
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

УДК 621.036:536.3:612.55

**НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В СИСТЕМАХ ОБОГРЕВА С ТКАНЫМИ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЯМИ**© 2023 г. А. А. Шульженко^{1,*}¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

*e-mail: aa_shulzhenko.01@mail.ru

Поступила в редакцию 31.01.2023 г.

После доработки 13.04.2023 г.

Принята к публикации 20.04.2023 г.

В статье рассматривается способ воздействия на объект теплового сигнала, являющегося широкополосным сигналом ТГц-диапазона. Генерация сигнала осуществлялась тепловыделяющими элементами тканых электронагревателей на основе углеродных нитей. Воздействие тканых электронагревателей производилось контактным способом на отдельные участки объекта. Также с помощью сигнала ТГц-диапазона была получена неинвазивным путем количественная информация во времени о кожно-гальванических реакциях и др. Настоящая статья представляет интерес для специалистов, занимающихся в области теплофизики, материаловедения, физиологии, медицины и т.д.

Ключевые слова: тканый электронагреватель, углеродные (графитовые) нити, контактный обогрев, потовыделение, кожно-гальванические реакции, изменение сосудистого русла, микроциркуляция, ТГц-сигнал

DOI: 10.31857/S0235711923040132, EDN: XWQPHU

Тканые электронагреватели уже получили самое широкое распространение в различных сферах жизнедеятельности человека: при решении технических задач в отраслях промышленности, в медицине, в науке, в быту. Высокая эластичность, структурная идентичность с обычными тканями, возможность локального действия, теплофизические свойства тканых электронагревателей делают эти оригинальные элементы целого ряда машиностроительных технологий, востребованными и в новых инновационных направлениях медицины.

Довольно часто в качестве тепловыделяющих элементов в конструкциях тканых электронагревателей используют углеродные нити. Они имеют структуру графита [1].

Рассмотрим, как происходит, нагрев в графите. Кристаллическое тело в классической и квантовой теории представляется в виде системы независимых осцилляторов. Энергию каждого гармонического осциллятора, колеблющегося с частотой ω , можно описать с помощью дискретных значений

$$E = \hbar\omega(n + 1/2),$$

где $n = 0, 1, 2, \dots$ — квантовое число; $\hbar$ — постоянная Планка; $\hbar\omega$ — квант энергии колебания осциллятора, фонон.

Согласно [2–8], теплопроводность в графите обеспечивается в основном за счет фонон-фононного взаимодействия.

Энергетическое состояние фононов в углеродной нити — различное, поэтому они колеблются не с одной частотой. Их суммарные колебания представляют собой

спектр частот. Вычислить этот спектр — сложная задача. Для расчета энергии колебаний фононов используются различные упрощенные подходы. Так для расчета суммарной энергии всех осцилляторов в кристалле часто применяют, модель Бозе—Эйнштейна [5, 7, 8], отражающую степень участия фононов в тепловыделении

$$E_{\text{ph}} = \sum_p \sum_k [n(w_p(k)) + 1/2] \cdot \hbar w_p(k),$$

где $n(w_p(k))$ — среднее число фононов в состоянии $w_p(k)$ (функция распределения Бозе—Эйнштейна для фононов); p — поляризация фононов.

Используя квантовые представления о колебаниях атомов и модель одномерной цепочки, можно получить один из вариантов дисперсионного соотношения взаимодействия фононов [4–8]

$$w = 2 \cdot \sqrt{\frac{g}{m}} \left| \cos \frac{ka}{4} \right| \quad \text{или} \quad f_{\text{max}} \approx \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{g}{m}} \left| \cos \frac{ka}{4} \right|, \quad (1)$$

где g — упругая константа; m — масса атома; k — волновой вектор; a — целое число.

Исходя из выражения (1), была сделана оценка частоты колебаний при фонон-фононном взаимодействии. Она показала, что эта частота примерно равна $f_{\text{max}} \approx 10^{13}$ Гц $\approx \approx 10$ ТГц. Эти значения частоты получены для оптической ветви решения, т.к. именно оптическая ветвь при фонон-фононном взаимодействии описывает инфракрасное излучение.

