

---

---

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В МАШИНОСТРОЕНИИ**

---

---

УДК 536.2:518.355.4

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ  
ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ КРАЕВЫХ УСЛОВИЯХ  
В МНОГОСЛОЙНОЙ ТОНКОЙ СТЕНКЕ:  
ЧЕЛОВЕК–ТКАНЫЙ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬ–ВНЕШНЯЯ СРЕДА**© 2022 г. А. А. Шульженко<sup>1,\*</sup>, М. Б. Модестов<sup>1</sup><sup>1</sup>*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия**\*e-mail:aa\_shulzhenko.01@mail.ru*

Поступила в редакцию 15.02.2022 г.

После доработки 05.04.2022 г.

Принята к публикации 20.04.2022 г.

Проводилось моделирование реакции человека на тепловой сигнал тканого электронагревателя. Изменения температуры во времени отслеживались в пространстве, представляющем тонкую стенку между поверхностью тела человека и внешней средой. Новизна исследования заключается в попытке представить тело человека активным элементом такой системы, которое обладает способностью не только осуществлять потовыделение, но и подключать другие механизмы терморегуляции. При синтезе сигналов и анализе результатов имитационного моделирования проводилось их сопоставление с результатами ранее проведенных натурных испытаний. Статья может представлять интерес для широкого круга специалистов, занимающихся исследованием системы терморегуляции человека, физиологией.

*Ключевые слова:* тканый электронагреватель, терморегуляция человека, тепловая система, тонкая стенка, физиология

**DOI:** 10.31857/S0235711922040137

В медицине, в настоящее время, используются самые различные методы исследования человека с помощью тепловых воздействий и с применением различных устройств, позволяющих контролировать температурные изменения, вызванные включением системы терморегуляции, ее подсистем.

Среди них – метод, при котором изменения температуры кожи вызывались за счет падающего лучистого теплового потока. Температура окружающей среды варьировалась в пределах 30.5–36.0°C [1].

Хорошо известен неинвазивный метод измерения средней температуры тела и средней температуры кожи при двух температурах окружающей среды во время физических упражнений. При этом методе стимуляция тепловых изменений в организме обеспечивалась не только за счет температуры окружающей среды, но и за счет физических упражнений и восстановления после них [2, 3].

При проведении тепловых исследований применялся полуинвазивный метод, построенный на использовании телеметрической таблетки. При использовании такого метода была получена более быстрая реакция на изменение температуры ядра, чем при использовании зонда [4], однако, перемещение таблетки носит непредсказуемый характер, что вызывает и непредсказуемое влияние на температурные измерения.

Еще один метод изучения теплового состояния организма человека при различных функциональных пробах – метод динамической инфракрасной термографии. Метод является неинвазивным. Он позволяет с помощью тепловизора получать термограммы, т.е. инфракрасные тепловые поля, как поверхности всего тела, так и его отдельных частей, изменяющихся во времени [5, 6].

Проводились измерения температуры барабанной перепонки с помощью пироэлектрических ушных термометров, которые измеряют инфракрасную энергию, излучаемую барабанной перепонкой пациента за откалиброванный промежуток времени. Данный метод является неинвазивным. Однако, как и предыдущий, он производит только фиксацию температуры при устоявшейся температуре внешнего воздействия [7].

Довольно часто используется инвазивный метод теплового исследования человека при осуществлении внешнего воздействия водяных тепловых ванн при различных температурах. В этом случае, измерение температур проводится с помощью игольчатой термопары длиной 2.5 см, вводимой через мышцу предплечья до тех пор, пока она не достигала кости [8]. Подкожные температуры измерялись на плохо определяемых глубинах с помощью второй термопары, вставленной наклонно в предплечье.

Инвазивные методы с использованием термодов также получили практическое распространение [9].

Все рассмотренные методы обладают недостатками, т.к.: или они носят инвазивный характер; или при их реализации необходим объемный теплоноситель, применение которого существенно снижает эффективность получения отклика на тепловое воздействие; или они используются для определения теплового состояния при фиксированной температуре на поверхности тела.

