АКУСТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 1998, том 44, № 6, с. 725–730

УДК 534.8

ПАССИВНАЯ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКАЯ ТОМОГРАФИЯ КИСТИ РУКИ ЧЕЛОВЕКА

© 1998 г. А. А. Аносов, К. М. Бограчев, В. И. Пасечник

НИЦ электронных диагностических систем "Элдис", РАН
Институт радиотехники и электроники РАН
101000 Москва, Старосадский пер., 8

Поступила в редакцию 27.11.97 г.

Впервые методом пассивной термоакустической томографии восстановлен в виде кубической параболы профиль внутренней температуры кисти руки человека, погруженной в аквариум с водой. Тепловое акустическое излучение кисти регистрировалось с тыльной стороны и со стороны ладони под разными углами. Погрешность восстановления не превышает 0.5 К.

Информация о распределении внутренней температуры человека имеет большое значение во многих областях медицины. Для измерения внутренней температуры биообъектов в настоящее время разрабатывается метод акустотермографии, основанный на регистрации собственного теплового акустического излучения биообъектов в мегагерцовом диапазоне [1–5]. Измеряемой величиной является так называемая акустояркостная температура – температура акустического черного тела, тепловое излучение которого равно тепловому излучению исследуемого объекта. В настоящее время с целью восстановления распределения внутренней температуры развивается метод пассивной термоакустической томографии (предварительные результаты представлены ранее в [6]). Для восстановления необходимо получить набор акустояркостных температур τ объекта либо путем измерения τ на различных частотах (мультиспектральное зондирование [2]), либо при разных ориентациях датчиков относительно объекта.

Возможности метода, использующего сканирование объекта, рассмотрены теоретически [7–9] и экспериментально на макетном образце [10, 11]. Измерения теплового акустического излучения различных частей человеческого тела проводились и ранее: изучали кисть руки [2, 4, 5], икроножную мышцу [12] человека. Однако во всех указанных экспериментах на ставилась задача восстановления распределения внутренней температуры рассматриваемой части тела. Для решения такой задачи удачный объект – это рука человека, так как ее акустояркостную температуру можно измерять с двух разных сторон, что, как показано ранее [8], повышает точность восстановления глубинной температуры.

Проведенные ранее эксперименты [13] не выявили сильной частотной зависимости мощности теплового излучения кисти руки человека, и это не позволяет использовать мультиспектральное зондирование для восстановления распределения температуры.

В данной работе поставлена задача восстановить профиль внутренней температуры кисти руки человека по измеренному под разными углами тепловому акустическому излучению со стороны ладони и с тыльной стороны кисти.

В эксперименте использовалась установка, аналогичная рассмотренной в [4, 5] (рис. 1). Пьезопреобразователем (ПП) *1* (полоса пропускания 1.7–2.5 МГц) регистрировалась мощность собственного теплового акустического излучения выделенного на рис. 1 участка *2* кисти *3*, опущенной в аквариум с водой *4*. Выбор выделенного участка вызван тем, что в нем нет костной ткани. При измерениях использовалась схема модуляционного акустотермометра (АТ) *5*, ранее детально разобранная в работах [4, 5]. Выходной сигнал, пропорциональный разности акустояркостных температур исследуемого объекта и аквариума $\Delta\tau$, с выхода фильтра низких частот (ФНЧ) *6* (*RC*-цепочка, постоянная интегрирования 3 с) через плату сопряжения фиксировался на компьютере (PC-XT) *7* через каждые три секунды.

Для калибровки сигнала в градусах Кельвина регистрировалась акустояркостная температура помещенного в аквариум акустического черного

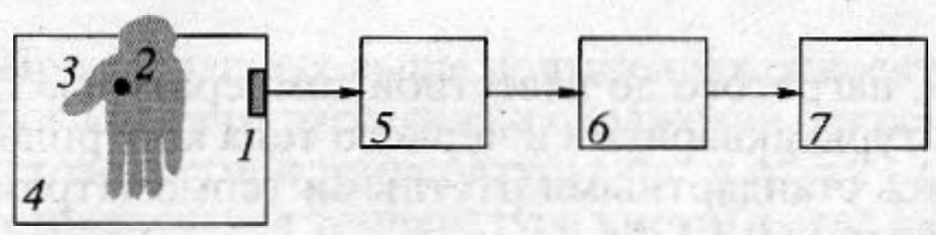

Рис. 1. Схема измерительной установки. *1* – пьезопреобразователь, *2* – исследуемая область кисти руки испытуемого, *3* – кисть руки испытуемого, *4* – аквариум с водой, *5* – акустотермометр, *6* – фильтр низких частот, *7* – компьютер.