Сигналы, обладающие частотами порядка ~ 10 ТГц, относятся к длинноволновому инфракрасному частотному диапазону. Этот диапазон располагается в области распределения частот между оптическим (сотни ТГц) и электромагнитным (сотни ГГц).

Излучение предметов на уровне комнатной температуры также принадлежит именно к области терагерцового диапазона [4, 8].

Характерными свойствами волн, длинноволнового инфракрасного диапазона, согласно проведенным исследованиям [9–14], являются: 1) низкая энергия воздействующего фотона, в результате чего не происходит фотоионизации биологических тканей, в отличие, например, от рентгеновских лучей. Поэтому, этот диапазон волн является безопасным, и для исследуемого биологического объекта, и для исследователя; 2) высокий коэффициент поглощения в воде, о чем свидетельствует эксперимент, проведенный с использованием непрерывного терагерцового излучения [15].

В ходе которого было определено, что воздействующие волны ТГц-диапазона распространяются через пустой металлический сосуд и верхнюю часть наполовину заполненного водой металлического сосуда и не распространяются через нижнюю часть наполовину заполненного водой металлического сосуда. То есть, наличие влаги влияет на распространение волн ТГц-диапазона, и они не могут глубоко проникать в человеческое тело, в отличие, например, от микроволн. В связи с чем, длинноволновое инфракрасное излучение, в пределах создаваемых им температур, привычных, постоянно действующих на человека, не может причинить ему какой-либо существенный вред; 3) прозрачность для данного диапазона различных диэлектрических материалов, таких как ткани, дерево, бумага, пластмассы и др.

Эти свойства делают такой диапазон привлекательным для использования при различных исследованиях человека. Однако, несмотря на его естественность, применение мод длинноволнового инфракрасного диапазона связано с определенными трудностями. К ним можно отнести то, что это излучение естественных терагерцовых источников не является когерентным, поэтому его нельзя применить для таких задач, как связь, локация, имиджинг, спектроскопия и т.п.

Если попытаться подойти к решению проблемы освоения ТГц-диапазона с помощью методов, практикуемых при создании полупроводниковой лазерной техники, то

трудности возникают из-за сложности формирования сигналов, возможности их детектирования из широкого спектра частотных сигналов, генерируемых источником.

При подходе к ТГц-диапазону со стороны ГГц-диапазона, также существуют проблемы, связанные с перемещением электронов, временем их пролета в СВЧ-приборе, где для повышения частоты необходимо использовать значительные электрические поля в малой области пространства пролета носителей, что вызывает технические затруднения [10, 11].

Поэтому, ТГц-диапазон в области 5–40 ТГц был отнесен к так называемому “частотному провалу”, освоение которого началось и проводится только в настоящее время.

Попытки его освоения в большей степени идут в направлении использования методов создания квантовых приборов. Обычно, эти методы включают в себя следующие этапы: накачку — т.е. передачу энергии от внешнего источника в рабочую зону полупроводника и получение терагерцового сигнала за счет нелинейного преобразования высокоинтенсивного лазерного излучения в кристаллах и т.д.; выделение узкочастотного спектра сигнала; усиление этого сигнала, с целью повышения соотношения сигнал/шум и обеспечения необходимой мощности для передачи его через некоторое пространство на исследуемый объект; принятие сигнала приемником, сопоставление посланного и обратного сигналов; дальнейшую его обработку. На сегодняшний день имеется информация о серийно выпускаемых устройствах в диапазоне ~100 ТГц и создании единичных устройств на уровне лабораторных образцов, работающих на более низких частотах в ТГц-диапазоне, но только до частот порядка 30 ТГц [10–12, 16, 17].

Однако, при создании устройств, генерирующих сигнал в диапазоне порядка 5–40 ТГц, который предполагается использовать, в том числе, и для исследования реакции человека, можно пойти и по другому пути, описание которого является целью настоящей статьи.

Возьмем тканые электронагреватели с тепловыделяющими элементами на основе углеродных нитей.

