

УДК 536.2:518.355.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ СЛОЕВ МНОГОСЛОЙНОЙ ТОНКОЙ СТЕНКИ: ЧЕЛОВЕК – ТКАНЫЙ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬ

© Александр Анатольевич Шульженко¹, Михаил Борисович Модестов¹, Борис Михайлович Модестов¹, Анна Александровна Шульженко²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

²Общество с ограниченной ответственностью «Экометр», Москва, Россия

aa_shulzhenko.01@mail.ru

Аннотация. Проводилось исследование реакции человека на тепловой сигнал тканого электронагревателя. Изменения температуры отслеживались во времени и в представляющем тонкую стенку пространстве: тело человека – тканый электронагреватель – теплоизоляционный слой – внешняя среда. Новизной работы является изучение влияния на передачу реакции человека на тепловое воздействие со стороны тканого электронагревателя изменения тепловых параметров в пределах рассматриваемого пространства. Полученные в ходе натурных испытаний и математического моделирования результаты позволяют оценить граничные возможности применения исследуемого метода. Результаты работы могут представлять интерес для широкого круга специалистов, занимающихся исследованием системы терморегуляции человека, физиологией.

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

SIMULATION OF PROCESSES AT DIFFERENT THERMAL PARAMETERS OF THE LAYERS OF A MULTILAYER THIN WALL: A MAN - A WOVEN ELECTRIC HEATER

© A.A.Shul'zhenko¹, M.B.Modestov¹, B.M.Modestov¹, An.A.Shul'zhenko²

¹Institute of machine science n. a. A. A. Blagonravova Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²“Ecometer” Limited Liability Company, Moscow, Russia

aa_shulzhenko.01@mail.ru

Annotation. A study was made of the human response to the thermal signal of a woven electric heater. Temperature changes were tracked in time and in space representing a thin wall: the human body - a woven electric heater - a heat-insulating layer - the external environment. The novelty of the work is the study of the transfer of a person's reaction to thermal exposure from a woven electric heater within the thermal system: the human body - the gap between the human body and the heater - a woven electric heater - a heat-insulating layer - the external environment. The results

obtained in the course of full-scale tests and mathematical modeling make it possible to estimate the limiting possibility of using the method under study. The results of the work may be of interest to a wide range of specialists involved in the study of the human thermoregulation system.

Keywords: *woven electric heater, human thermoregulation, thermal system, thin wall.*

Широкое распространение тканых электронагревателей стало возможным благодаря их высокоэластичным свойствам и способности обеспечить требуемый уровень обогрева контактным способом, то есть непосредственно на поверхности тела человека, а не через теплоноситель. Данные свойства способствуют возможности их использования не только в технике, а и в медицине.

Особенно важно, что контактный способ позволяет осуществлять, как прецизионный нагрев, так и отслеживать обратную реакцию человека на тепловое воздействие [1].

Ценно и то обстоятельство, что с помощью контактного способа воздействия тканых электронагревателей на биологические объекты, возможно получение информации неинвазивным методом.

Как правило, процессы, происходящие при контактном обогреве, происходят в пространстве с очень маленькими расстояниями между тепловыми слоями (мм и доли мм), что делает затруднительным осуществление натуральных экспериментов по исследованию распространения сигнала. Связано это с тем, что габариты выносных щупов измерительных устройств превышают или соизмеримы с этими линейными размерами, что приводит к внесению существенной дополнительной погрешности при получении количественной информации. Поэтому, целесообразно проведение исследований не только путем натуральных испытаний, а и путем математического эксперимента, позволяющего при учете физических параметров воздействующего сигнала и системы, в которой происходит распространение этого сигнала, получить представления о характере тепловых процессов в этой системе.

Будем рассматривать тепловую систему в виде: тело человека – промежуток между телом человека и тканым электронагревателем – тканый электронагреватель – внешний теплоизоляционный слой – внешняя окружающая среда.

