АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Том 36 1990 Вып. 4

УДК 534.8

© 1990 г.

В. И. Пасечник

ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА АКУСТОТЕРМОГРАФИИ

Проведена оценка чувствительности метода акустотермографии для реальной конструкции акустотермометра (АТ) и экспериментальная проверка влияния затухания ультразвука в образце на измеряемую акустояркостную температуру T_A. На модельных системах – касторовом масле, глицерине и свином сале – проверена справедливость соотношения, связывающего T_A с разностью температуры измеряемого объекта относительно окружающей среды.

Метод акустотермографии предназначен для определения глубинной температуры биологических объектов и основан на регистрации их теплового акустического излучения [1, 2]. Чувствительность метода θ – среднеквадратичная ошибка измерения температуры – должна зависеть от параметров акустотермометра (АТ), геометрии и свойств среды [3–5]. В настоящей работе поставлена задача исследовать основные характеристики акустотермографии биообъектов, используя модельные системы.

Физической причиной акустического теплового излучения из биообъектов является тепловое хаотическое движение его атомов и молекул. Регистрируемый на поверхности тела средний квадрат акустического давления $\overline{p^2}$ пропорционален абсолютной температуре T среды. В случае неоднородных сред величина $\overline{p^2}$ определяется геометрией тела и распределением термодинамической температуры $T(X)$ [1, 3]. Поэтому из регистрируемой величины $\overline{p^2}$ рассчитывается эффективный параметр среды – акустояркостная температура T_A, которую можно определить как температуру «черного» тела, создающего такой же поток теплового акустического излучения, как и исследуемое тело. Для расчета T_A в работе [5] предложено использовать метод, развитый в радиометрии [6], согласно которому величина яркостной температуры определяется величиной потерь вспомогательной волны по трассе ее распространения и распределением температуры в этой среде. Расстояние dX дает вклад: $dT_A(X)=\gamma(X)T(X)I(X)dX$, где $I(X)$ – интенсивность волны в точке X, $\gamma(X)$ – коэффициент поглощения (по энергии). Для дальнейшего рассмотрим два важных частных случая [3, 5]. Если в однородной среде с температурой T_0 на глубине L находится слой толщиной H, нагретый относительно окружающей среды на температуру ΔT (инкремент температуры), то инкремент (изменение) акустояркостной температуры равен

$$\Delta T_A \approx \Delta T(1-|R|^2)\exp(-\gamma_1 L)(1-\exp(-\gamma H)), \tag{1}$$

где γ – коэффициент поглощения слоя, R – коэффициент отражения от него. При малом поглощении ультразвука в среде ($\gamma_1=0$) инкремент ΔT_A возрастает с выходом на асимптотическое значение $\Delta T(1-|R|^2)$ по мере того, как все большая часть энергии волны поглощается в слое – растет «чернота» K или акустическая плотность слоя γH:

$$\Delta T_A = K\Delta T = \Delta T(1-|R|^2)(1-\exp(-\gamma H)). \tag{2}$$

В качестве другого примера рассмотрим расположенное за нагретым слоем в непоглощающей среде зеркало с коэффициентом отражения $R_M \sim 1$. В рамках изложенного выше подхода вспомогательная волна дважды про-

ходит сквозь слой, соответственно ΔT_A возрастает. Пренебрегая отражениями на границе слой — среда ($R=0$), можно выразить нормированный инкремент яркостной температуры $\Delta T_{AM}/\Delta T$ в присутствии зеркала через таковой без зеркала ($\Delta T_{AO}/\Delta T$) (см. (2)):

$$\Delta T_{AM}/\Delta T=(\Delta T_{AO}/\Delta T)\,[1+|R_M|^2[1-(\Delta T_{AO}/\Delta T)]]. \qquad (3)$$

Из (3) следует, что относительный инкремент больше, если мал нормированный инкремент собственной яркостной температуры слоя.

Чувствительность θ — среднеквадратичную ошибку измерения акустояркостной температуры — для многоканального модуляционного матричного AT из $m\bigstar m$ элементов оценивают по формуле [4]:

$$\theta=(\varkappa T_0/m)\sqrt{(2/\Delta f\tau)}, \qquad (4)$$

где T_0 — средняя термодинамическая температура объекта (около 300 К), Δf — ширина полосы пропускания устройства по высокой частоте, τ — постоянная времени AT по низкой частоте, $\varkappa$ — скважность модуляции. Выражение (4) требует уточнения, чтобы учесть собственные шумы установки и ее реальные частотные характеристики.