Термографический снимок (рис. 1), полученный с помощью тепловизора фирмы FLIR со спектральной чувствительностью 7.7–9.3 Мкм, дает представление о температурном распределении теплового поля по поверхности тканого электронагревателя, расположенного на столе. В качестве тепловыделяющих элементов служат углеродные нити. Как хорошо видно, температура углеродных нитей превышает комнатную температуру, в данном случае, равную 20.5°C. Инфракрасный широкополосный ТГц-сигнал в углеродных нитях, обеспечивающий превышение комнатной температуры, как и в других полупроводниках, вырабатывается путем фонон-фононного взаимодействия, вызванного генерацией неравновесных фононов при непрерывном воздействии внешнего источника постоянного электрического поля.

Конечно, хотя такой сигнал и обладает высокой проникающей способностью, как в воздушной среде, так и при прохождении толщи тканей, он не обладает достаточной мощностью, чтобы его можно было использовать на значительном расстоянии. Детектировать этот сигнал сложно, а построить усилитель для такого широкополосного сигнала затруднительно. Поэтому, здесь предлагается другой подход. Во-первых, отказаться от детектирования и усиления сигнала, а использовать непрерывный мало-мощный широкополосный сигнал собственно нагревателя. Во-вторых, минимизировать расстояние между источником сигнала и объектом, на который направлено действие нагревателей, что обеспечивает рост эффективности нагрева. То есть, осуществлять передачу энергии на объект не излучением, а путем теплопроводности, контактным способом.

Этот способ можно применять при исследовании человека. Следует отметить, что человек, его тепловая система, сама генерирует аналогичный, широкополосный тепловой сигнал [4, 5, 9, 18].

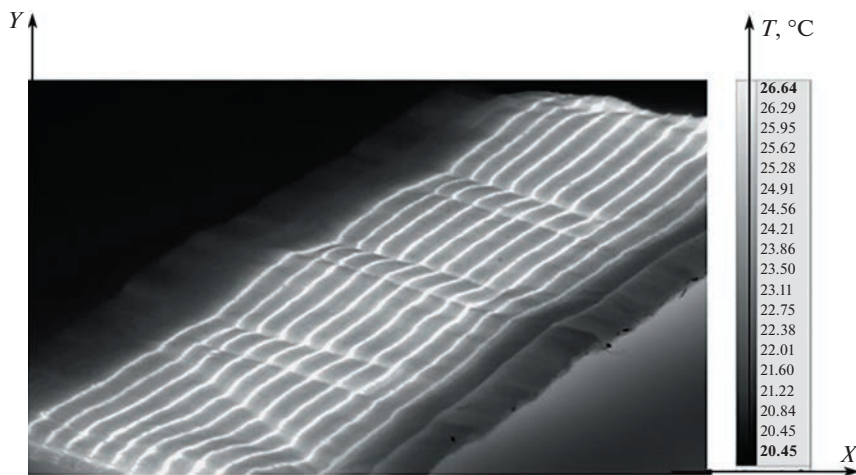


Рис. 1. Изменение температуры на поверхности тканого электронагревателя.

При использовании способа ткаными электронагревателями создается уровень сигнала, способный вызвать ответную реакцию, т.к. при определенных температурах воздействующего теплового сигнала происходит потовыделение и другие явления, связанные с изменением содержания влаги в верхних слоях тела, что сильно влияет на распространение ТГц-волн.

В результате, такого поведения волн ТГц-диапазона при исследовании человека в области воздействующего источника широкополосного сигнала становится возможным получать не только сигнал, характерный для источника, а более сложный сигнал, представляющий собой сумму тепловых сигналов, включающих и отклики от исследуемого человека, влияющие на уровень суммарного сигнала в этом же частотном диапазоне.

