

УДК 621.036:681.20

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАКЦИИ ЭКСТЕРОРЕЦЕПТОРОВ ЧЕЛОВЕКА НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕПЛОВЫХ СИГНАЛОВ

© Александр Анатольевич Шульженко, Михаил Борисович Модестов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
им. А.А.Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

aa_shulzhenko.01@mail.ru

Аннотация. Получены данные, определяющие возможность измерения в динамике изменений температур при отображении потовой реакции человека на тепловой сигнал, а также наличие оптимального промежутка между телом человека и нагревателем, что может позволить добиться наибольшей чувствительности при измерении. При исследовании применялась методология, разработанная и запатентованная сотрудниками ИМАШ РАН. Данная работа может быть интересна разработчикам медицинской аппаратуры и широкому кругу медицинских работников.

Ключевые слова: потовыделение, термочувствительный, экстерорецептор, термосопротивление, температура, измерение температуры, тканый электронагреватель.

A METHOD FOR STUDYING THE REACTION OF HUMAN EXTERORECEPTORS TO THE EFFECTS OF THERMAL SIGNALS

© A.A. Shul'zhenko, M.B. Modestov

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

aa_shulzhenko.01@mail.ru

Abstract. Data were obtained that determine the possibility of measuring the dynamics of temperature changes when displaying a person's sweat reaction to a heat signal, as well as the presence of an optimal gap between the person's body and the heater, which can achieve the greatest sensitivity during measurement. In the study, a methodology developed and patented by the staff of IMASH RAN was used. This work may be of interest to developers of medical equipment and a wide range of medical workers.

Keywords: perspiration, thermosensitive, exteroceptor, thermoresistance, temperature, temperature measurement, woven electric heater.

В последнее время все большее распространение получают тканые электронагреватели, и это закономерно. Основным преимуществом этих нагревателей является возможность осуществлять экономичный нагрев объектов. Происходит это за счет использования метода контактного нагрева, который обеспечивается применением в качестве тепловыделяющих элементов высокоэластичных углеродных нитей, что позволяет производить непосредственный обогрев объекта без дополнительных теплоносителей.

Сотрудниками ИМАШ РАН была разработана технология изготовления тканых электронагревателей [1].

Как оказалось, тканые электронагреватели играют роль не только нагревателей, а и могут служить в качестве датчиков температурных изменений, происходящих в области их нахождения. Рассмотрим, как можно осуществлять с помощью нагревателей отслеживание реакции человека, в виде потовыделений, и какие характеристики возможно получать.

Для этого, сначала получим экспериментальную тепловую характеристику тканого электронагревателя, находящегося на поверхности стола (рис. 1), с тем, чтобы в дальнейшем можно было отследить возможные отклонения.

Такая характеристика была описана в работе [2]. Она представляет собой экспоненциальную кривую и в точности соответствует одномерному решению уравнения Фурье [2]

$$T = T_{cp} + \frac{P}{\alpha_1 \cdot S \cdot h} \cdot (1 - e^{-ht}) \quad \text{при } t > 0 \quad (1)$$

P – мощность электронагревателя; S – площадь поверхности тканого электронагревателя; h – постоянный коэффициент; α_1 – коэффициент теплоотдачи во внешнюю среду; t – текущее значение времени; T_{cp} – температура внешней среды.

Таким образом, тепловое воздействие на человека осуществляется с помощью нагревателя, обладающего строго определенным, экспоненциальным ростом температуры, согласно (1).

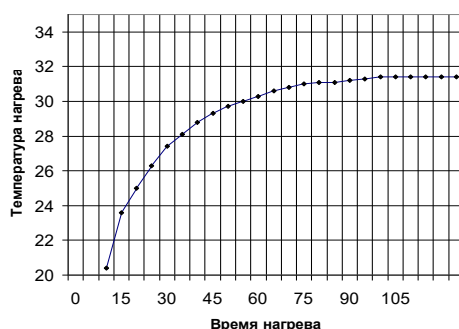


Рис. 1. Температурные изменения, происходящие на внутренней поверхности тканого электронагревателя, находящегося на столе.

Аналогичный, экспоненциальный характер изменения температуры у нагревателя происходит и на поверхности биологического объекта, в частности, человека (рис. 2), но при несколько других граничных условиях, на что указывает и измененный температурный режим.