В ходе исследования определим, каким образом изменения в данной тепловой системе: при различной теплоотдаче в тело человека (что происходит при включении дополнительных механизмов терморегуляции человека), при параметрах промежутка между телом человека и тканым электронагревателем, при параметрах внешнего теплоизоляционного слоя на поверхности тканого электронагревателя и расстояний в промежутке между телом человека и тканым электронагревателем, влияют на возможности измерения реакции тела человека на тепловой сигнал. А также определим наиболее удобное расположение измерителей температур в пределах тепловой системы при измерениях различных реакций человека.

Математическая постановка такой задачи была проведена в [2].

В ходе проведения исследований будем использовать разработанную на основе сформулированной задачи программу [3].

Решение этой задачи при условии сбалансированных тепловых параметров системы, то есть, обладающей небольшими теплоемкостями и малыми массами в области промежутка между телом человека и нагревателем, внешнего изоляционного слоя и нагревателя, а также достаточно большой теплопроводностью этих элементов системы, показано на рис. 1.

На этом рисунке хорошо видно, что во временном интервале от 0 до 0,4 температура под воздействием нагревателя нарастает плавно, до уровня 33°C. На этом уровне температур возникает потовыделение. Далее, идут колебания температуры, связанные с потовыделением [2]. Эти колебания продолжаются от уровня температуры 33°C до конца времени теплового

воздействии со стороны нагревателя. При достижении уровня температур, превышающих 38°C (время 0,6), наблюдается дополнительный подъем температуры [4], возникающий за счет генерации тепла телом человека и дающий команду терморепторам кровеносных сосудов на перераспределение крови в организме за счет сужения сосудов «ядра» и расширения сосудов «оболочки» тела; увеличения объёмной скорости кожного кровотока; увеличения объёма циркулирующей крови в подкожных кровеносных сосудах и т.д. [5 - 7]. За счет этих изменений происходит рост теплоотдачи в теле человека, приводящий к падению температуры.

Следует отметить, что все эти явления при подобранных тепловых параметрах хорошо отражаются практически во всем пространстве тепловой системы, в том числе и в области тканого электронагревателя.