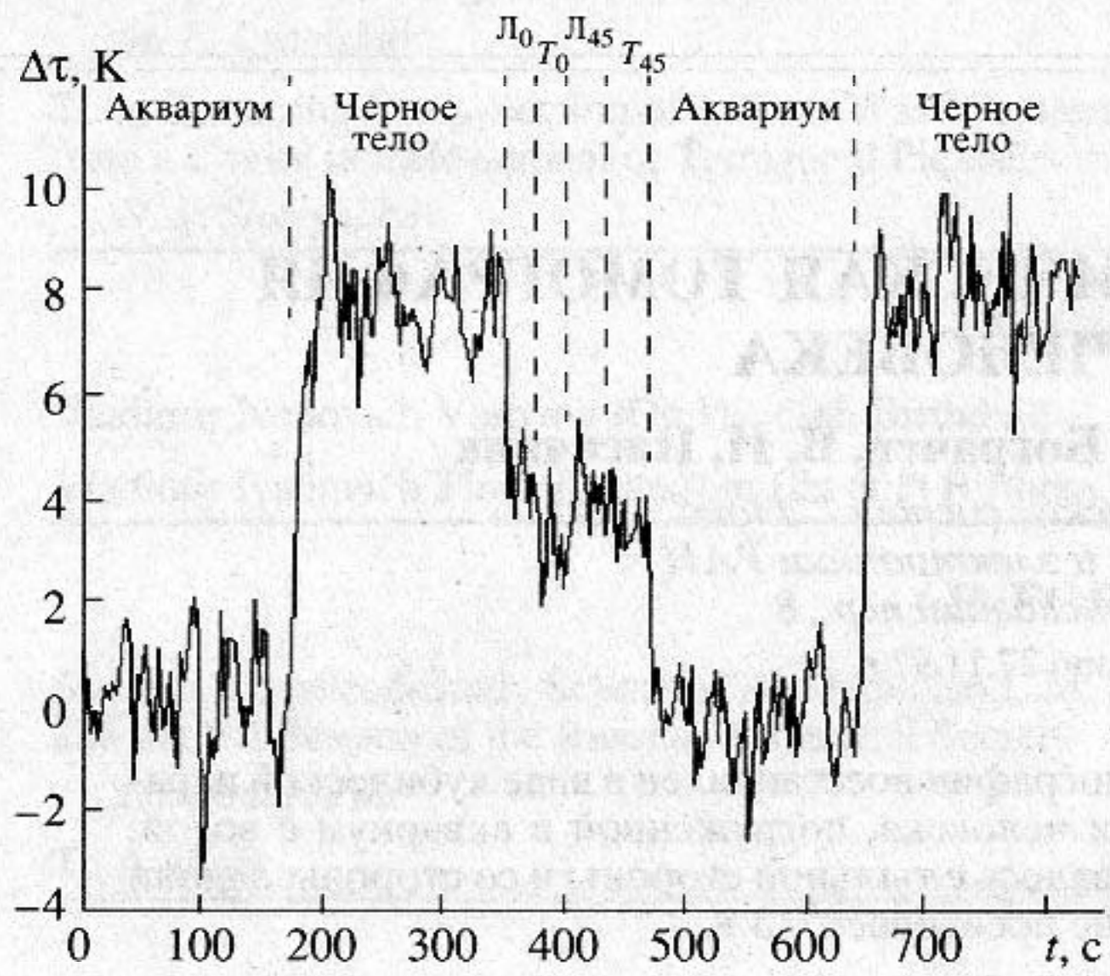

Рис. 2. Экспериментальная запись временнóй зависимости инкремента акустояркостной температуры $\Delta\tau$ аквариума с водой, черного тела и кисти руки испытуемого, повернутой к ПП ладонью ($Л_0$), либо тыльной стороной (T_0) параллельными поверхности датчика, либо ладонью (тыльной стороной) под углом 45° к оси ПП–$Л_{45}(T_{45})$.