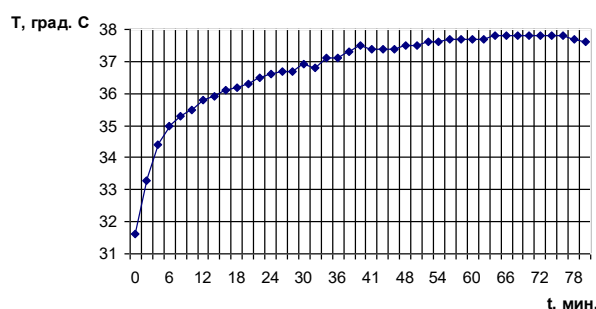


Рис.2. Температурные изменения, происходящие на поверхности нагревателя при подаче теплового сигнала на тело человека (при отсутствии промежутка между телом человека и нагревателем).

Таким образом, наличие непосредственно на поверхности тела нагревателя – недостаточное условие для возникновения изменений, связанных с потовыделением.

Теперь рассмотрим, как изменятся температурные характеристики, если тканый электронагреватель немного отодвинуть от поверхности тела человека, а измерения температур так же производить на его поверхности. Как видно на рис. 3, возникают колебания температуры.

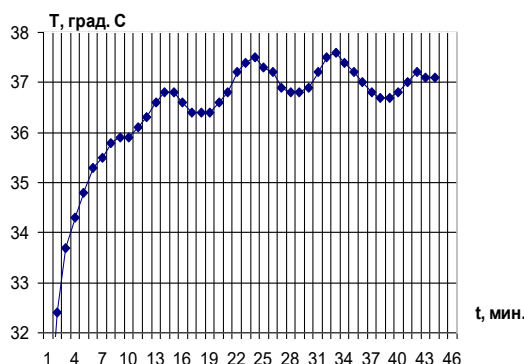


Рис. 3. Температурные изменения, происходящие на поверхности нагревателя при подаче теплового сигнала на тело человека при наличии промежутка между телом человека и нагревателем.

За счет чего происходят эти изменения? Так как расстояние между телом человека и нагревателем небольшое, а длина и ширина поверхности нагревателя намного больше его, то можно считать, что имеем дело с тонкими стенками, и тепловой процесс можно рассматривать как одномерный.

Между телом человека и нагревателем появляется область (рис. 4, между точками 0 и 11), обладающая некоторым тепловым сопротивлением [3].

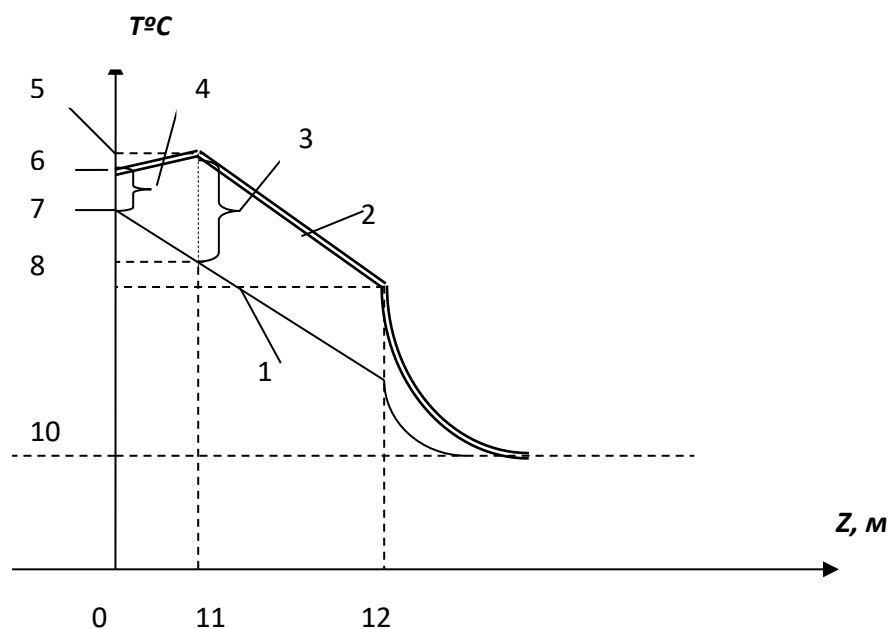


Рис. 4. Распределение температур в системе человек -нагреватель -внешняя среда.