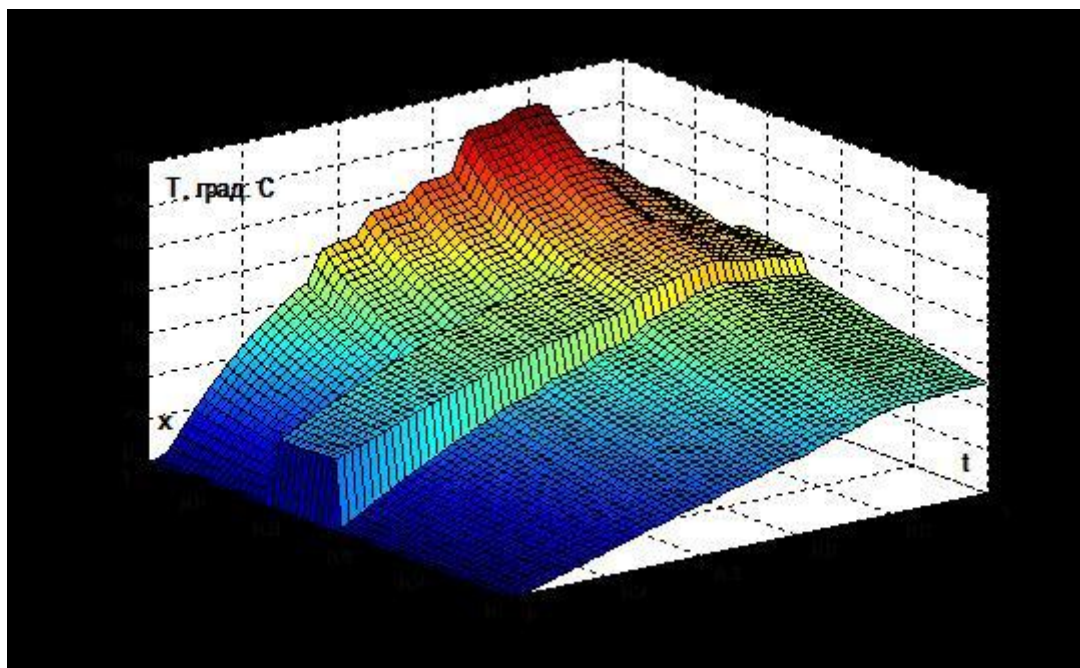


Рис. 1. Характер изменения температуры в области тепловой системы при одновременном потовыделении и других температурных колебаниях у человека, вызванных воздействием теплового сигнала на человека, при низкой теплоемкости и удельной массе: в промежутке между телом человека и тканым электронагревателем, в области самого нагревателя и внешнего теплоизоляционного слоя тканого электронагревателя.

Теперь изменим тепловые параметры в промежутке между телом человека и тканым электронагревателем – увеличим теплоемкость и массу. Используя разработанную программу, получаем результат, показанный на рис. 2.

Как видим, с ростом, теплоемкости и массы веществ, находящихся в промежутке, наблюдаемая обратная реакция человека на тепловой сигнал тканого электронагревателя в виде температурных изменений, вызываемых: потовыделением, генерацией тепла и другими проявлениями, - смещается в сторону тела человека.

Одновременно, амплитуда температурных изменений падает. Причем, падает довольно существенно, и в области нахождения тканого электронагревателя практически пропадает.

Очень интересная картина наблюдается при сохранении всех параметров, как и в случае, показанном на рис. 1, но при более высоком коэффициенте теплоотдачи в тело человека (рис. 3).

Как видно на рис. 3, эффект, связанный с потовыделением, практически полностью исчезает, а эффект, возникающий при генерации тепла телом человека и дальнейшим снижении температуры, остается без изменений.

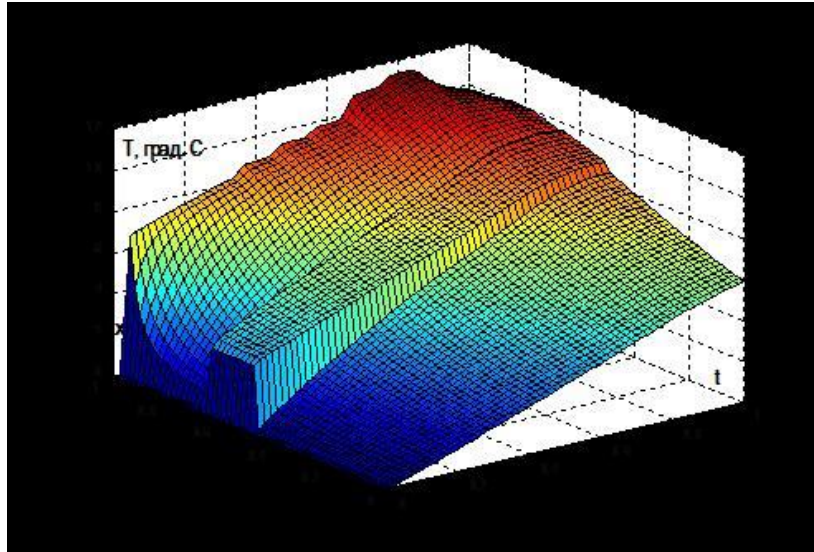


Рис. 2. Характер изменения температуры в области тепловой системы при одновременном потовыделении и других температурных колебаниях тела, вызванных воздействием теплового сигнала на человека, при высокой теплоемкости и удельной массе в промежутке между телом человека и тканым электронагревателем, при этом, в области самого электронагревателя и внешнего теплоизоляционного слоя тканого электронагревателя теплоемкость, удельная масса и теплопроводность остались такими же, как и при проведении опыта, результаты которого изображены на рис.1.