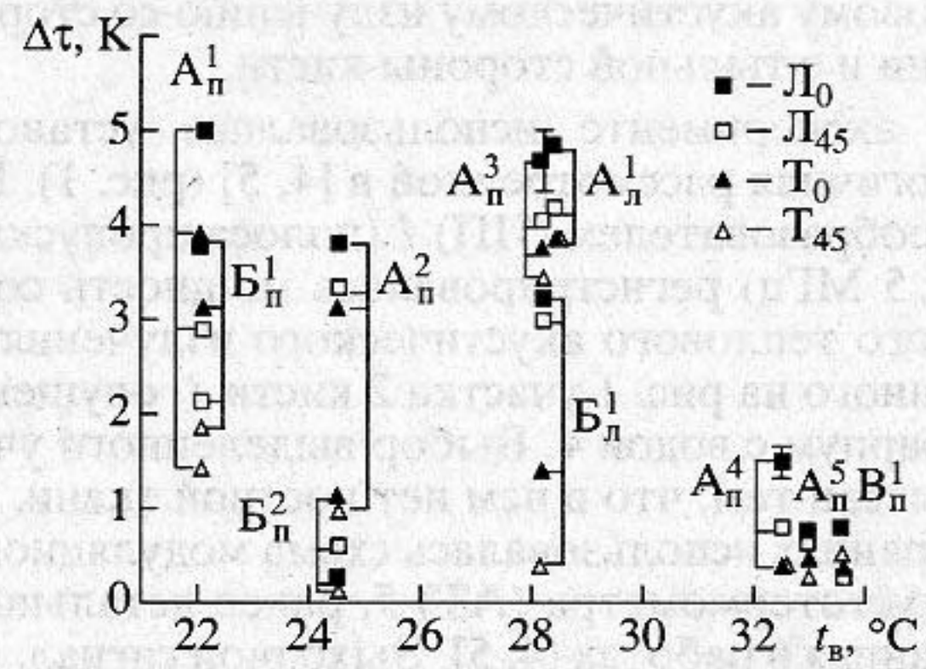

Рис. 3. Зависимость от температуры аквариума $t_в$ инкрементов акустояркостных температур $\Delta\tau$ ладони ($Л_0$ и $Л_{45}$) и тыльной стороны кисти (T_0 и T_{45}) при измерениях под углами 0° и 45° соответственно. А, Б и В – псевдонимы испытуемых. Индексы "п" и "л" – правая и левая рука. Верхний индекс – номер эксперимента. Для измерений $\Delta\tau$ ладони под углом 0° в экспериментах $А_п^3$ и $А_п^4$ (длительность регистрации 0.5 и 3 мин соответственно) показаны погрешности измерений $\delta\tau$.

тела, нагретого до известной температуры. Температуры аквариума и черного тела контролировались стандартными ртутными термометрами с точностью 0.1 K.

Пример временнóй зависимости регистрируемого шумового сигнала – инкремента акустояркостной температуры руки $\Delta\tau(t)$ – приведен на рис. 2 ($\Delta\tau = 0$ K соответствует температуре воды в аквариуме – 28.2°C). В течение периодов времени, обозначенных "аквариум" или "черное тело", фиксировался сигнал из аквариума или от черного тела, соответственно. В течение интервалов времени, обозначенных $Л_0$, T_0, $Л_{45}$ и T_{45}, регистрировался сигнал от правой кисти испытуемого, находящейся в четырех разных положениях. При этом в течение интервалов $Л_0(T_0)$ рука была повернута к ПП ладонью (тыльной стороной) так, что нормаль к ее поверхности направлена вдоль акустической оси ПП. В течение интервалов $Л_{45}(T_{45})$ кисть располагали к ПП ладонью (тыльной стороной) под углом 45° к его оси. На рис. 2 отчетливо видно, что акустояркостная температура черного тела (равная его термодинамической температуре) на 8 K превышает температуру аквариума, а инкремент акустояркостной температуры руки испытуемого составляет около 4 K. Полное время измерений для всех четырех положений руки составляло от двух до двенадцати минут (в примере на рис. 2 – две минуты).

На рис. 2 четко видны переходные процессы (например, между периодами аквариум–черное тело), обусловленные сменой источника теплового излучения. Длительность переходного процесса можно считать равной удвоенному времени интегрирования ФНЧ – 6 с.

Обработка измеренных значений сигнала (после окончания переходных процессов) дает возможность рассчитать по величинам средних уровней шумового сигнала соответствующие акустояркостные температуры, и по ширине шумовой дорожки – погрешности их измерения. Погрешность измерения акустояркостных температур $\delta\tau$ определяется отношением среднего квадратического отклонения к корню из числа независимых измерений. Для определения количества независимых измерений необходимо время регистрации разделить на длительность переходного процесса (в рассматриваемом примере время измерения при одном положении руки составляет 30 с, длительность переходного процесса – 6 с, следовательно, проведено 5 независимых измерений).