1 - при выключенном нагревателе; 2 – при включенном нагревателе; 3 - $\Delta t_{нагр}$ – температура нагрева собственно нагревателя; 4 - Δt_k – разность температур на поверхности кожи при включенном и выключенном нагревателе; 5 - $t_{нагр}$ – температура на поверхности нагревателя при включенном нагревателе; 6 - $t_k_{нагр}$ – температура на поверхности кожи при включенном нагревателе; 7 - t_1 - температура в области нагревателя при выключенном нагревателе; 8 - t_2 – температура на поверхности нагревателя при выключенном нагревателе; 9 - t_{cp} – температура на поверхности нагревателя со стороны внешней среды; 10 – температура внешней среды; 0 – поверхность кожи человека; 11 – месторасположения собственно нагревателя; 0-11 - промежуток между нагревателем и поверхностью кожи; 11-12 - $\delta_{общ}$ общая толщина нагревателя (она складывается и толщины собственно нагревателя $\delta_{нагр}$ и внешнего теплоизоляционного слоя $\delta_{изол}$, то есть $\delta_{общ} = \delta_{нагр} + \delta_{изол} \approx \delta_{изол}$, так как $\delta_{нагр} \rightarrow 0$).

При генерации тепла нагревателем происходит воздействие теплового сигнала на тело человека, на его тепловые экстерорецепторы. Как уже отмечалось, температура самого нагревателя изменяется по экспоненте. При температурах ниже 33°C, в области между телом человека и нагревателем, тепловое сопротивление в этой области не изменяется, и температура растет по экспоненте. При достижении температуры 33°C происходит срабатывание экстерорецептора, и выделяется пот. В промежутке между телом человека и нагревателем происходит изменение теплового сопротивления за счет выделения пота и его испарения, что приводит к появлению колебательных изменений температуры [4]. На рис. 3 видно, что на экспоненциальный рост температуры самого нагревателя накладывается колебательный процесс, связанный с изменением теплового сопротивления промежутка между нагревателем и телом человека. Данный процесс был подробно рассмотрен в работе [2].

Результаты моделирования приведены ниже

$$\left\{ \begin{array}{l} T_n = T_{cp} \text{ при } t \geq 0 \\ T = T_n + \frac{P}{\alpha_{возд} \cdot S \cdot h} \cdot (1 - \exp(-ht)) \text{ при } 0 \leq t < t_{n61} \\ T = T_n + \frac{P}{\alpha_{возд} \cdot S \cdot h} \cdot \left\{ \begin{array}{l} [(1 - \exp(-ht_{n61}) - \exp(-ht_{n61})) / ((\alpha_{ном} / \alpha_{возд}) \cdot \exp(-gt_{n61}) - 1)] + \\ + \exp(-h(t_{n61} - t)) / (((\alpha_{ном} / \alpha_{возд}) \cdot \exp(-g(t_{n61} - t))) - 1) \end{array} \right\} \\ \text{при при } t_{n61} + 2 \cdot n \cdot (t_{ucn} - t_{ns}) \leq t \leq t_{ucn} + (2 \cdot n - 1) \cdot (t_{ucn} - t_{ns}) \end{array} \right. ,$$

$\alpha_{возд}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности тканого электронагревателя в среду, заполненную воздухом; $\alpha_{ном}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности тканого электронагревателя в среду, заполненную потом; g_n – постоянный коэффициент; t_{ucn} – время, от момента выделения пота до момента его полного испарения.

и показаны на рис. 5.

Еще одним важным условием для обеспечения возможности измерения с помощью рассматриваемого метода являются требования к самому нагревателю. Подобные отслеживания температурных изменений во времени, что полностью согласуется с уравнением Фурье [2], могут происходить в области нахождения тканого электронагревателя, исключительно благодаря его инерциальным, а точнее, малоинерциальным свойствам. В уравнении это свойство отражает коэффициент температуропроводности.

