212.
12. *Passechnik V.I.* Verification of the physical basis of acoustothermography // Ultrasonics. 1994. V. 32. P. 293–299.
13. *Герасимов В.В., Миргородский В.И., Пешин С.В.* О возможности достижения близких к предельным параметров акустотермометров // ЖТФ. Т. 65. № 5. 1995. С. 149–155.
14. *Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И.* Введение в статистическую радиофизику. Ч. II. Случайные поля. М.: Наука. Гл. редакция физ.-мат. лит., 1978. 463 с.
15. *Аносов А.А., Антонов М.А., Пасечник В.И.* Измерение корреляционных свойств теплового акустического излучения // Акуст. журн. Т. 45. 2000. № 1. С. 28–34.
16. *Миргородский В.И., Пасечник В.И., Пешин С.В., Рубцов А.А., Годик Э.Э., Гуляев Ю.В.* Зондирование внутренней температуры объектов по их тепловому акустическому излучению // Докл. АН СССР. 1987. Т. 297. № 6. С. 1370–1374.
17. *Домаркас В.И., Кажис Р.-И.Ю.* Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1975. С. 48–69.
18. *Аносов А.А., Ерофеев А.В., Пасечник В.И.* Тепловые шумы и измерение характеристик пьезопреобразователей / IV сессия Российского акустического общества. Акустические измерения. Методы и средства. М., 1995. С. 32–34.

Characteristics of Thermal Acoustic Radiation as a Source of Acoustic Signals

A. A. Anosov and V. I. Pasechnik

Abstract—A linear dependence of the output voltage of an acoustic thermometer on the temperature difference between the source and the piezoelectric transducer is demonstrated experimentally. The constant component of the output voltage determines the noise temperature of the receiving device. The main feature of the thermal acoustic radiation as a source of acoustic signals is that the signal is represented not by the total thermal radiation of the object, which is proportional to the absolute temperature of the latter, but by the part of this radiation that is proportional to the temperature difference between the object and the transducer.