В отличие от метода, использующего расчет флуктуаций в среде [1, 3, 5], используем подход, оценивающий шумы преобразователя [7]. Средний квадрат шумового электрического напряжения на выходе преобразователя $\overline{u^2}$ определяется по формуле Найквиста: $\overline{u^2}=4k_bT\,\mathrm{Re}\,Z_\Sigma\Delta f$, где k_b — постоянная Больцмана, $\mathrm{Re}\,Z_\Sigma$ — действительная часть полного выходного импеданса $Z_\Sigma=\mathrm{Re}\,Z_\Sigma+j\,\mathrm{Im}\,Z_\Sigma$ пьезопреобразователя, соединенного с электрической нагрузкой. В величину Z_Σ дают вклад исследуемые шумы объекта, а также собственные шумы пьезопреобразователя и демпфера. Для определенности при расчете все тепловые шумы отнесем к демпферу. Поскольку шумовые температуры объекта и демпфера отличаются мало, то для оценки шумов их можно считать равными. Для расчета величины θ рассмотрим конкретную схему: полуволновой пьезопреобразователь, совершающий колебания по толщине, который нагружен на индуктивность M, причем антирезонансная частота f_0 удовлетворяет соотношению: $f_0=1/2\pi\sqrt{MC_0}$, где C_0 — емкость зажатой пьезопластинки [7]. Волновое акустическое сопротивление материала пьезопреобразователя — z_0, демпфера — z_1, исследуемой среды — z_2. Электрический импеданс преобразователя [7]:

$$Z\cong X_C\{-j/X+(2k_t^2/\pi X^2)\,[-2\,\mathrm{tg}^2(\pi X/2)+$$
$$+j(k_1+k_2)\,\mathrm{tg}(\pi X/2)]/[(k_1+k_2)(1-\mathrm{tg}^2(\pi X/2))+2j\,\mathrm{tg}(\pi X/2)]\}, \qquad (5)$$

где X_C — емкостное сопротивление зажатой пьезопластинки на антирезонансной частоте, $X=f/f_0$ — относительное значение частоты, k_t — коэффициент электромеханической связи. Величины $k_1=z_1/z_0$, $k_2=z_2/z_0$. Действительная часть полного импеданса входной цепи $\mathrm{Re}\,Z_\Sigma=X_m^2\,\mathrm{Re}\,Z/[(\mathrm{Re}\,Z)^2+(\mathrm{Im}\,Z+X_m)^2]$, где X_m — индуктивное сопротивление индуктивности (при $X=1$ $X_m=X_C$). Используя (5), несложно вывести необходимые соотношения. Для описываемой схемы величина $\mathrm{Re}\,Z_\Sigma$ и спектр шумов соответственно имеют два максимума, расстояние между которыми $f_1-f_2=f_0(2\sqrt{2}/\pi)k_t$, а ширина каждого, оцененная по основанию, составляет $\Delta f=2f_0(k_1+k_2)/\pi$. Выполнив несложные преобразования, легко получить, что максимальному значению шума соответствует значение $\mathrm{Re}\,Z_\Sigma=X_C\pi/2(k_1+k_2)$, т. е. средний квадрат электрического шума: $\overline{u}^2=[2\pi X_Ck_b\Delta f/k_2(1+k_1/k_2)]\,T_0$. Из этого выражения следует, что при наличии потерь и без них один и тот же пороговый прирост значения $\overline{\Delta u^2}$ происходит при разных приростах абсолютной температуры ΔT. Если задаться пороговым значением $\overline{\Delta u^2}$, определяемым величиной ΔT, равной значению чувствительности θ для АТ без потерь, то при наличии потерь ($k_1\neq0$) необходимо в $(1+k_1/k_2)$ раз увеличить величину θ, чтобы получить то же приращение сигнала на выходе преобразователя. Другими словами, из-за потерь чувствительность АТ уменьшается и в выражении (4) возникает допол-