На рис. 3 показаны величины инкрементов акустояркостных температур кисти $\Delta\tau$ при разных температурах $t_в$ воды в аквариуме для трех испытуемых (А, Б и В). Нижние индексы "п" и "л" указывают правую или левую руку испытуемого. Верхний индекс показывает номер эксперимента при различных температурах аквариума. Результаты измерений обозначены $Л_0$, T_0, $Л_{45}$, T_{45} так же, как на рис. 2. Погрешности измерений $\delta\tau$ при длительности регистрации 0.5 и 3 мин составляют 0.3 и 0.1 K соответственно. Эти ошибки показаны на рис. 3 для двух случаев в экспериментах $А_п^3$ и $А_п^4$. Отметим, что сигнал, приведенный на рис. 2, соответствует эксперименту $А_п^3$.

Так, например, инкремент акустояркостной температуры, измеренный, когда рука испытуемого повернута к ПП ладонью так, что нормаль к ее поверхности направлена вдоль акустической оси ПП, обозначен $Л_0$. Из графика видно, что $\Delta\tau$ кисти уменьшается с ростом температуры аквариума, что совпадает с ранее полученными результатами [4, 5, 13]. Различие инкрементов акустояркостных температур, полученных для разных испытуемых при одной и той же температуре аквариума, можно объяснить различным тепловым режимом рук испытуемых в день проведения конкретных измерений и их различной реакцией на низкую температуру аквариума. При этом инкремент акустояркостной температуры ладони на 0.5–1 К больше, чем для тыльной стороны [13] (исключение составляют результаты $Б_п^2$ измерения правой руки испытуемого Б при температуре воды в аквариуме 24.5°С – по-видимому, это связано с погрешностью измерений и с указанными выше причинами). В ряде экспериментов при низких температурах аквариума (ниже 25°С) акустояркостная температура тыльной стороны кисти, измеренная под углом 45°, T_{45} значительно меньше (на 2.5–3.5 К) акустояркостной температуры ладони $Л_0$. Это вызвано нестационарностью процесса установления температуры кисти после длительного пребывания руки в холодной воде.

Зарегистрированная разница инкрементов акустояркостных температур ладони и тыльной стороны кисти позволяет сделать вывод о том, что профиль внутренней температуры руки несимметричен. По-видимому, область значительного артериального кровотока расположена ближе к ладони.

Для восстановления температуры необходимо знать коэффициент поглощения (по мощности) γ в кисти. Для его измерения регистрировали относительное ослабление теплового излучения акустического черного тела при прохождении ультразвука через кисть, толщина которой d известна. В предположении, что биообъект однороден по поглощению, а рассеяние и отражение на границе кисть–вода пренебрежимо малы [14–16], были получены значения коэффициента поглощения ультразвука в кисти у трех испытуемых. Значения γ находились в диапазоне 0.7–1.2 1/см (погрешность измерения $\delta\gamma \sim 0.05$–0.1 1/см). Измеренные величины примерно вдвое больше значений коэффициента поглощения для мышечной ткани, полученных методами современной медицинской и биологической акустики [17, 18], но меньше значений для кожи и сухожилий. По-видимому, полученные результаты являются усредненными для кисти человека и могут служить оценками поглощения в случае необходимости представления кисти однородным объектом.

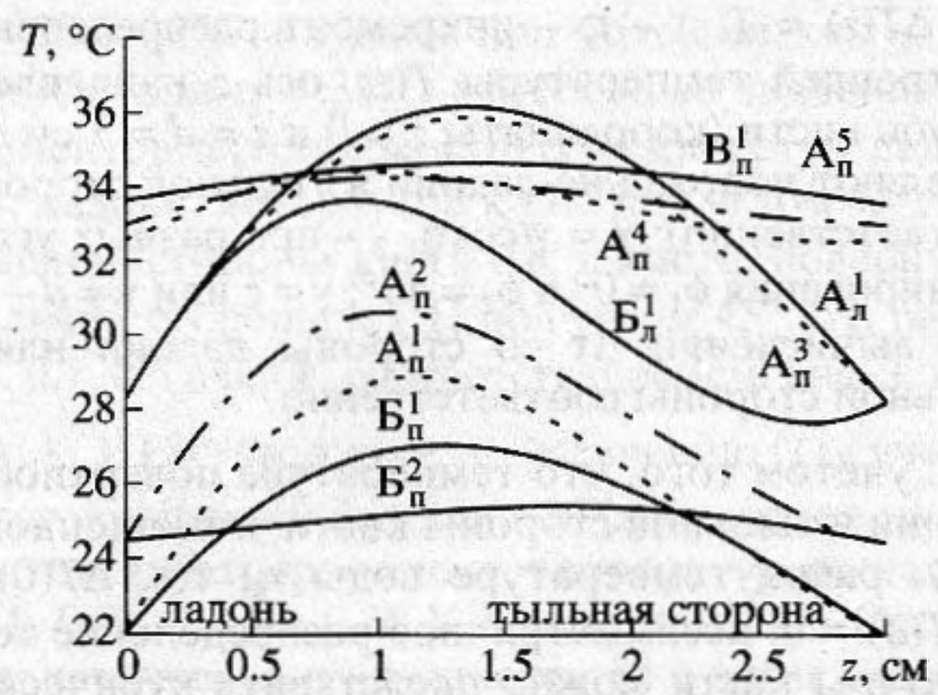

Рис. 4. Восстановленные профили внутренней температуры $T(z)$ кисти по экспериментальным данным инкрементов акустояркостных температур (обозначения для разных испытуемых такие же, как на рис. 3).