Способность высокоэластичных компактных тканых электронагревателей обеспечивать контактным способом нарастающий, прецизионный нагрев исследуемого объекта, как целиком, так и его отдельных частей, создает предпосылки для их использования не только в изделиях технического назначения, но и в медицине.

Например, существует проблема получения количественного представления о тепловых процессах, происходящих на поверхности тела человека при температурах более 38°C [10].

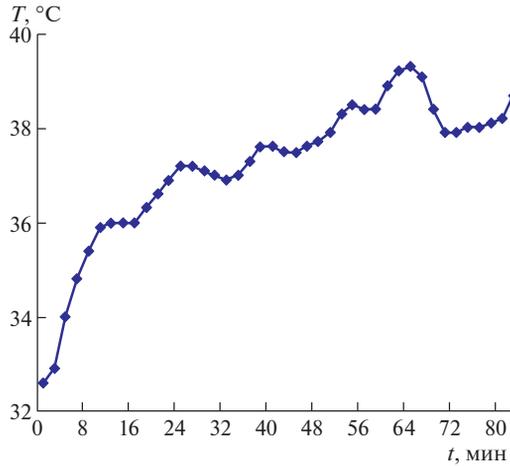
Использование тканых электронагревателей, расположенных на теле человека, с термопарами на их поверхностях, при проведении натурных испытаний позволило получить неинвазивным путем количественные данные о тепловых изменениях в этом диапазоне температур [11].

На рис. 1 показаны результаты натурных испытаний. Режим потовыделения начинается уже на второй минуте температурных изменений, происходящих в теле человека, и продолжается до конца эксперимента. При достижении температуры 38.4°C (58 минута) наблюдаются дополнительные тепловые изменения на поверхности тела человека (сначала рост, а затем снижение температуры ниже уровня 38.4°C).

В области тепловой системы, представляющей собой тонкую стенку, действовали следующие источники тепла, и находились слои, где возможно было изменение параметров, зависящих от уровня воздействующих температур: внешняя окружающая среда, тканый электронагреватель, тело человека, промежуток между телом человека и тканым электронагревателем, в котором происходит изменение параметров, вызванное потовыделением.

Однако, видимых причин к подъему температур в области 58 минуты со стороны всех перечисленных источников, способных вызвать этот подъем температур в системе, кроме самого человека, нет [11]. Поэтому, можно предположить, что при достижении температуры 38.4°C человек сам осуществляет генерацию тепла.

Дополнительным подтверждением наличия генерации тепла являются сведения, ранее установленные исследователями системы терморегуляции человека, о том, что при температуре на поверхности тела, превышающей 38°C, наблюдается повышение



**Рис. 1.** Результаты натурных испытаний при подаче на человека теплового сигнала до уровня более 38°C и большой длительности сигнала, генерируемого тканым электронагревателем.

частоты импульсации терморцепторов человека, что свойственно терморцепторам при подъеме температуры [12, 13].

Полученные экспериментальные данные фиксируют наличие температурного подъема в теле человека. Однако расплывчивость характера температурных изменений, возникающих за счет сложного пути прохождения, как сигнала нагревателя, так и отклика на тепловое воздействие нагревателя в области тепловой системы, расположенной на поверхности тела человека, не позволяет получить более четкое представление о тепловой реакции, происходящей в теле человека.

**Целью** настоящей статьи является получение более четкого теплового сигнала, соответствующего реакции тела человека на воздействующий тепловой сигнал тканого электронагревателя.

Для более детальной расшифровки данных, полученных с помощью натурных испытаний, будем использовать математический эксперимент. При эксперименте на математическую модель тепловой системы со стороны человека подаются сигналы, имитирующие тепловую реакцию тела человека. Затем, уже полученный в области тепловой системы (в нашем случае – в области тканого электронагревателя, т.к. во время эксперимента терморпары располагались именно там) суммарный тепловой сигнал сравнивается с результатами натурных испытаний. Совпадение этих результатов будет говорить о соответствии модели теплового сигнала действительным тепловым процессам, поступающим со стороны тела человека.

При осуществлении математического эксперимента очень важно сделать правильное, наиболее близкое к реальному состоянию описание тепловой системы, в пределах которой проводились натурные испытания, и будет проводиться имитационное моделирование.