Проведем эксперимент. Расположим тканый электронагреватель на поверхности тела человека, но оставим между тканым электронагревателем и телом человека небольшой промежуток. Термопару разместим непосредственно на тканом электронагревателе. При подаче теплового сигнала определенного уровня, 33–38°C, с поверхности тканого электронагревателя на поверхность тела со стороны человека наблюдается обратная реакция [19]. Эта реакция связана с такими явлениями, как потовыделение и его испарение. Согласно проведенным исследованиям эта реакция сама так же представляет собой колебательный процесс, т.к. происходит, то выделение пота, то его испарение. На рис. 2, кривая 1 показано изменение температуры в области тканого электронагревателя, зафиксированное термопарой. Выделение пота и его испарение вызывает изменение коэффициента теплопроводности в промежутке между телом человека и тканым электронагревателем во времени, т.к. влага является серьезным препятствием для распространения сигнала длинноволнового инфракрасного диапазона. Поэтому, можно записать, что $\lambda = \lambda(t)$.

При подаче более мощного теплового сигнала со стороны тканого электронагревателя, от 33°C до температуры, превышающей 38°C, возникает новый отклик со стороны тела человека [20]. Этот отклик отслеживается этой же термопарой, расположенной на поверхности тканого электронагревателя (рис. 2, кривая 2).

Он фиксирует сначала процесс потовыделения. А затем, в нашем случае, начиная с 56 минуты, при превышении температуры в области тканого электронагревателя 38.4°C, одновременно, и процесс потовыделения, и явления, связанные с изменением

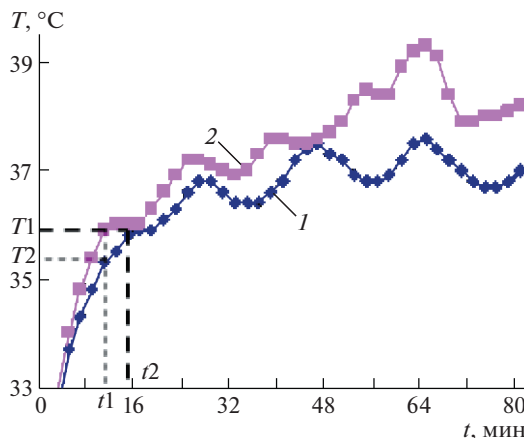


Рис. 2. График зависимости температуры в области тканого электронагревателя, находящегося на поверхности тела человека, от времени, полученной экспериментальным путем при различных уровнях воздействующего сигнала: 1 – при максимальном уровне меньше 38°C ; 2 – при максимальном уровне больше 38°C .

ми сосудистого русла на поверхности тела человека. Изменения сосудистого русла отражают: сужения сосудов, ведущих внутрь тела и расширения периферийных сосудов тела; увеличения объемной скорости кожного кровотока; увеличения объема циркулирующей крови в подкожных кровеносных сосудах и т.д. Таким образом, в дополнение к изменениям коэффициента теплопроводности, связанного с потовыделением, изменения сосудистого русла приводят к изменениям коэффициента теплоотдачи в тело человека. Его можно записать $\alpha = \alpha_{ch}(t)$.

Изменения коэффициента теплоотдачи, в свою очередь, вызывают температурные изменения на поверхности тела человека $\Delta T = (\Delta T_{ch}(t) - \Delta T_{chl})$, где ΔT_{chl} – температура тела человека в начальном состоянии, при комнатной температуре.

Так как температура тканого электронагревателя меняется во времени (растет по обратному экспоненциальному закону [21]), то это влияет на изменение длительности периода колебаний реакции во времени при потовыделении [22]. Однако, эти изменения невелики. В среднем частота колебаний, вызванных потовыделением, составляет $w_p = 2\pi f_p = 2\pi(1/t_q)$. Согласно экспериментальным данным (рис. 4), $f_p \approx 10^{-3}$ Гц, а период – $t_q \approx 10^3$ с.

Можно отметить, что низкочастотные сигналы откликов человека являются модулирующими сигналами, а широкополосные ТГц-сигналы, формируемые тканями электронагревателями и человеком в пределах тепловой системы, представляющей собой тонкую стенку, – несущими.

Сопоставляя низкочастотные сигналы с ТГц-частотами воздействующего теплового сигнала, а точнее с их обратными величинами – временем релаксаций носителей энергии и длительностью (периодом) обратных реакций, очевидно, что справедливо соотношение

$$t_q \gg \tau, \quad (2)$$

где t_q – время протекания одного периода тепловых процессов, вызванных реакцией человека; τ – время релаксации носителей энергии.