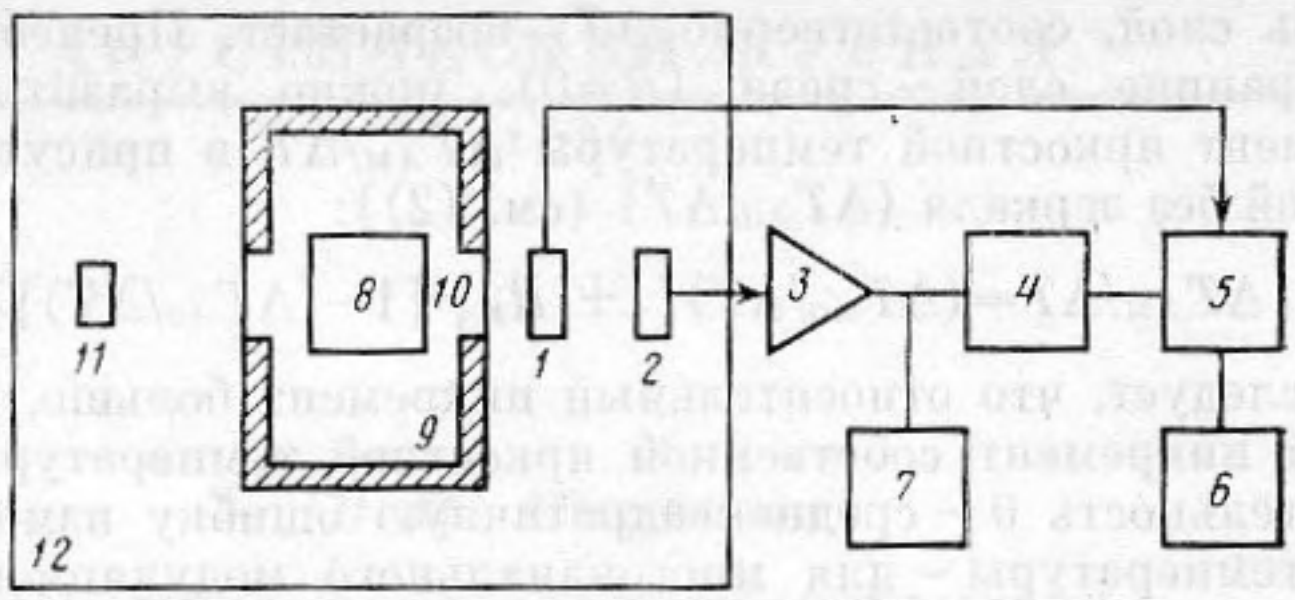

Рис. 1. Блок-схема акустотермометрической установки

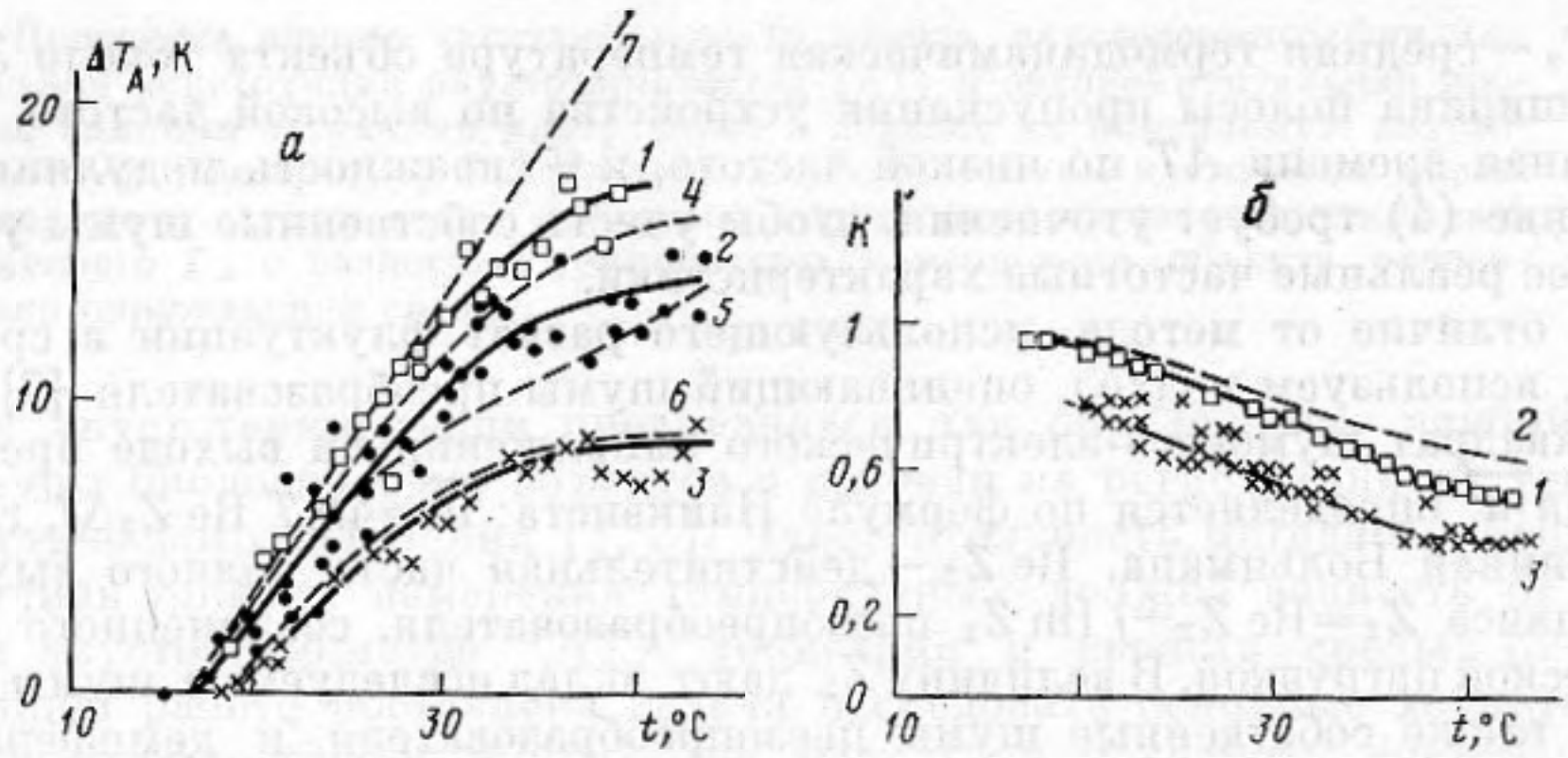

Рис. 2. Зависимость инкремента акустояркостной температуры ΔT_A и черноты K образцов от их температуры $t°$. *а* – ΔT_A, *1* – касторовое масло, толщина слоя H=4,5 см; *2* – то же, H=3 см; *3* – глицерин, H=4,5 см; *4*, *5* – расчетные зависимости $\Delta T_A(t°)$, построенные по данным рис. 2, *б* для кривых *1–3* соответственно; *7* – теоретическая кривая для «черного» тела. *б* – K, *1* – касторовое масло, H=4,5 см; *2* – то же, что и *1*, с коррекцией на затухание; *3* – глицерин, H=4,5 см

нительный множитель. Как следует из выражения для $\mathrm{Re}\, Z_\Sigma$, отношение k_1/k_2 несложно измерить экспериментально по отношению максимальных мощностей электрического шума преобразователя для случая нагрузки на среду $(\overline{u^2})$ и холостого хода $(\overline{u_0^2})$: $k_1/k_2=[(\overline{u_0^2}/\overline{u^2})-1]^{-1}$.

Выражение (4) можно уточнить за счет более корректного учета особенностей высоко- и низкочастотной части схемы. Для АТ, состоящего из модулятора, приемника, высокочастотного усилителя, квадратичного детектора и усилителя низкой частоты, можно использовать теорию радиометров [8], в которой чувствительность $\theta=\varkappa T\sqrt{2/Q}$ – где Q – фактор сглаживания

$$Q=\int_0^\infty S_H\,df\Big/\left[\int_0^\infty S_H^2\,df\int_0^\infty S_L\,df\right]^{1/2}. \qquad (6)$$

Здесь $S_H(f)$ и $S_L(f)$ – нормированные на единицу квадраты модуля коэффициента передачи приемного тракта соответственно на высокой и низкой частотах. Конкретный вид формы частотной характеристики $S_H(f)$ сравнительно слабо влияет на величину Q. Например, для двух ее предельных случаев: в виде прямоугольника или треугольника с равными основаниями значения Q соотносятся как 1 : 0,87. Учет существования двух максимумов в частотной