**Сформулируем математическую задачу.** Будем рассматривать тепловую систему в виде тонкой стенки, расположенной по оси  $X$  от  $x_0$  до  $x_3$ , имеющую следующую структуру: поверхность тела человека—промежуток между этой поверхностью и тканым электронагревателем—тканый электронагреватель—внешний теплоизоляционный слой—внешняя окружающая среда. Тепловые процессы будем рассматривать не только вдоль пространственной оси, расположенной по нормали к площади поверхности тонкой стенки, но и во времени. Уровни суммарных температур, создаваемые при

проведении исследования на поверхности тела, не превышают привычные для человека. Внешней средой с одной стороны тонкой стенки является окружающая среда. Будем полагать, что температура окружающей среды в процессе всего рассмотрения не меняется и равна  $T_{sr}$ . При моделировании будем оперировать разностями температур относительно температуры окружающей среды  $T_{sr}$ . С другой стороны тонкой стенки, будем считать, что внешней средой является человек, т.к. габариты его много больше площади поверхности исследуемой тонкой стенки. Данная внешняя среда является активной. Она способна реагировать на тепловые воздействия со стороны тканого электронагревателя, также являющегося активным элементом тонкой стенки. Изменения температуры тела человека во времени, происходящие за счет внутренних тепловых процессов, будем представлять, в виде

$$\begin{cases} \Delta T_{ch}(t, x) = \Delta T_{ch1}, & \text{при } t = 0, \quad x = x_0, \\ \Delta T_{ch}(t, x) = \Delta T_{ch}(t), & \text{при } t > 0, \quad x = x_0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\Delta T = T - T_{sr}$ ;  $T$  – текущее значение температуры;  $\Delta T_{ch}(t) = T_{ch}(t) - T_{sr}$  – текущее значение разности температуры на поверхности человека относительно температуры внешней среды;  $T_{ch1}$  – значение температуры на поверхности тела человека в начальный момент времени;  $T_{ch}$  – текущее значение температуры в области поверхности тела человека;  $\Delta T_{ch1} = T_{ch1} - T_{sr}$  – разность температур на поверхности тела человека в начальный момент времени относительно температуры внешней среды;  $t$  – текущее значение времени;  $x$  – текущее значение расстояния по оси  $X$ , расположенной по нормали по отношению к поверхности тонкой стенки;  $x_0$  – координата в тонкой стенке на поверхности тела человека.

Граничные условия на теле человека, в которые входит переменная температура тела человека, можно записать

$$-\lambda_1 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = -\alpha_{ch} k (\Delta T_{ch}(t) - \Delta T) \quad \text{при } t > 0, \quad x = x_0, \quad (2)$$

где  $\alpha_{ch}$  – теплоотдача во внешнюю среду (в тело человека);  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Для описания тепловых процессов, происходящих в слое – в промежутке между телом человека и тканым электронагревателем, будем использовать одномерное уравнение Фурье с переменным во времени коэффициентом теплопроводности, т.к. в этой области происходит потовыделение и дальнейшее испарение пота существенно изменяющее этот коэффициент

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial \Delta T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_1(t) \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \right) \quad \text{при } t > 0, \quad x_0 < x < x_1, \quad (3)$$

где  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности среды промежутка между телом человека и тканым электронагревателем;  $\rho_1$  – плотность среды промежутка;  $c_1$  – теплоемкость среды промежутка;  $x_1$  – координата по оси  $X$  на поверхности нагревателя со стороны промежутка.

Для отражения температурных изменений в области тканого электронагревателя будем использовать одномерное уравнение Фурье с внутренним источником

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial \Delta T}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} + q_v \quad \text{при } t > 0, \quad x_1 < x < x_2, \quad (4)$$

где  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности материала нагревателя;  $\rho_2$  – плотность материала теплового источника;  $c_2$  – теплоемкость материала теплового источника;  $q_v$  – теплопродукция внутреннего источника;  $x_2$  – координата по оси  $X$  на поверхности нагревателя со стороны теплоизоляционного слоя.