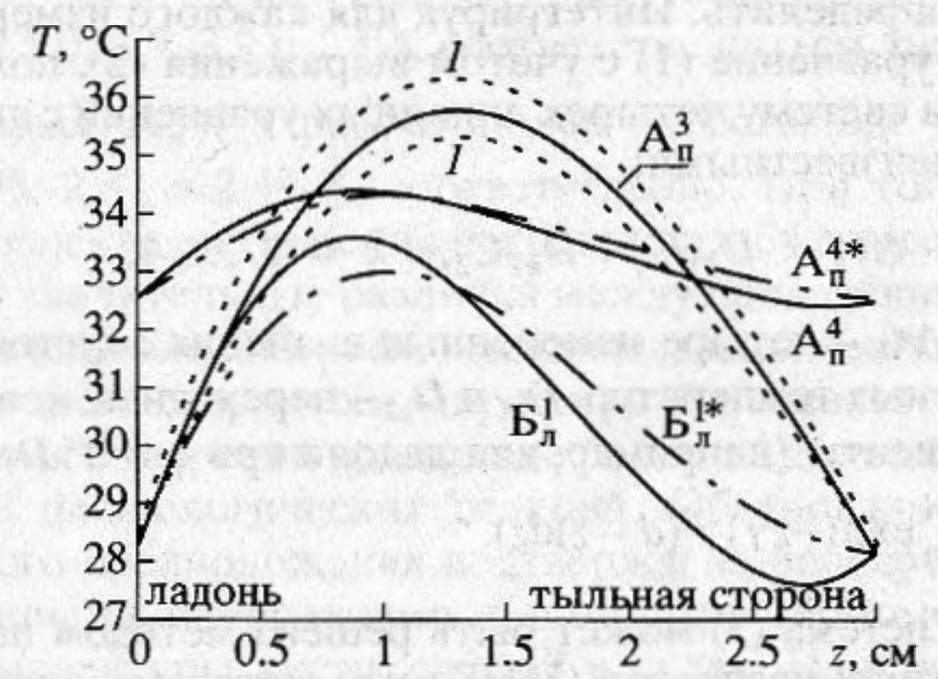

Рис. 5. Восстановленные методом линейного программирования профили внутренней температуры $T(z)$ кисти $Б_л^{1*}$ и $А_п^{4*}$ (пунктир) и оценки погрешности $\delta T(z)$ для кривой $А_п^3$. Для сравнения повторены профили $Б_л^1$ и $А_п^4$ из рис. 4 (сплошные линии). Пунктиры *1* – диапазон погрешности $\delta T(z)$ определения температуры для кривой $А_п^3$ (посередине – восстановленный профиль).

Измерения, проведенные активными методами в частотном диапазоне 1.5–2.5 МГц, не выявили сильной частотной зависимости γ, что дало возможность считать коэффициент поглощения постоянным во всей полосе пропускания ПП.

При сделанных выше допущениях относительно поглощения, рассеяния и отражения инкремент акустояркостной температуры кисти $\Delta\tau = \tau - t_в$ (τ – акустояркостная температура кисти) имеет вид:

$$\Delta\tau = \gamma' \int_0^d \exp(-\gamma' y)\Delta T(z)\mathrm{d}z, \qquad (1)$$

где $\Delta T(z) = T(z) - t_в$ – инкремент распределения внутренней температуры $T(z)$, ось z направлена вглубь кисти (координаты $z = 0$ и $z = d = 3$ см определяют положение ладони и тыльной стороны соответственно); $\gamma' = \gamma/\cos\phi_{1,2}$ – при разных углах сканирования $\phi_1 = 0°$ и $\phi_2 = 45°$; $y = z$ или $y = d - z$ – при вычислении $\Delta\tau$ со стороны ладони или с тыльной стороны соответственно.