характеристике увеличивает Q в $\sqrt{2}$ раз; если амплитуды обоих максимумов различаются, но площади под ними одинаковы, поправочный множитель изменится не сильно: от 1,4 до 1,63. Поэтому при оценке полосы пропускания АТ на высоких частотах с достаточной точностью можно аппроксимировать характеристику прямоугольниками или

треугольниками и определять Δf как сумму длин их оснований. Для рассчитываемой входной цепи $\Delta f=4f_0(k_1+k_2)/\pi$.

В области низких частот коэффициент передачи тракта можно аппроксимировать RC цепочкой с постоянной времени τ: $S_L=[1+(2\pi f\tau)^2]^{-1}$; тогда $Q=\sqrt{4\Delta f\tau}$ и вместо (4) получим $\theta=\varkappa(1+k_1/k_2)T_0\sqrt{1/2\Delta f\tau}$ или, выражая Δf через (k_1+k_2), окончательно:

$$\theta=\varkappa T_0\sqrt{1+k_1/k_2}\sqrt{(\pi/8f_0k_2\tau}. \qquad (7)$$

Для проверки соотношений (2), (3) была собрана экспериментальная установка (рис. 1). Схема АТ была близка к традиционной [2] и включала механический модулятор *1*, приемник — пьезокерамический преобразователь марки ЦТС-19-2 (антирезонансная частота 2 МГц), нагруженный на индуктивность M, усилители высокой частоты *3* (усилитель для ВЧ-сквида разработки НЭТИ, высокочастотные усилители УЗ-33 и УЗ-28, соединенные последовательно), квадратичный детектор *4*, синхронный детектор *5* (Unipan 232B), самописец ПДП-4 с внешней временной разверткой, анализатор спектра *7* типа С4-25. Исследуемый объект помещали в кювету *8* с акустически прозрачными передним и задним окнами (лавсановая пленка), которая была помещена в термостате *9* из пенопласта с акустически прозрачными окнами *10*. Для контроля затухания в образце использовали дополнительный излучатель *11*. Приемник, излучатель, модулятор и термостат помещали в ванну *12* размером 49×28×30 см, заполненную водой. Температуру воды в кювете измеряли с погрешностью 0,3 К, жидкости в кювете перемешивали.