Тепловые процессы в области теплоизоляционного слоя описываются с помощью одномерного уравнения Фурье

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial \Delta T}{\partial t} = \lambda_3 \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} \quad \text{при } t > 0, \quad x_2 < x < x_3, \quad (5)$$

где  $\lambda_3$  – коэффициент теплопроводности материала теплоизоляционного слоя;  $\rho_3$  – плотность материала теплового источника;  $c_3$  – теплоемкость материала теплового источника;  $x_3$  – координата по оси  $X$  на внешней поверхности теплоизоляционного слоя.

Так как размеры тонкой стенки крайне малы, то на границе между промежутком и тканым электронагревателем будем использовать граничные условия IV рода

$$\begin{cases} -\lambda_1 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = -\lambda_2 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \Big|_{x=x_1} & \text{при } t > 0, \quad x = x_1, \\ \Delta T_{h1}(t, x) = \Delta T_{i1}(t, x) & \text{при } t > 0, \quad x = x_1, \end{cases} \quad (6)$$

где  $\Delta T_{h1}$  – разность температур со стороны промежутка в точке  $x_1$  и внешней среды;  $\Delta T_{i1}$  – разность температур нагревателя и внешней среды в точке  $x_1$ .

Между тканым электронагревателем и теплоизоляционным слоем, также будем применять граничные условия IV рода

$$\begin{cases} -\lambda_2 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \Big|_{x=x_2} = -\lambda_3 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \Big|_{x=x_2} & \text{при } t > 0, \quad x = x_2, \\ \Delta T_{h2}(t, x) = \Delta T_{i2}(t, x) & \text{при } t > 0, \quad x = x_2, \end{cases} \quad (7)$$

где  $\Delta T_{h2}$  – разность температур на поверхности нагревателя со стороны нагревателя и внешней среды;  $\Delta T_{i2}$  – разность температур на поверхности нагревателя со стороны теплоизоляционного слоя и внешней среды в точке  $x_2$ .

На границе теплоизоляционного слоя и внешней окружающей среды будем использовать граничные условия III рода

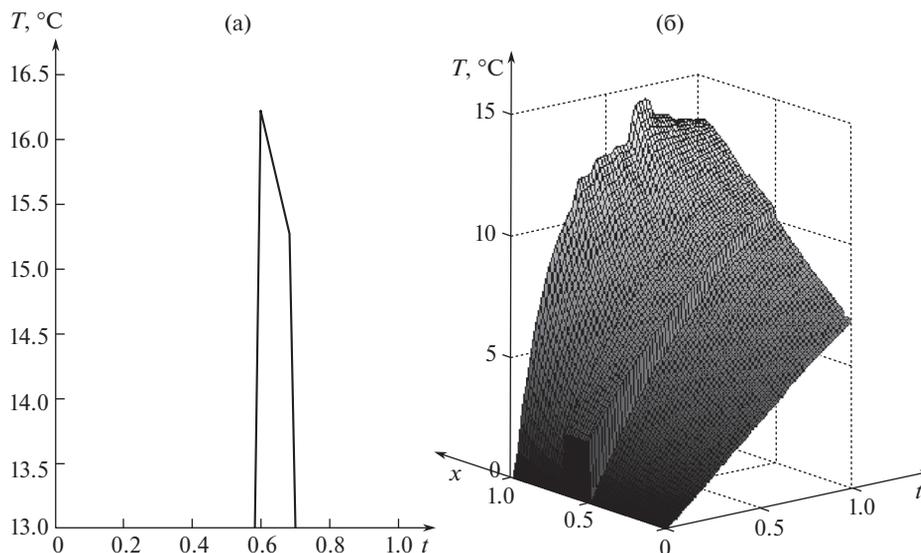
$$-\lambda_3 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = -\alpha_{sr} \Delta T \quad \text{при } t > 0, \quad x = x_3, \quad (8)$$

где  $\alpha_{sr}$  – теплоотдача в окружающую среду.