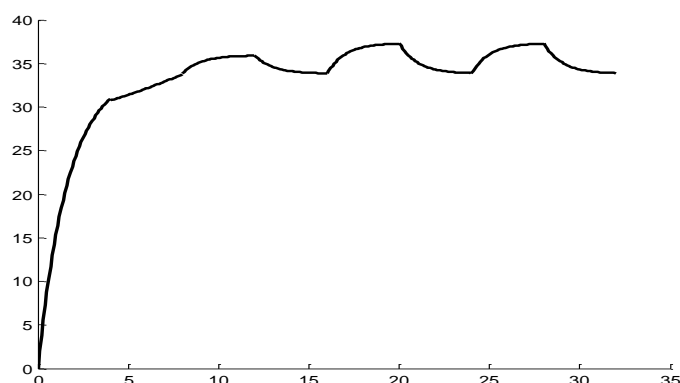


Рис. 5. График изменения температуры на поверхности тепловой модели тканого электронагревателя.

Теперь рассмотрим, как будет изменяться амплитуда колебаний температуры в области расположения нагревателя, когда нагреватель находится на разных расстояниях от поверхности тела человека. Как уже было показано, непосредственно на теле человека никаких колебаний температуры во времени при наличии потовыделения не происходит (рис. 2), а при возникновении некоторого промежутка между телом человека и нагревателем появляются колебания температур (рис. 3).

В общем случае можно считать, что нагреватель может находиться на расстоянии от тела человека $0 \leq \delta_1 + \delta_2 \leq \infty$, где δ_1 - максимально возможное расстояние, которое заполняется потом в промежутке между нагревателем и телом человека, а δ_2 - расстояние в промежутке, которое никогда не заполняется потом.

Причем, с ростом расстояния в интервале $0 \leq \delta \leq \delta_1$ между телом человека и нагревателем, растет и амплитуда колебаний температуры, что подтверждено экспериментально (рис. 6, кривые T1, T2). Это связано с тем, что в пространстве между телом человека и нагревателем увеличивается принимающая в тепловом процессе часть от всего выделенного пота, а тепловой сигнал при таких малых расстояниях изменяется незначительно. Такой характер изменения температур сохраняется до момента, когда при расстоянии δ_1 , данное пространство, полностью заполнится всем выделенным потом.

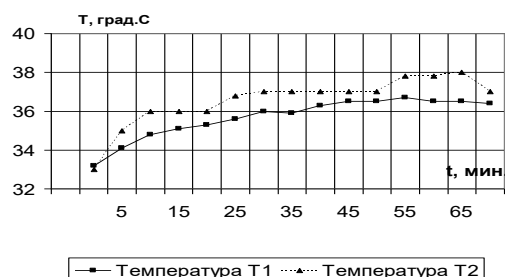


Рис. 6. График измерений температур в промежутке между телом человека и нагревателем, в области потовыделения, $0 \leq \delta \leq \delta_1$: T1 – промежуток $\delta = \delta_1^1$; T2 – промежуток $\delta = \delta_1^2$, где $\delta_1^1 < \delta_1^2$.

При дальнейшем увеличении расстояния δ (в интервале $\delta_1 \leq \delta \leq \infty$) между нагревателем (напомним, что термопара находится на поверхности нагревателя) и телом человека, характер температурной зависимости изменяется. Чем больше промежуток между телом человека и нагревателем, тем меньше амплитуда колебаний. Связано это с тем, что доля выделяемого пота будет занимать все меньший объем в этом промежутке, а все больший объем будет занимать воздух, и, следовательно, амплитуда изменений температуры будет все меньше.

Таким образом, уровни изменения амплитуд колебаний температуры в зависимости от изменения промежутка (между нагревателем и поверхностью тела человека), сначала, с ростом промежутка, будут расти (рис. 2, 3 и 6), а затем, уменьшаться.

Следовательно, существует некоторый промежуток, при котором амплитуда изменений температуры, при потовыделении будет максимальна (рис. 7).