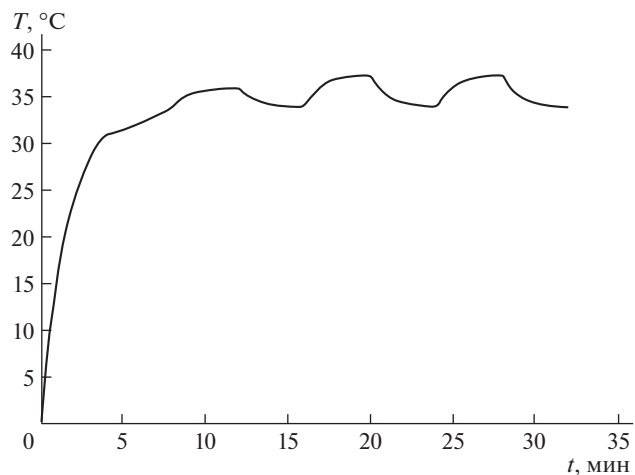


Рис. 3. График изменения температуры, полученный с помощью тепловой модели на поверхности нагревателя при небольшом уровне теплового воздействия.

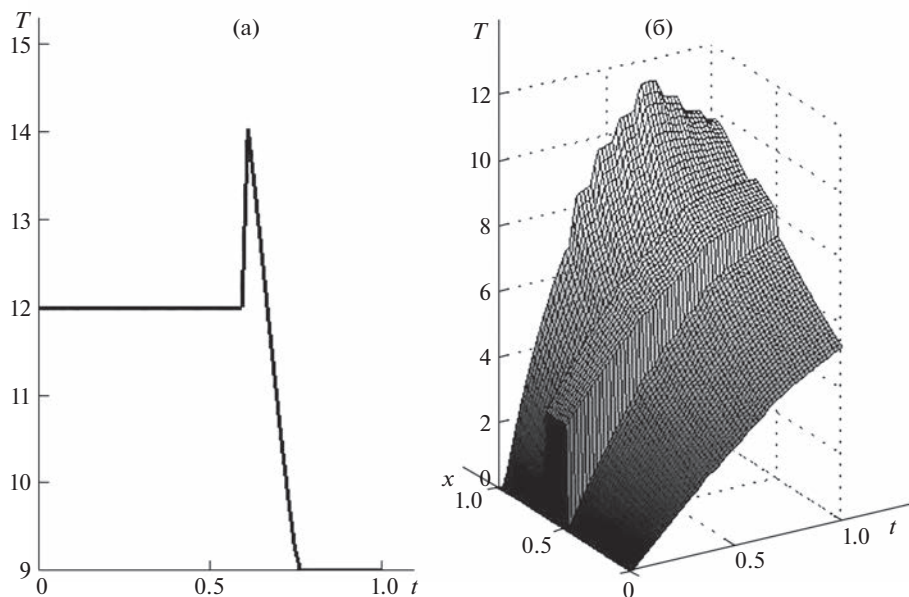


Рис. 4. График изменения температуры во времени, полученный с помощью тепловой модели на поверхности нагревателя при более высоком уровне теплового воздействия, более 38°C : (а) — модель воздействующего со стороны человека теплового сигнала; (б) — характер изменения теплового поля во времени и по пространству тонкой стенки.

Длительность отклика на тепловой сигнал, связанная с изменением сосудистого русла, как и в случае с потовыделением, также намного превышает время релаксации носителей.

При таком временном соотношении (2) для описания тепловых процессов, связанных с реакцией человека, можно использовать классический вариант уравнения Фурье [5, 7, 8].