В целом, сформулированную задачу с помощью (1)–(8), можно представить выражением

$$\begin{cases} \Delta T = \Delta T_{ch} = \Delta T_{chl} & \text{при } 0 = t, \quad x = x_0, \\ \Delta T = \Delta T_{ch}(t), & \text{при } t > 0, \quad x = x_0, \\ \Delta T = \Delta T_{sr} = 0 & \text{при } t = 0, \quad x = x_3, \\ -\lambda_1 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = -\alpha_{ch} k (\Delta T_{ch}(t) - \Delta T) & \text{при } t > 0, \quad x = x_0, \\ \rho_1 c_1 \frac{\partial \Delta T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_1(t) \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \right) & \text{при } t > 0, \quad x_0 < x < x_1, \\ -\lambda_1 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \Big|_{x=x_1} = -\lambda_2 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \Big|_{x=x_1} & \text{при } t > 0, \quad x = x_1, \\ \Delta T_{h1}(t, x) = \Delta T_{i1}(t, x) & \text{при } t > 0, \quad x = x_1, \\ \rho_2 c_2 \frac{\partial \Delta T}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} + q_v & \text{при } t > 0, \quad x_1 < x < x_2, \\ -\lambda_2 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \Big|_{x=x_2} = -\lambda_3 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} \Big|_{x=x_2} & \text{при } t > 0, \quad x = x_2, \\ \Delta T_{h2}(t, x) = \Delta T_{i2}(t, x) & \text{при } t > 0, \quad x = x_2, \\ \rho_3 c_3 \frac{\partial \Delta T}{\partial t} = \lambda_3 \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} & \text{при } t > 0, \quad x_2 < x < x_3, \\ -\lambda_3 \frac{\partial \Delta T}{\partial x} = -\alpha_{sr} \Delta T & \text{при } t > 0, \quad x = x_3. \end{cases} \quad (9)$$

Решение задачи (9) возможно при сбалансированности тепловых параметров элементов системы, т.е. при использовании тепловых параметров, обладающих, как пра-



**Рис. 2.** Температурное распределение: (а) – модели создаваемого человеком сигнала, отражающего только генерацию тепла при достаточном уровне теплового воздействия тканого электронагревателя; (б) – суммарный сигнал, распространяющийся в тепловой системе тонкой стенки при воздействии модели сигнала типа (а).

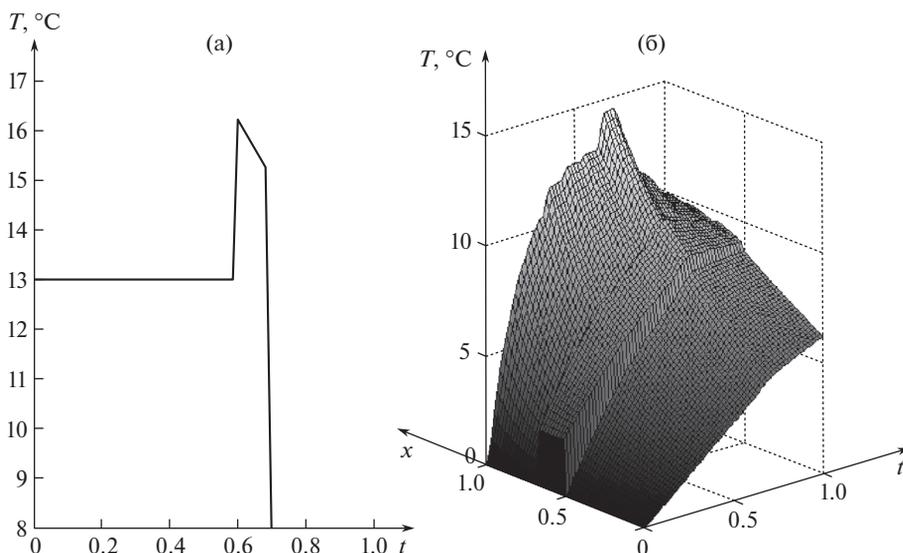
вило, небольшими теплоемкостями и малыми массами в областях: промежутка между телом человека и нагревателем, внешнего изоляционного слоя и нагревателя, а также достаточно высокой теплопроводностью нагревательных элементов [14].

Для получения дополнительного, более четкого представления о реакции человека, соответствующей результатам натуральных испытаний, т.е. к возникновению сначала подъема температуры, а затем, к ее существенному снижению, проведем численный эксперимент с помощью программы, разработанной на основе сформулированной задачи (9).