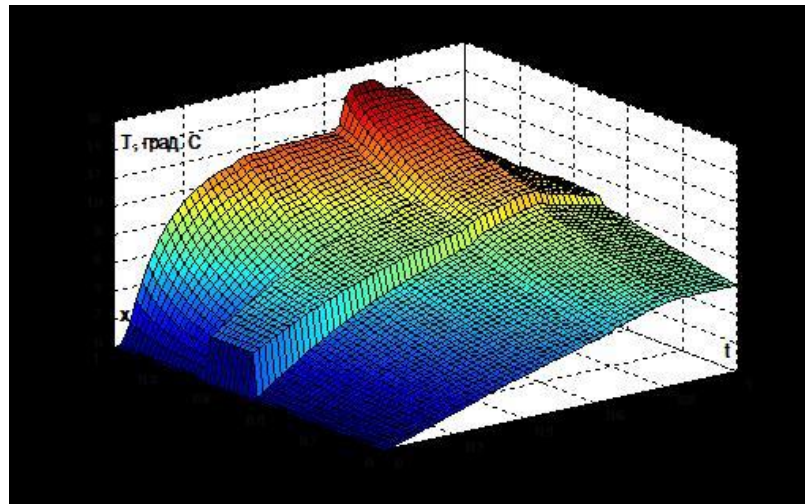


Рис. 3. Характер изменения температуры в области тепловой системы при одновременном потовыделении и других температурных колебаниях тела, вызванных воздействием теплового сигнала на человека, при более высокой теплоотдаче в тело человека, при этом, в области промежутка между телом человека и тканым электронагревателем, самого электронагревателя и внешнего теплоизоляционного слоя тканого электронагревателя теплоемкость, удельная масса и теплопроводность остались такими же, как и при проведении опыта, результаты которого изображены на рис.1.

Близкая картина к результатам, приведенным на рис. 2, наблюдается и при изменениях тепловых характеристик теплоизоляционного слоя на внешней поверхности тканого электронагревателя. С ростом его массы и теплоемкости наблюдается снижение амплитуды тепловой реакции тела человека и ее смещение в область нахождения тела человека. В области нахождения тканого электронагревателя динамические изменения температуры за счет потовыделения и генерации тепла телом человека отсутствуют (рис. 4).

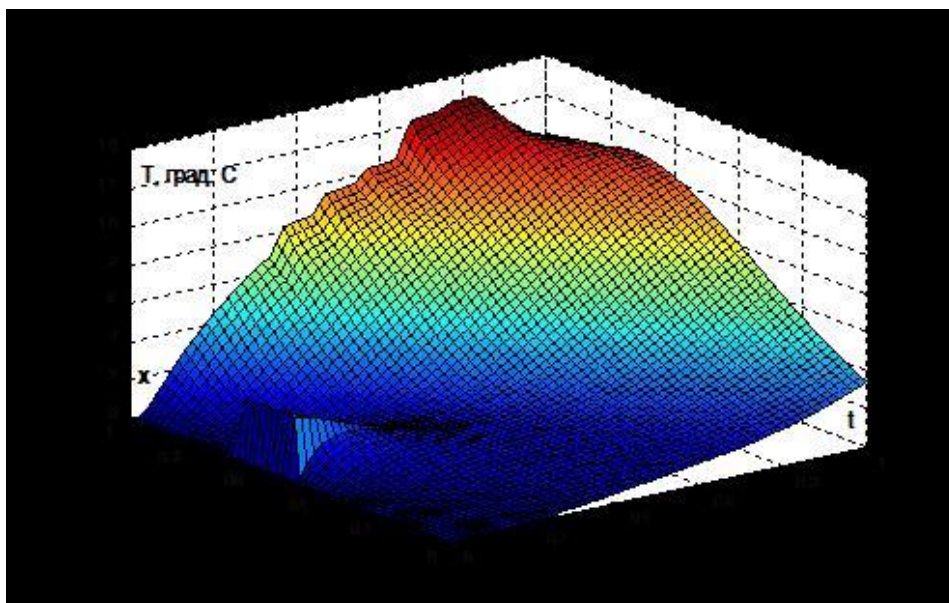


Рис. 4. Характер изменения температуры в области тепловой системы при одновременном потовыделении и других температурных колебаниях тела, вызванных воздействием теплового сигнала на человека, при низкой теплоемкости и удельной массе: в промежутке между телом человека и тканым электронагревателем, в области самого нагревателя и при высокой теплоемкости и массе материала внешнего теплоизоляционного слоя тканого электронагревателя.