Тепловое акустическое излучение от исследуемого объекта модулируется с частотой 10 Гц (глубина модуляции 100%, скважность 2), при этом в течение одного полупериода модуляции оно принимается приемником, а в течение второго полупериода — принимается отраженное от модулятора тепловое излучение ванны, температура в которой t° составляла 15—20° С. Сигнал с приемника усиливали по высокой частоте, детектировали квадратичным детектором, затем подавали на синхронный детектор, опорный канал которого управляли сигналом с модулятора. С выхода последнего после фильтра низких частот на самописце регистрируется сигнал, пропорциональный разности абсолютных акустических температур объекта и ванны. При измерении затухания в образце излучатель *11* возбуждали электрическим напряжением, подаваемым либо с генератора Г4-102 (синусоидальное напряжение), либо с генератора Г6-27 (импульсное напряжение). При измерениях импульсным методом регистрировали либо амплитуду прошедшего через объект сигнала на осциллографе С1-69, либо спектр мощности этого сигнала на анализаторе С4-25; при измерениях непрерывным методом регистрировали сигнал с выхода синхронного детектора.

Прежде всего оценим с помощью (7) чувствительность АТ. При модуляции меандром $\varkappa=2$, $T=300$ К, $\tau=30$ с и определенных экспериментально значениях $1+k_1/k_2=6$ и $\Delta f=0{,}7$ МГц (измерения по основанию пиков частотной характеристики) полная ширина шумовой дорожки 6θ составляет 3,3 К, что соответствует экспериментальным 2,5—3 К.

Для проверки соотношения (2) мы измерили зависимость инкремента акустояркостной температуры ΔT_A образца от инкремента его термодинамической температуры ΔT, для чего на рис. 2, *а* построили зависимость ΔT_A от температуры образца t°. Значение ΔT_A обращается в нуль, когда температуры образца и резервуара сравниваются, т. е. значение ΔT надо отсчитывать от этой точки. Исследовали ΔT_A глицерина либо касторового масла, обладающих сильной температурной зависимостью величины γ, что позволяет в широких пределах менять акустическую плотность образца, не меняя геометрии кюветы. Толстый слой касторового масла (4,5 см) обеспечивает температурную зависимость ΔT_A (*1* рис. 2), близкую к таковой для «черного тела» — *7*. Утоньшение слоя до 3 см уменьшает ΔT_A — *2*. Еще меньше величина ΔT_A для слоя глицерина толщиной 4,5 — *3*. Для всех кривых характерно замедление роста величины ΔT_A с увеличением t°.