На тепловую систему со стороны тела человека будем воздействовать тепловым сигналом. Таких тепловых сигналов существует множество. Они могут быть различными по форме, уровню, длительности и времени начала их появления. В настоящей статье ограничимся исследованием некоторых, наиболее вероятных сигналов, вызывающих результирующие реакции суммарных тепловых полей в области тонкой стенки, аналогичные реакциям, полученным в ходе натуральных испытаний. При моделировании воздействия на тепловую систему различных сигналов со стороны тела человека, чтобы получить однозначность при сопоставлении реакции на их воздействие, будем фиксировать все остальные ее параметры.

Рассмотрим воздействие теплового сигнала в виде импульса, показанного на рис. 2а, у которого температура, до подъема и после ее снижения, равна температуре тела  $T_{ch1}$ .

Результат воздействия подобного импульса на тепловую систему показан на рис. 2б. Как видим, после достижения времени  $t = 0.6$ , наблюдается рост температуры, аналогичный росту температуры, полученному при проведении натуральных испытаний (рис. 1). Можно сделать вывод, что при проведении натуральных тепловых испытаний, математического моделирования рассматриваемой тепловой системы и натуральных испытаний активности терморцепторов при воздействии на человека сигнала более  $38^{\circ}\text{C}$  (по результатам натуральных испытаний эта температура была равна  $38.4^{\circ}\text{C}$ ) человек действительно генерирует тепловой сигнал.



**Рис. 3.** Температурное распределение: (а) – модели сигнала, создаваемого человеком, отражающего, как генерацию тепла, так и рост теплоотдачи, при достаточном уровне теплового воздействия тканого электронагревателя; (б) – суммарный сигнал, распространяющийся в тепловой системе тонкой стенки, при воздействии сигнала типа (а).

Однако, сигнал, показанный на рис. 2а, в промежутке между тканым электронагревателем и телом, где обычно располагается термopаpa, не обеспечивает снижения уровня суммарной температуры, аналогичного снижению уровня температуры тела человека, полученному в результате натуральных испытаний (рис. 1). Связано это с тем, что уровень подаваемого сигнала, при его снижении заканчивается на уровне начальной температуры тела человека  $\Delta T_{ch1}$ . В этом случае, никаких дополнительных подключений подсистем, реагирующих на повышение внешних температур, за исключением уже включенного потовыделения, не происходит. Можно сделать вывод, что большее снижение температуры может происходить только при возникновении других реакций на повышение температуры в теле человека.

Теперь подадим на математическую тепловую модель сигнал, показанный на рис. 3а. Он представляет собой скачок температуры на поверхности тела человека от температуры  $\Delta T_{ch1}$ , как и в предыдущем опыте, а, затем, более резкое снижение температуры до значений, лежащих ниже начальной температуры тела человека  $\Delta T_{ch1}$ . Результат такого воздействия на тепловую систему, в виде суммарного теплового сигнала в тепловой системе, продемонстрирован на рис. 3б. Он достаточно точно совпадает с результатом натуральных испытаний.

Таким образом, согласно проведенному моделированию был получен сигнал, приходящий со стороны человека, в котором нашли отражение две его тепловые реакции.

Первая реакция – подъем температуры за счет генерации тепла человеком.

Вторая реакция влечет за собой в области между тканым электронагревателем и телом изменение температуры от максимального значения до минимального значения, находящегося ниже начальной температуры человека  $\Delta T_{ch1}$  (рис. 3а).

Именно эта часть теплового сигнала отражает изменения условий в тепловой системе, которые происходят благодаря включению других подсистем системы терморегуляции в нагреваемой области человека, способных обеспечить подобное снижение

суммарной температуры в тепловой системе за счет повышения теплоотдачи. Согласно ранее проведенным исследованиям [10, 12, 13], к таким подсистемам системы терморегулирования относятся подсистемы, влияющие: на перераспределение крови в организме за счет сужения сосудов “ядра” и расширения сосудов “оболочки” тела; на увеличение объемной скорости кожного кровотока; на увеличение объема циркулирующей крови в подкожных кровеносных сосудах и т.д.

**Выводы.** Контактный метод нагрева тканями электронагревателями тела человека при уровне температур свыше 38°C и длительном времени воздействия создает условия, при которых человек генерирует тепловой подъем и обеспечивает возможность не только измерения уровня этого теплового подъема, но и фиксации всего теплового процесса во времени.