Тогда температурные изменения на поверхности тела человека под воздействием тканых электронагревателей в тонкой стенке, состоящей из промежутка между телом человека и тканым электронагревателем, толщины тканого электронагревателя и теплоизоляционного слоя между тканым электронагревателем и внешней средой, можно описать в виде смешанной задачи Коши с переменными внешними условиями

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T = \Delta T_{ch} = \Delta T_{chl} \quad \text{при} \quad 0 = t, \quad x = x_0, \\ \Delta T = \Delta T_{ch}(t), \quad \text{при} \quad t > 0, \quad x = x_0, \\ \Delta T = \Delta T_{sr} = 0 \quad \text{при} \quad t = 0, \quad x = x_3, \\ -\lambda_1 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = -\alpha_{ch}(\Delta T_{ch}(t) - \Delta T_{chl}) \quad \text{при} \quad t > 0, \quad x = x_0, \\ \rho_1 c_1 \frac{\partial \Delta T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda_1(t) \frac{\partial \Delta T}{\partial x}) \quad \text{при} \quad t > 0, \quad x_0 < x < x_1, \\ -\lambda_1 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = -\lambda_2 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \Big|_{x=x_1} \quad \text{при} \quad t > 0, \quad x = x_1, \\ \Delta T_{h1}(t, x) = \Delta T_{i1}(t, x) \quad \text{при} \quad t > 0, \quad x = x_1, \\ \rho_2 c_2 \frac{\partial \Delta T}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} + q_v \quad \text{при} \quad t > 0, \quad x_1 < x < x_2, \\ -\lambda_2 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \Big|_{x=x_2} = -\lambda_3 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \Big|_{x=x_2} \quad \text{при} \quad t > 0, \quad x = x_2, \\ \Delta T_{h2}(t, x) = \Delta T_{i2}(t, x) \quad \text{при} \quad t > 0, \quad x = x_2, \\ \rho_3 c_3 \frac{\partial \Delta T}{\partial t} = \lambda_3 \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} \quad \text{при} \quad t > 0, \quad x_2 < x < x_3, \\ -\lambda_3 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = -\alpha_{sr} \Delta T \quad \text{при} \quad t > 0, \quad x = x_3, \end{array} \right. \quad (3)$$

где λ_1 — коэффициент теплопроводности среды промежутка между телом человека и тканым электронагревателем; α_{ch} — теплоотдача в тело человека; ρ_1 — плотность среды промежутка; c_1 — теплоемкость среды промежутка; λ_2 — коэффициент теплопроводности материала нагревателя; ρ_2 — плотность материала теплового источника; c_2 — теплоемкость материала теплового источника; x_1 — координата по оси X на поверхности нагревателя со стороны промежутка; ΔT_{h1} — разность температур со стороны промежутка в точке x_1 и внешней среды; ΔT_{i1} — разность температур нагревателя в точке x_1 и внешней среды; x_2 — координата по оси X на поверхности нагревателя со стороны теплоизоляционного слоя; ΔT_{h2} — разность температур на поверхности нагревателя со стороны нагревателя и внешней среды; ΔT_{i2} — разность температур на поверхности нагревателя со стороны теплоизоляционного слоя и внешней среды; λ_3 — коэффициент теплопроводности материала теплоизоляционного слоя; α_{sr} — теплоотдача во внешнюю среду; x_3 — координата по оси X на внешней поверхности теплоизоляционного слоя.

Построение тепловых моделей процессов потовыделения и его испарения на основе математического моделирования этого процесса, приведенные в [22] (рис. 3), подтвердили совпадение с экспериментально полученными изменениями температур на поверхности тканого электронагревателя (рис. 2).

Повышение уровня воздействующего электрического поля приводит по сравнению с более слабым воздействующим сигналом за одно и то же время к росту скорости генерации неравновесных фононов в тепловыделяющих элементах тканого электрона-

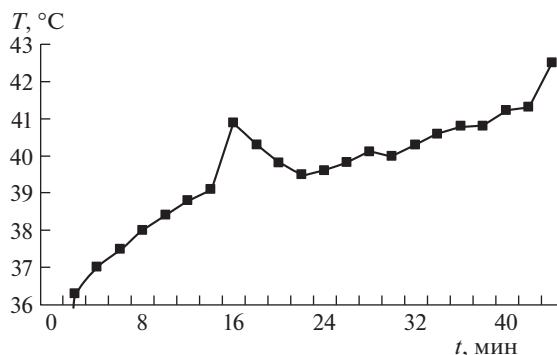


Рис. 5. Изменение температуры на поверхности тела человека при подаче теплового сигнала более мощного, чем вызывающего только потовыделение.