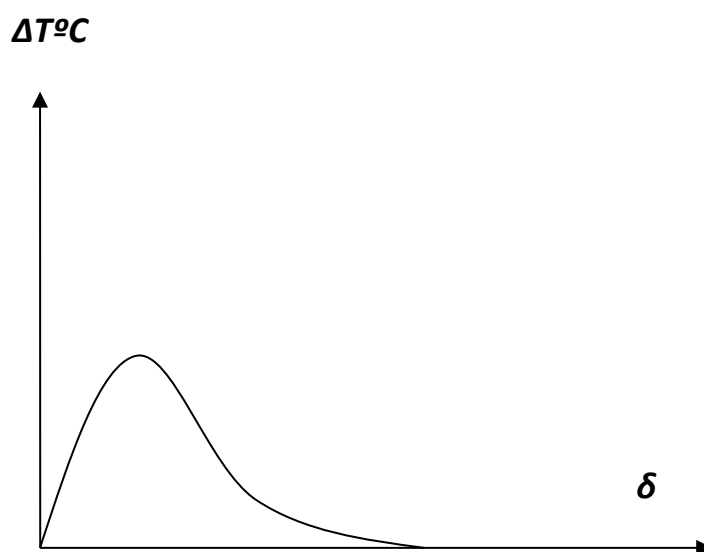


Рис. 7. Изменение значений амплитуд изменений температуры в области тканого электронагревателя в зависимости от расположения относительно тела человека нагревателя, с размещенной на нем термопарой, при фиксированной его мощности теплового сигнала.

$\Delta T^{\circ}\text{C}$ – текущее значение амплитуды температуры; δ – расстояние (промежуток) между нагревателем и поверхностью тела человека.

Выводы. Апробация метода, построенного на воздействии теплового сигнала нагревателя, расположенного непосредственно на человеке, при одновременном отслеживании изменения температуры на поверхности нагревателя, показала: возможность фиксировать реакцию человека, в виде потовыделения.

Данный метод позволяет не только фиксировать реакцию человека на тепловой сигнал, как это делается в случае использования методов КГР, а и получать более полную картину изменений температур во времени.

Для обеспечения функционирования метода использовались нагреватели, обладающие малой тепловой инерцией, что позволяло отслеживать как прямые температурные изменения, так и происходящие под воздействием различных тепловых параметров в близлежащих с нагревателем областях (в нашем случае – теплового сопротивления в промежутке между телом человека и нагревателем).

Для отслеживания потовой реакции на поверхности тела обязательно требуется наличие промежутка между телом человека и нагревателем.

При выборе промежутка между нагревателем и телом человека необходимо учитывать наличие оптимальных расстояний промежутка, тогда это позволит добиться максимальных значений амплитуд колебаний температур при измерении реакции человека на тепловой сигнал.

По уровню амплитуды температурных колебаний, вызванных обратной реакцией организма человека на воздействие эталонного теплового сигнала нагревателя, можно производить количественные сопоставления об объеме потовыделения.

Примененный нагреватель производил нагрев в локальной области, что позволяет проводить исследования на отдельных участках тела человека.

Данный метод позволяет проводить многоканальные измерения:

- при обеспечении нагрева значительных поверхностей тела человека, что позволяет использовать несколько термодатчиков в различных областях тела, покрываемых нагревателем;
- при одновременном использовании нескольких нагревателей с термодатчиками, расположенных в различных областях тела человека и обеспечивающих различные уровни теплового воздействия и т.д.

Проведенные эксперименты подтвердили результаты ранее проведенного моделирования реакции человека на тепловой сигнал.

Предлагаемый метод может представлять интерес для специалистов в области биологии и медицины.

Список литературы

1. Шульженко А.А., Корнев В.Н., Модестов М.Б. Электронагревательная ткань, нагревательный элемент на ее основе и средство соединения нагревательного элемента с источником электропитания (варианты)// Патент РФ № 2145984. 2000. Бюллетень № 6. - 24 с.
2. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Моделирование реакции человека на тепловое воздействие// Вестник научно-технического развития. – 2017. - № 5. - С. 23-33.
3. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Математическая модель нестационарных, нелинейных тепловых процессов в системе: человек- тканый электронагреватель – внешняя среда// XVIII международный симпозиум «Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем» DYVIS-2015. Сборник трудов. - ИМАШ РАН. – 2015. - С.316-322.
4. Шульженко А.А., Модестов М.Б., Модестов Б.М. Способ измерения реакции потовых желез человека при наличии теплового воздействия// Патент РФ № 2578864. 2016. Бюллетень № 9.

Дата поступления: 4 декабря 2019 г.