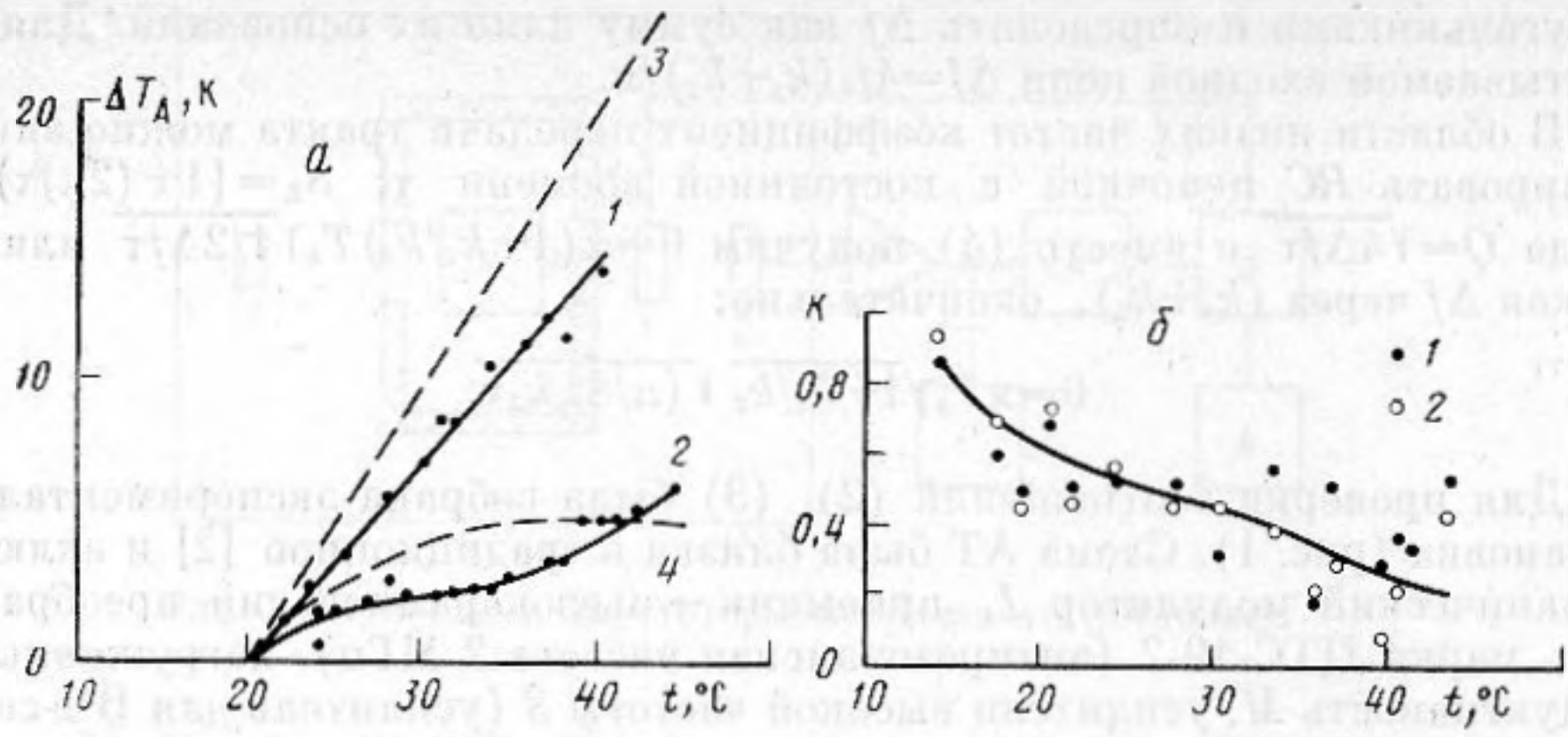

Рис. 3а, б

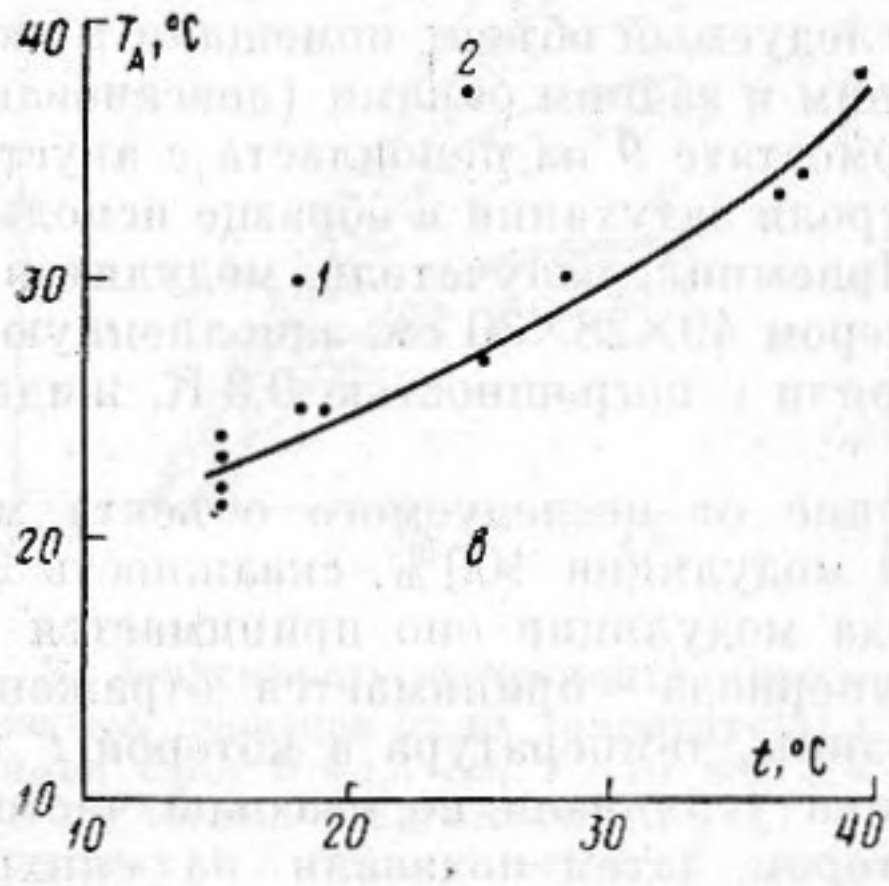

Рис. 3г

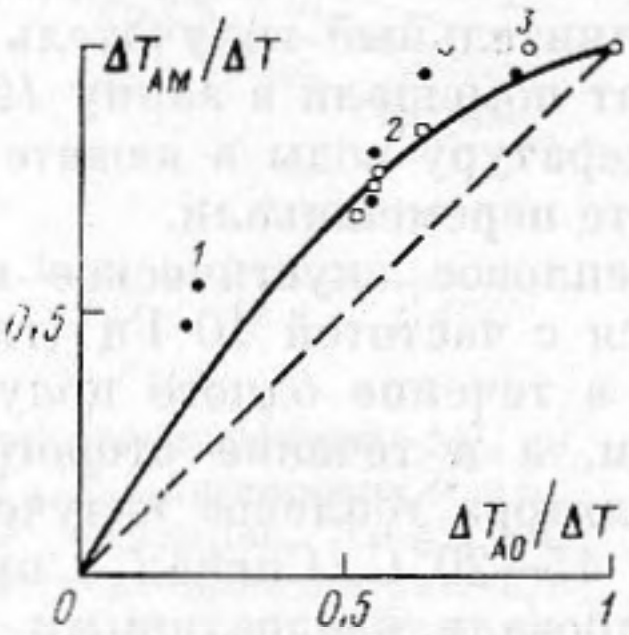

Рис. 4

Рис. 3. Акустояркостная температура биообъектов. *а*, *б* – зависимость ΔT_A и K двух образцов свиного сала от их температуры $t°$. *а* – ΔT, *1* – сало, покрытое кожей; *2* – то же без кожи, толщина $H=1{,}5$ см; *3* – ΔT_A «черного» тела; *4* – расчетная кривая, построенная по зависимости K от $t°$ (рис. 3, *б*). *б* – K измерения на двух частотах: *1* – 1,6, *2* – 2,2 МГц. *в* – зависимость глубинной температуры ладони человека T_A от температуры воды $t°$; *1* и *2* – значения, полученные после предварительных физических упражнений *1* или прогрева *2*

Рис. 4. Увеличение инкремента акустояркостной температуры образца при помещении за ним алюминиевого зеркала. Величины ΔT_{AM} и ΔT_{AO} отнесены к инкременту термодинамической температуры ΔT. *1* – мышечная ткань, *2* – пластилин, *3* – свиное сало. Кривая построена по уравнению (3), прямая соответствует случаю $\Delta T_{AM}=\Delta T_{AO}$

Чтобы проверить соотношение (2) количественно, измерили независимо «черноту» слоя K, а затем по известным значениям ΔT и K построили расчетную зависимость ΔT_A от $t°$. Величину K определяли по отношению P квадратов амплитуд прошедшей и падающей волн: $P=(1-|R|^2)^2\times\exp(-\gamma H)$ соответственно $K=(1-|R|^2)\,[1-P/(1-|R|^2)^2]$. Для касторового масла $|R|\cong 0$, для глицерина, учитывая величину его волнового акустического сопротивления, $|R|^2=0{,}05$. Как показали измерения импульсным методом, для слоя касторового масла толщиной 4,5 см (рис. 2, *б*, кривая *1*) величина K существенно выше, чем для такого же слоя глицерина – *3*. С увеличением температуры «чернота» существенно падает, что и объясняет замедление роста кривой ΔT_A с увеличением $t°$. При измерениях затухания непрерывным методом у касторового масла обнаружено большее затухание на высокочастотном пике частотной характеристики приемника, нежели на низкочастотном, на котором в основном проводятся измерения импульсным способом, поэтому мы скорректировали кривую *1*, чтобы

учесть этот эффект при расчете ΔT_A (кривая *2*). Используя кривые *2*, *3*, а также измеренную зависимость $\gamma(t^\circ)$ для слоя касторового масла толщиной 3 см, построили расчетные зависимости $\Delta T_A(t^\circ)$ (*4–6* на рис. 2, *а*) — они хорошо совпали с экспериментом.

Принципиальным при измерениях ΔT_A является калибровка установки. Соответствующее «черное» тело можно реализовать, либо используя тело с большой величиной γ (см. (2)), либо как в оптике реализовать условие, чтобы попавшая внутрь него волна, многократно отражаясь от стенок, не могла выйти из него наружу. Первый вариант реализовали с помощью пластилиновой пластины толщиной 1,3 см (величина $\gamma=5$ 1/см), поправка на отражение составляла около 5%. Мы обнаружили, что величина ΔT_A, создаваемая этим «черным» телом, возрастает по мере удаления от входного окна термостата — это, по-видимому, связано с процессами рассеяния. Второй вариант «черного» тела осуществляли с помощью алюминиевой пластинки толщиной 2,5 мм, повернутой в термостате под углом 45° к оси звукового пучка — в этом случае температура ΔT_A была не ниже, чем при калибровке первым способом.