С учетом того, что температура поверхности ладони и тыльной стороны кисти, помещенной в воду, равна температуре воды $t_в$, т.е. $\Delta T(0) = \Delta T(d) = 0$, несимметричное распределение температуры кисти можно представить кубической параболой:

$$\Delta T(z) = (C_1 z + C_2)(d - z)z, \qquad (2)$$

где C_1 и C_2 – коэффициенты, которые необходимо определить. Интегрируя для каждого измерения уравнение (1) с учетом выражения (2), получаем систему четырех линейных уравнений с двумя неизвестными:

$$\Delta\tau_k = D_{k1}C_1 + D_{k2}C_2, \quad k = 1, \ldots, 4, \qquad (3)$$

где $\Delta\tau_k$ – четыре измеренных значения акустояркостных температур, D_{k1} и D_{k2} – переходные коэффициенты (например, для ладони при $\phi = 0°$ $D_{11} = \gamma\int_0^d \exp(-z\gamma)\, z^2(d - z)\mathrm{d}z$).

Система (3) может быть решена методом наименьших квадратов (МНК) или методами линейного программирования. Восстановленные с помощью МНК по данным измерений инкрементов акустояркостных температур руки профили внутренней температуры $T(z)$ представлены на рис. 4 (обозначения кривых совпадают с обозначениями результатов измерений на рис. 3). Максимальное значение температуры кисти в глубине достигает у разных испытуемых 33–36°С при $t_в$ = 28.2–33°С (при таких условиях испытуемый субъективно не ощущает дискомфорта) и уменьшается до 26–30°С при снижении температуры аквариума до 22–24°С. Координата, при которой температура максимальна, не меняется в пределах погрешности во всем диапазоне $t_в$ и лежит у разных испытуемых в интервале 1.0–1.4 см. Исключением является профиль, полученный по результатам $Б_п^2$, ранее уже упоминавшимся. По-видимому, это результат длительной динамики внутренней температуры под влиянием переохлаждения руки.

Отметим, что восстановленные по экспериментальным результатам профили внутренней температуры хорошо согласуются с физиологическими данными за исключением профилей $T(z)$, восстановленных по результатам измерений $Б_л^1$ и $А_п^4$. В этих случаях восстановленная температура участка кисти, расположенного у тыльной стороны, ниже температуры аквариума, что физически нереально. Для измерений $А_п^4$ этот эффект почти не заметен, а для $Б_л^1$ – довольно значителен, что связано с отмеченными погрешностями конкретных экспериментов.

Для восстановления профиля внутренней температуры по этим полученным данным необходимо воспользоваться методами линейного программирования, т.е.решать систему (3) при условии неотрицательности $\Delta T(z)$:

$$\begin{cases} \Delta\tau_k = D_{k1}C_1 + D_{k2}C_2, \quad k = 1, \ldots, 4, \\ \Delta T(z) \geq 0, \quad 0 \leq z \leq d. \end{cases} \qquad (4)$$

Для рассматриваемых полиномов (2) требование неотрицательности $\Delta T(z)$, как несложно видеть, сводится к требованию $C_1 z + C_2 \geq 0$ при $0 \leq z \leq d$. Если максимум полинома сдвинут в сторону ладони, сумма $C_1 z + C_2$ сводится к выражению $C^*(d - z)$, а искомая функция определяется как $\Delta T(z) = C^*(d - z)^2 z$. Таким образом, необходимо определять только один неизвестный коэффициент C^*, который находится с помощью МНК при решении системы $\Delta\tau_k = D_k^* C^*$, $k = 1, \ldots, 4$, где, например, для ладони при $\phi = 0°$ $D_1^* = \gamma\int_0^d \exp(-z\gamma)\, z(d - z)^2 dz$. На рис. 5 приведены профили $T(z)$, восстановленные при решении системы (3) по результатам измерений $Б_л^1$ и $А_п^4$ (сплошные линии) и профили $T(z)$, восстановленные при решении системы (4) (пунктирные линии), обозначенные $Б_л^{1*}$ и $А_п^{4*}$ соответственно. Отметим, что в результате уточнений максимальное значение температуры несколько уменьшилось (для $А_п^{4*}$ в пределах погрешности измерений), координата z максимума осталась практически неизменной.