гревателя. Кроме того, при росте уровня воздействующего электрического поля происходит уменьшение времени фоновой релаксации, приводящей к повышению частоты теплового сигнала, что, в свою очередь, дополнительно вызывает некоторое повышение скорости его распространения [3–5]. Эти эффекты подтверждают результаты опытов, продемонстрированные на рис. 2. Наблюдается более быстрый рост уровня суммарного сигнала до значения T_1 на кривой 2 при максимальном уровне воздействующего сигнала нагревателя более 38°C за время t_1 , по сравнению с уровнем T_2 на кривой 1 при максимальном уровне воздействующего сигнала нагревателя менее 38°C за то же время t_1 , показанном на рис. 2. Следует отметить, что время t_1 наступления реакции в виде потовыделения на кривой 2 меньше по сравнению с временем t_2 на кривой 1.

Используя данные (рис. 2, кривая 2), было сделано математическое описание этого сигнала, дающее представление о форме и уровне сигнала-отклика, формирующегося на поверхности тела человека. Модель этого сигнала была подана со стороны тела человека на модель тонкой стенки, представляющую собой: промежуток между телом человека и нагревателем, нагреватель и теплоизоляционный слой, отделяющий нагреватель от внешней среды. Математическое описание тепловых процессов в тонкой стенке с учетом воздействующего сигнала представлено выражением (3). На основании выражения (3) была разработана программа. Смоделированный сигнал (рис. 4а), подаваемый со стороны тела человека на модель тонкой стенки, не просто изменился во времени по амплитуде, а и по форме (рис. 4б). Такое изменение обусловлено тем, что в области тонкой стенки этот сигнал представляет собой не только “чистый” сигнал, отражающий реакцию на изменение сосудистого русла, а суммарный сигнал в данной среде, включающий и сигнал, связанный с потовыделением. Результаты имитационного моделирования, проведенные на основе программы и показанные на рис. 5, близки к результатам натуральных испытаний (рис. 2, кривая 2).

Еще один результат. Проводя эксперимент, в ходе которого осуществлялось тепловое воздействие непосредственно на тело человека, без промежутка между телом человека и тканым электронагревателем, была получена реакция тела, отражающая изменения периферийной микроциркуляции (рис. 5). Она подтвердила результаты проведенного моделирования (рис. 4) и хорошо коррелируется с исследованиями, ранее полученными методом плетизмографии [23].

Выводы. Тканый электронагреватель с тепловыделяющими элементами в виде углеродных нитей, используемый для обогрева изделий технического назначения, мож-

но применять и для исследования человека. При этом воздействующий широкополосный сигнал длинноволнового инфракрасного частотного диапазона формировался путем фонон-фононного взаимодействия и передавался на тело человека контактным способом.

Использование такого способа позволило получить экспериментально при различных уровнях воздействия внешнего источника электрического поля количественные, температурные данные о реакциях человека во времени в виде потовыделений и изменений сосудистого русла на поверхности тела человека.

Результаты теплового воздействия подтверждают факт хорошего распространения ТГц-волн в тонкой стенке, расположенной между телом человека и внешней средой, и заполненной воздухом, тканями материалами, и поглощения их влагой за счет потовыделения и изменений сосудистого русла на поверхности тела человека.

Хотя процессы по генерации тепловых сигналов и относятся к ТГц-диапазону, однако, отклики на них представляют собой модулирующие низкочастотные сигналы $\sim 10^{-3}$ Гц.

Низкочастотный характер ответного сигнала делает возможным использование: при измерениях — чувствительных элементов типа термопар, а при тепловых расчетах — классический вариант уравнения Фурье.

Экспериментальные результаты подтверждают, что с ростом уровня воздействующего сигнала со стороны тканого электронагревателя сокращается время наступления реакции у человека на этот сигнал.

Такое устройство и расположение тканых электронагревателей на поверхности тела человека, их тепловое воздействие обеспечило неинвазивный характер получения информации в виде температурных изменений.