Рост температуры тела человека за счет генерации тепла самим человеком в области температур, превышающих 38°C, проходящий под воздействием теплового сигнала тканого электронагревателя, является командой для включения дополнительных возможностей системы терморегуляции с целью компенсации избыточного внешнего теплового воздействия на человека для поддержания температурного гомеостаза. Об этом говорит и снижение температур, обусловленное включением терморегуляционных процессов, обеспечивающих повышение теплоотдачи.

Применение комбинированного метода с одновременным использованием, как математического моделирования, так и результатов натуральных испытаний, позволило получить в дополнение к результатам натуральных испытаний форму и количественные данные о тепловых изменениях, происходящих у человека, более точно отражающие происходящие физиологические процессы в области температур, превышающих 38°C.

Математическое моделирование процессов, происходящих в тепловой системе – тонкой стенке, позволяет избежать проблем при проведении натуральных испытаний, связанных с небольшими габаритами тепловой системы и возможностью внесения искажений при измерениях.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nadel E.R., Horvath S.M., Dawson C.A., Tucker A.* Sensitivity to control and peripheral thermal stimulation in man // *J. Appl. Physiol.* 1970. V. 29. № 5. P. 603.
2. *Smith C.J., Havenith G.* Body mapping of sweating patterns in male athletes in mild exercise induced hyperthermia // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2011. V. 111. P. 1391.
3. *Teunissen L.P.J., de Haan A., de Koning J.J., Daanen H.A.M.* Telemetry pill versus rectal and esophageal temperature during extreme rates of exercise-induced core temperature change // *Physiol Meas.* 2012. V. 33. P. 915.
4. *Byrne C., Lim C.L.* The ingestible telemetric body core temperature sensor: a review of validity and exercise applications // *Br. J. Sports Med.* 2007. V. 41. P. 126.
5. *Хижняк Л.Н., Хижняк Е.П., Маевский Е.И.* Возможность применения миниатюрных инфракрасных камер нового поколения в медицинской диагностике // *Вестник новых медицинских технологий.* 2018. Т. 25. № 4. С. 101.
6. *Лобанов А.А., Кочкин Р.А., Андронов С.В., Попов А.И., Протасова И.В., Лобанова Л.П., Бичкаева Ф.А., Богданова Е.Н., Кобелькова И.В.* Применение термографии лица и кистей рук для диагностики нарушений адаптации к условиям Арктики // *Вестник новых медицинских технологий.* 2019. № 4. С. 203.
7. *Pušnik I., Drnovšek J.* Infrared ear thermometers – parameters influencing their reading and accuracy // *Physiol Meas.* 2005. V. 26. P. 1075.
8. *Mitsui J., Akimaru T., Miyashita M.* Changes of body temperature at rest and during exercise in water // *J. Free Access.* 1982. V. 31. Iss. 3. P. 178.

9. *Иванов К.П., Минут-Сорохтина О.П., Майстрах Е.В.* Физиология терморегуляции. Л.: Наука, 1984. 470 с.
10. *Morrison S.F., Nakamura K.* Central neural pathways for thermoregulation. *Front Biosci // Landmark Ed.* 2011. V. 1 (16). P. 74.
11. *Shul'zhenko A.A., Modestov M.B.* Temperature response of a person to a heat signal / Editors Z. Hu, S. Petoukhov, M. He / *Advances in Artificial Systems for Medicine and Education book series // The Fourth International Conference of Artificial Intelligence, Medical Engineering, Education.* 2020. V. 1126. P. 149.
12. *Hensel H.* Thermoreception and temperature regulation: Monographs of the Physiological Society. London: Academic Press. 1981. № 38. 321 p.
13. *Евтушенко А.А.* Функциональные изменения активности генов термочувствительных TRP ионных каналов при температурных воздействиях на организм в норме и при артериальной гипертензии: Дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск: НИИФФМ. 2016. 160 с.
14. *Шульженко А.А., Модестов М.Б.* Моделирование тепловых процессов нагревательной системы // *Проблемы машиностроения и надежности машин.* 2021. № 2. С. 116.