Для исследования точности восстановления необходимо учесть, что она зависит от погрешностей измерения четырех акустояркостных температур τ_k ($k = 1, \ldots, 4$), угла ϕ, коэффициента поглощения γ, толщины ладони d, а также от погрешности термометра $\delta T(0) = 0.1$ К, измеряющего температуру аквариума, равную температуре поверхности кисти $t_в = T(0)$. Отметим, что погрешность в определении d приводит к растяжению или сжатию графика по оси z. Для оценки квадрата погрешности $\delta T(z)^2$ восстановленного распре-

деления температуры с учетом всех указанных параметров использовали формулу [19]:

$$\delta T(z)^2 = \sum_{k=1}^{4}\left[\frac{\partial T(z)}{\partial \tau_k}\right]^2 \delta\tau^2 + \left[\frac{\partial T(z)}{\partial \gamma}\right]^2 \delta\gamma^2 + \left[\frac{\partial T(z)}{\partial \phi}\right]^2 \delta\phi^2 + \delta T(0)^2, \quad (5)$$

где $\delta\phi = 5°$ – погрешность определения угла ϕ, для эксперимента $A_п^3$ $\delta\tau = 0.3$ K и $\delta\gamma = 0.05$ 1/см. При использовании вычислительной техники выражение (5) удобно представить в виде:

$$\delta T(z)^2 = \sum_{k=1}^{4}(\Delta_{\tau_k} T)^2 + (\Delta_\gamma T)^2 + (\Delta_\phi T)^2 + \delta T(0)^2, \quad (6)$$

где $\Delta_{\tau_k} T$ ($k = 1, \ldots, 4$), $\Delta_\gamma T$, $\Delta_\phi T$ – частные приращения функции T по четырем акустояркостным температурам τ_k, коэффициенту поглощения γ, углу сканирования ϕ соответственно. Приращения аргументов при этом равны: для четырех акустояркостных температур – $\delta\tau$, для коэффициента поглощения и угла сканирования – $\delta\gamma$ и $\delta\phi$ соответственно. На рис. 5 в качестве примера для профиля внутренней температуры кисти правой руки $A_п^3$, опущенной в аквариум при температуре 28.2°C, пунктирными кривыми *1* обозначена средняя квадратическая погрешность $\delta T(z)$ восстановления внутренней температуры кубической параболой. Из графика видно, что погрешность максимальна в центре, где она достигает 0.5 K и уменьшается до 0.1 K на границах кисти (погрешность температуры при $z = 0$ и $z = d$ определяется точностью термометра).

В работе исследовали также возможность восстановления профиля внутренней температуры многочленами более высоких степеней, в частности, полиномом четвертой степени. При таком подходе необходимо определить три коэффициента, что, в принципе, возможно при наличии четырех измеренных значений акустояркостных температур. Однако при точности нашего эксперимента восстановление дало физиологически неприемлемый результат: температура участков кисти, близких к ее поверхности, была значительно ниже температуры аквариума, а максимальное значение существенно превышало 37°C.

Одним из критерием адекватности выбранной модели является соответствие между измеренными значениями инкрементов акустояркостных температур $\Delta\tau$ и значениями этих же инкрементов, но рассчитанными по уравнению (1) с учетом восстановленной функции $\Delta T(z)$. Проведенные для кубической параболы вычисления показали хорошее согласование результатов (в пределах $\delta\tau$) при $t_в = 28.2$–33°C и худшее при более низких $t_в$. Например, при $t_в = 33$°C измеренные значения инкрементов акустояркостных температур ладони $\Delta\tau_1$; ладони, повернутой к ПП под углом 45°, $\Delta\tau_2$; тыльной стороны кисти $\Delta\tau_3$ и кисти, повернутой тыльной стороны к ПП под углом 45°, $\Delta\tau_4$ равны 0.8, 0.7, 0.5 и 0.3 K соответственно (см. рис. 3, кривая $A_п^5$). Рассчитанные по уравнению (1) с учетом восстановленной функции $\Delta T(z)$ значения инкрементов акустояркостных температур составили 0.75, 0.75, 0.44 и 0.36 K соответственно. Среднеквадратическая погрешность $\delta\tau$ в этом эксперименте была около 0.1 K, и, как видно, расхождения между измеренными и рассчитанными значениями лежат в пределах указанной погрешности. В то же время, при $t_в = 22°$ измеренные значения инкрементов акустояркостных температур равны 5.0, 2.9, 3.9 и 1.4 K соответственно (см. рис. 3, кривая $A_п^1$), а рассчитанные – составили 4.03, 3.95, 2.87 и 2.49 K, соответственно. При той же среднеквадратической погрешности $\delta\tau$ существуют значительные различия между приведенными значениями. Эти расхождения вызваны нестационарностью процесса – профиль $T(z)$ меняется во время измерений вследствие большой длительности физиологических реакций. Обоснованность этого предположения подтверждена непосредственными измерениями с помощью термометра температуры кисти, сжатой в кулак. Измерения проводили в промежутках между процедурами регистрации акустического излучения, при этом наблюдалось понижение температуры ладони на несколько градусов (~3–4°C) за все время эксперимента (около часа). Кроме того, полученные расхождения между измеренными и рассчитанными инкрементами акустояркостных температур, видимо, следует отнести за счет реальной неоднородности величины γ.