Метод, в котором используются недорогие тканые электронагреватели и термопары, позволяет обеспечить удобную дальнейшую обработку информации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнялась в рамках плана работ института.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технические характеристики продукции ООО “УВИКОМ”. Проспект. МО: ООО УВИКОМ, 1997.
2. Ансельм А.И. Введение в теорию полупроводников. М.: Изд. “Мир”, 1978. 616 с.
3. Винтайкин Б.Е. Физика твердого тела. Учебное пособие. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 360 с.
4. Гуревич А.Г. Физика твердого тела. Учебное пособие для вузов. СПб.: Невский диалект, БХВ-Петербург, 2004. 320 с.
5. Дмитриев А.С. Введение в нанотеплофизику. М.: ВИНОМ. Лаборатория знаний, 2015. 790 с.
6. Рейсленд Дж. Физика фононов. М.: Изд. “Мир”, 1975. 368 с.
7. Zhang Z. Nano/microscale Heat Transfer. N.Y.: McGraw — Hill, 2007. 761 с.
8. Lee Y.-S. Principles of Terahertz Science and Technology. N.Y.: Springer Science+Business Med, 2009. 340 с.
9. Андреев Р.С. Взаимосвязь характеристик инфракрасного температурного портрета с метаболическими показателями у спортсменов: Дис. ... канд. биол. наук. М.: ГЦОЛИФК. 2013. 116 с.
10. Царев М.В. Генерация и регистрация терагерцового излучения ультракороткими лазерными импульсами: Учебное пособие. Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2011. 75 с.
11. Кочкуров Л.А. Генерация терагерцового излучения методами внутрирезонаторного преобразования частоты в двухволновых полупроводниковых и волоконных лазерах: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Саратов: СГТУ, 2016. 112 с.

12. *Carter M. Armstrong.* The Truth About Terahertz. IEEE Spectrum, 20 Aug 2012 // IEEE Spectrum. <http://spectrum.ieee.org/aerospace/military/the-truth-about-terahertz>
13. *Черкасова О.П., Сердюков Д.С., Ратушняк А.С., Немова Е.Ф., Козлов Е.Н., Шидловский Ю.В., Зайцев К.И., Тучин В.В.* Механизмы влияния терагерцового излучения на клетки (обзор) // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. № 6. С. 852.
14. *Irving P. Herman* Physics of the Human Body. N.Y.: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. 845 с.
15. *Zhang X.C., Xu J.* Introduction to THz Wave Photonics. N.Y.: Springer, 2010. 248 p.
16. *Иляков И.Е.* Исследование новых схем генерации и детектирования терагерцового излучения, основанных на взаимодействии фемтосекундных лазерных импульсов твердотельными и газовыми средами: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Н. Новгород: ИПФ РАН, 2015. 123 с.
17. *Кульчицкий Н.А., Наумов А.В., Старцев А.В., Демьяненко М.А.* Современное состояние и перспективы детекторов в терагерцовом диапазоне. Часть 1. Прямое детектирование терагерцового излучения // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9. № 1. С. 68.
18. *Хохлов Д.Р.* Т-лучи: физика и возможности применения. URL: <https://phys.msu.ru> (Дата обращения 23.01.2023).
19. *Шульженко А.А., Модестов М.Б.* Моделирование тепловых процессов в нагревательной системе // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. № 2. С. 116. <https://doi.org/10.31857/S0235711921020140>
20. *Шульженко А.А., Модестов М.Б.* Моделирование тепловых процессов при переменных краевых условиях в многослойной тонкой стенке: человек—тканый электронагреватель—внешняя среда // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. № 5. С. 75. <https://doi.org/10.31857/S0235711922040137>
21. *Жуковский В.С.* Основы теории теплопередачи. Л.: Энергия, 1989. 224 с.
22. *Шульженко А.А., Модестов М.Б.* Моделирование реакции человека на тепловое воздействие // Вестник научно-технического развития. 2017. № 5. С. 23.
23. *Eugene H. Vissler* Human. Temperature. Control. B. Springer, 2018. 425 с.