Для изучения поведения тепловых сигналов – реакции тела человека на воздействие тканого электронагревателя проведем следующий натурный эксперимент.

Поместим между телом человека и тканым электронагревателем три тканые прокладки. В промежутках между ткаными прокладками, а также между последней прокладкой и тканым электронагревателем, установим термопары.

Включим тканый электронагреватель и будем фиксировать температуру термопар через каждые две минуты. Результаты испытаний показаны на рис. 5, где хорошо видно, что с ростом расстояния от поверхности тела человека уровень сигнала-реакции со стороны тела человека на тепловое воздействие тканого электронагревателя уменьшается. Очень важно, что при создании теплового слоя с помощью тканой прокладки между телом человека и термопарой эффекты, связанные с потовыделением и другими явлениями, не пропадают.

В дополнение к этим испытаниям используем результаты ранее проведенных испытаний, когда термопара находилась непосредственно телом человека (прямо на его поверхности) и тканым электронагревателем [2, 4]. В этом случае, были зафиксированы только сигналы обратной реакции на тепловое воздействие со стороны тканого электронагревателя в виде генерации температуры телом человека и дальнейшего снижения

температуры, связанного с ростом теплоотдачи в поверхностных областях тела человека, а реакции тела человека, связанной с потовыделением, зафиксировано не было.

Так как по мере удаления термопар от тела человека существенно растет суммарная теплоемкость и масса прокладок, расположенных в промежутке. Результаты натурных испытаний также и полностью подтверждают результаты математических экспериментов, приведенных на рис. 1 и 2.