Таким образом, впервые методом пассивной термоакустической томографии удалось восстановить профиль внутренней температуры руки человека, погруженной в воду при разной температуре аквариума. Успех, достигнутый при простейшей схеме измерений с помощью одного датчика и всего двух углов сканирования, позволяет надеяться, что термоакустическая томография при увеличении числа датчиков и количества измерений даст возможность восстанавливать двумерные и трехмерные распределения температуры в различных частях тела человека (например, в молочной железе).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 96-01-01897).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бабий В.И.* Перенос акустической энергии в поглощающей и излучающей среде // Мор. гидрофиз. исслед. 1974. Т. 65. № 2. С. 189–192.
2. *Bowen T.* Acoustic radiation temperature for non-invasive thermometry // Automedica. 1987. V. 8. P. 247–267.
3. *Godik E.E., Gulyaev Yu.Y., Mirgorodsky V.I., Passechnik V.I.* Acoustic Thermography of human body; passive sensing of human body by measurements of its thermal acoustic field. // Acoustic senxing and probing, Fourth course at the International school on physical acoustics, 3–10 October 1991. World Scientific, Singapore. London, 1991. P. 77–95.
4. *Пасечник В.И.* Оценка чувствительности метода акустотермографии // Акуст. журн. 1990. Т. 36. № 4. С. 718–724.
5. *Passechnik V.I.* Verification of the physical basis of acoustothermography // Ultrasonics. 1994. V. 32. P. 293–299.
6. *Аносов А.А., Бограчев К.М., Пасечник В.И.* Восстановление распределения глубинной температуры кисти руки человека по ее тепловому акустическому излучению // Акустика на пороге XXI века. Сборник трудов VI сессии Российского акустического общества. М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 1997. С. 470–473.
7. *Аносов А.А., Пасечник В.И.* Одномерные обратные задачи акустотермографии и СВЧ-радиометрии // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 5. С. 743–748.
8. *Аносов А.А., Пасечник В.И.* Пространственная обратная задача акустотермографии // Акуст. журн. 1994. Т. 40. № 6. С. 885–889.
9. *Аносов А.А., Исрефилов М.Г., Пасечник В.И.* Точность решения двумерной обратной задачи акустотермографии при некорреляционном приеме // Радиотехника. 1995. № 9. С. 65–68.
10. *Paxxechnik V.I., Anosov A.A., Isrefilov M.G., Erofeev A.V.* Experimental reconstruction of temperature dictribution at a depth through thermal acoustic radiation // Ultrasonics. 1997 (in press).
11. *Аносов А.А., Пасечник В.И., Исрефилов М.Г.* Восстановление двумерного распределения внутренней температуры модельного объекта методом пассивной термоакустической томографии // Акуст. журн. 1997 (в печати).
12. *Герасимов В.В., Гуляев Ю.В., Миргородский В.И., Пешин С.В., Сабликов В.А.* Диагностика систем терморегуляции человека с помощью акустотермометра (на примере исследования икроножной мышцы) // Радиотехника и электроника. 1993. Вып. 10. С. 1904–1911.
13. *Аносов А.А., Бограчев К.М., Пасечник В.И.* Измерение теплового акустического излучения из кисти руки человека // Акуст. журн. 1997 (в печати).
14. *Passechnik V.I.* The influence of sound scattering on the acoustobrightness temperature // Ultrasonics. 1996. V. 34. P. 676–685.
15. *Claes M. Hedberg.* Solving the inverse problem in nonlinear acoustics by backpropagation of the received signal // JASA. V. 101. 1997. № 5. P. 3090.
16. *Robert C. Waag, D.-L. Liu, T. Douglas Mast, Adrian I. Nachman.* Imaging with eigenfunction of the scattering operator // J. Acoust. Soc. Amer. V. 101. 1997. № 5. P. 3090.
17. Сенсорное восприятие / Ред. О.С. Андрианова. Л.: Наука, 1985. 188 с.
18. *Fowlkes J.B.* Hot topics in medical acoustics // J. Acoust. Soc. Amer. V. 101. 1997. № 5. P. 3120.
19. *Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В.* Краткий курс математической статистики для технических приложений. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1959. С. 158.

Passive Thermoacoustic Tomography of a Human Hand

A. A. Anosov, K. M. Bograchev, and V. I. Pasechnik

A profile of the internal temperature of a human hand submerged in a water basin is reconstructed in the form of a cubic parabola by the method of passive thermoacoustic tomography. Thermal acoustic radiation of the hand is recorded at different angles from the side of the palm and from the back side of the hand. The reconstruction error does not exceed 0.5 K.