Связь между инкрементами ΔT_A и ΔT реализуется и на биообъектах. Аналогично рис. 2, на рис. 3, *а* представлена зависимость $\Delta T_A(t^\circ)$ для двух образцов свиного сала, отличающихся затуханием ультразвука. Сало, покрытое кожей, с очень большим затуханием дает зависимость (*1*), аналогичную «черному» телу (*3*), у образца с малым затуханием величина ΔT_A (*2*) существенно ниже. «Чернота» этого образца K мала и с точностью до разброса экспериментальных данных не зависит от частоты рис. 3, *б* (значения для частот 2,2 и 1,6 МГц показаны разными символами). Построенная по этой кривой зависимость $\Delta T_A(t^\circ)$ (*4* на рис. 3, *а*) качественно совпадает с экспериментальной (*2*). Различия мы относим за счет изменений свойств образцов при циклическом нагреве при измерениях, а также рассеяния.

Итак, выражение (2) дает правильную связь акустояркостной и термодинамических температур для разных объектов. Это позволяет использовать метод для измерения глубинной температуры человека и животных. На рис. 3, *в* приведена зависимость акустояркостной температуры T_A руки человека от температуры t° воды, в которую она опущена на время 1 мин. Видна корреляция T_A с температурой воды, отличная, естественно, от выражения (2), а также с физиологическим состоянием испытуемого: предварительные упражнения (*1*) или прогрев ладони при температуре 39° С (*2*) ее увеличивают.

Для проверки предсказаний теории о влиянии зеркала на T_A (3) на рис. 4 представлена зависимость нормированных инкрементов акустояркостной температуры в присутствии зеркала $\Delta T_{AM}/\Delta T$ от таковых в его отсутствие $\Delta T_{A0}/\Delta T$ для образцов из пластилина (*1*), мышечной ткани (*2*), сала (*3*). Теоретическая кривая рассчитана по формуле (3) для $|R|^2=0{,}83$. Во всех случаях наблюдалось увеличение ΔT_A, причем относительный эффект зеркала максимален для слоев с малой «чернотой». Отклонение точек вверх от теоретической кривой мы связываем с тем, что зеркало непараллельно приемнику: при этом в приемник попадают также потоки акустического излучения от стенок термостата, которые поднимают ΔT_A до его температуры. Для проверки специально поворачивали зеркало на большие углы и надежно регистрировали этот эффект.

В заключение отметим, что АТ регистрирует весьма малые давления в ультразвуковой волне, которые можно оценить по формуле [7]: $\Delta p = \sqrt{k_b T \Delta f z_2 / A}\,(\theta/2T_0)$, где A — площадь преобразователя. Значения $\Delta p \sim 10^{-5}$ Па при $\theta=0{,}5$ К.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабий В. И.* Перенос акустической энергии в поглощающей и излучающей среде // Мор. гидрофиз. исслед. 1974. № 2(65). С. 189–192.
2. *Миргородский В. И., Пасечник В. И., Пешин С. В. и др.* Зондирование внутренней температуры объектов по их тепловому акустическому излучению // Докл. АН СССР. 1987. Т. 297. № 6. С. 1370–1374.

3. *Bowen T.* Acoustic passive remote temperature sensing // Acoustic imaging. 1982. P. 549–561.
4. *Гуляев Ю. В., Годик Э. Э., Дементиенко В. В., Пасечник В. И. и др.* О возможностях акустотермографии биологических объектов // Докл. АН СССР. 1985. Т. 283. № 6. С. 1495–1499.
5. *Пасечник В. И.* Механизмы формирования акустояркостной температуры // Тез. Всесоюз. симпоз. «Применение ультразвука в промышленности и медицине». Вильнюс 8–10 апреля 1987 г. Каунас: КПИ, 1987. С. 88–89.
6. *Богородский В. В., Козлов А. И.* Микроволновая радиометрия земных покровов // Л.: Гидрометеоиздат, 1985. 272 с.
7. *Домаркас В. И., Кажис Р.-И. Ю.* Контрольно-измерительные пьезоэлектрические преобразователи. Вильнюс: Минтис, 1975. 255 с.
8. *Рытов С. М.* Введение в статистическую радиофизику. Ч. 1. М.: Наука, 1976. 494 с.

Институт радиотехники и электроники
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
20.03.89

V. I. Pasechnik

ESTIMATION OF SENSITIVITY OF AN ACOUSTOTHERMOGRAPHY METHOD

A theoretical estimation of sensitivity of an acoustothermorgaphy method is performed for the practical construction of an acoustothermograph (AT) and an experimental verification of ultrasound attenuation influence on a measured value of an acoustobrightness temperature T_A is conducted. AT sensitivity threshold depends on a bandwidth of highfrequency and lowfrequency amplifiers and transducer losses. Using model systems – castor oil, glycerin and pig fat – the theoretical relation connecting T_A and a temperature difference between a measured pattern and an external medium is confirmed.