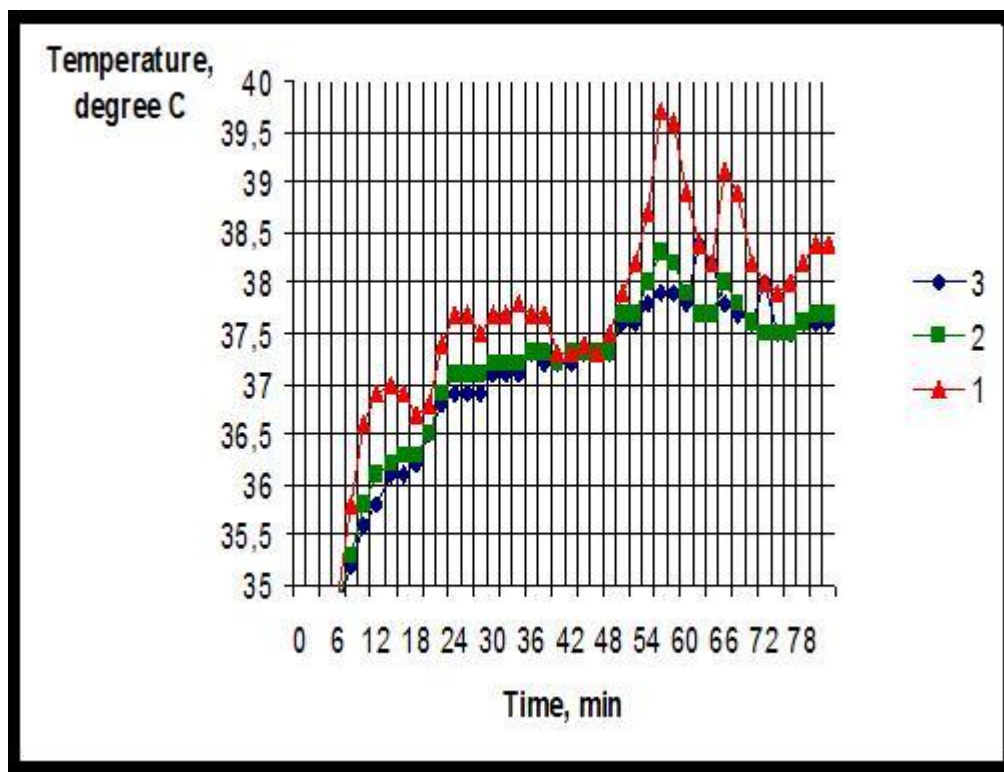


Рис. 5. Экспериментальные данные о характере изменения температуры при потовыделении и других температурных колебаниях человека, вызванных воздействием теплового сигнала в промежутке между телом человека и тканым электронагревателем на разных расстояниях от тела человека: 1 – через токую тканевую прокладку от поверхности тела человека, 2 – на некотором расстоянии (через две тканевые прокладки) от тела человека и одну тканевую прокладку от тканого электронагревателя, 3 – через три тканевые прокладки от поверхности тела человека и непосредственно на тканом электронагревателе.

Выводы.

Согласно проведенному моделированию тепловые параметры системы: тело человека – промежуток между телом человека и тканым электронагревателем – тканый электронагреватель – теплоизоляционный слой на внешней поверхности тканого электронагревателя – внешняя среда, - должны быть согласованы. В противном случае, динамично изменяющиеся сигналы, вызванные обратной реакцией человека на тепловое воздействие тканого электронагревателя, смещаются в область тела человека.

Но не только смещение происходит при рассогласовании тепловых параметров. Одновременно уменьшаются уровни сигналов, что при значительном рассогласовании тепловых параметров приводит сначала к затруднению, а затем и к полной невозможности фиксации сигналов тепловой реакции человека.

С увеличением расстояния от поверхности тела человека в промежутке между телом человека и тканым электронагревателем уровень регистрируемого сигнала-реакции человека на тепловое воздействие уменьшается. Поэтому измерения реакций человека на тепловое воздействие тканого электронагревателя при температурах более 38°C наиболее удобно производить в областях наиболее близко расположенной к телу человека.

Воздействие тканого электронагревателя на тело человека контактным способом также требует максимального приближения нагревателя к телу человека, то есть уменьшения промежутка между телом человека и тканым электронагревателем. Однако, необходимо отметить, что отсутствие промежутка между телом человека и тканым электронагревателем приводит к невозможности фиксации тепловых процессов, связанных с потовыделением.

Таким образом, для проведения исследования более полной картины реакции человека на тепловое воздействие тканого электронагревателя, с учетом потовыделения, необходимо одновременно максимально приближать тканый электронагреватель к телу, но обязательно сохранять наличие небольшого промежутка.

Следует отметить, что результаты натурных испытаний и математического моделирования взаимно дополняют друг друга и обеспечивают более достоверную картину тепловых процессов, происходящих в тепловой системе, находящейся на поверхности тела человека, при контактном воздействии тканого электронагревателя.

Список литературы

1. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Тканые электронагревательные элементы и примеры их применения// Вестник научно-технического развития. – 2017. - №7. – С. 30-40.
2. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Моделирование тепловых процессов нагревательной системе// Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2021. - № 2. - С. 116-124.
3. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Программа моделирования тепловых процессов в тонкой многослойной стенке при переменных граничных условиях. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022611599, М., 2022.
4. Shul'zhenko A.A., Modestov M.B. Temperature response of a person to a heat signal. Editors Zhengbing Hu, Sergey Petoukhov, Matthew He Advances in Artificial Systems for Medicine and Education book series (AISC, volume 1126) (The Fourth International Conference of Artificial Intelligence, Medical Engineering, Education (AIMIE 2020), P.149-158.
5. Morrison S.F., Nakamura K. Central neural pathways for thermoregulation. Front Biosci. Landmark Ed. 2011. jan 1;16: P. 74-104.
6. Hensel H. Thermoreception and temperature regulation. – London Academic Press. Monographs of the Physiological Society, 1981. - No. 38. - 321 p.
7. Евтушенко А.А. Функциональные изменения активности генов термочувствительных TRP ионных каналов при температурных воздействиях на организм в норме и при артериальной гипертензии. Диссертация ... Новосибирск. НИИФФМ. 2016. 160 с.

Дата поступления: 30 марта 2022 г.