ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 681.382

Абдулхакимов У.И., Евдулов О.В.

МОДЕЛЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ КОСМЕТОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕДУР

Abdulhakimov U.I., Evdulov O.V.

THE THERMOELECTRIC SYSTEM MODEL FOR THERMAL COSMETIC PROCEDURES

Рассмотрена модель термоэлектрической системы для проведения тепловых косметологических процедур, построенная на основе решения двумерной нестационарной задачи теплопроводности для системы сложной конфигурации. Получены зависимости изменения температуры в различных точках объекта воздействия – участка кожного покрова, подвергающегося тепловым косметологическим процедурам, в зависимости от холодопроизводительности и теплопроизводительности термоэлектрических модулей, внешних условий.

***Ключевые слова**: термоэлектрическая система, тепловое воздействие, косметология, биологический объект, температурное поле, модель.*

The model of thermoelectric systems for thermal cosmetic procedures that are based on solving two-dimensional unsteady heat conduction problem for a system of complex configuration. The dependences of temperature change at different points of the object of influence – the area of the skin exposed to the heat of cosmetic procedures, depending on the cooling and heating capacity of thermoelectric modules, external conditions.

***Key words:** thermoelectric system, thermal, beauty, biological object, the temperature field, model.*

Введение. В настоящее время в практике проведения косметологических процедур все большее распространение получают методы воздействия, основанные на использовании высоких и низких температур (термо- и криотерапия) [1, 2]. Такое достаточно активное использование указанных методов связано с тем, что тепловое воздействие оказывает большое влияние на энергетический баланс в организме.

Под воздействием тепла кровеносные и лимфатические сосуды расширяются, что улучшает кровообращение во многих внутренних органах. Дан-

ное обстоятельство приводит к активизации обмена веществ, качественному насыщению организма питательными веществами и кислородом.

Термовоздействие стимулирует окисление жира, очищает организм, выводя через потовые железы вредные токсины и другие продукты жизнедеятельности, тем самым способствуя улучшению состояния кожи. Криовоздействие обладает сильным омолаживающим эффектом, разглаживает морщины, устраняет распространение угревой сыпи и акне, уменьшает целлюлитные отложения, сглаживает рубцы, удаляет кожные образования, папилломы и доброкачественные опухоли. Охлаждающие маски снимают отечность лица, моделируют его форму, разглаживают морщины и улучшают цвет. Криомассаж применяется для укрепления кожи головы и корней волос; эффективен при лечении себореи.

Применение теплового воздействия на тело в целом или его частей постоянно совершенствуется, дифференцируется и, в настоящее время представляет собой ряд апробированных методик, каждая из которых имеет свои показания и противопоказания [3]. Использование теплового воздействия в косметологической практике на сегодняшний день развивается по двум основным направлениям: во-первых, охлаждение (нагрев) всего организма или сравнительно значительных его частей, во-вторых, вовлечение в процесс теплового воздействия менее обширных участков, а также, патологически измененных участков для удаления ткани.

Если в первом случае для охлаждения (нагрева) всего организма используются мощные холодильные и тепловые машины (например, парокомпрессионные, абсорбционные и т.п.), то для теплового воздействия на отдельные зоны человека могут быть применены системы с меньшей тепло- и холодопроизводительностью на основе других принципов преобразования энергии.

В этих условиях для осуществления локального теплового воздействия с целью проведения косметологических процедур перспективным является применение термоэлектрических систем (ТЭС) [4], отличающихся высокой экологичностью, бесшумностью, надежностью, функциональностью и значительным ресурсом работы, а также возможностью простого перехода с режима охлаждения на режим нагрева и наоборот.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является создание математической модели ТЭС, разработанной в Дагестанском государственном техническом университете.

Модель строится на основе решения двух задач: определения требуемых величин теплового потока от исполнительного элемента ТЭС – термоэлектрического модуля (ТЭМ) и расчета основных характеристик последней.

Обобщенная тепловая модель ТЭС, учитывающая возможность контрастного теплового воздействия, приведена на рис.1.

На рисунке 1 цифрой обозначено: 1 – основание, на котором крепятся ТЭМ; 2 – непосредственно ТЭМ, выполняющие функции источников (стоков) теплоты и закрепленные на основании в местах, определяемых методикой проведения процедур, конструктивным удобством и комфортностью ощуще-

ний человека; 3 – объект воздействия.

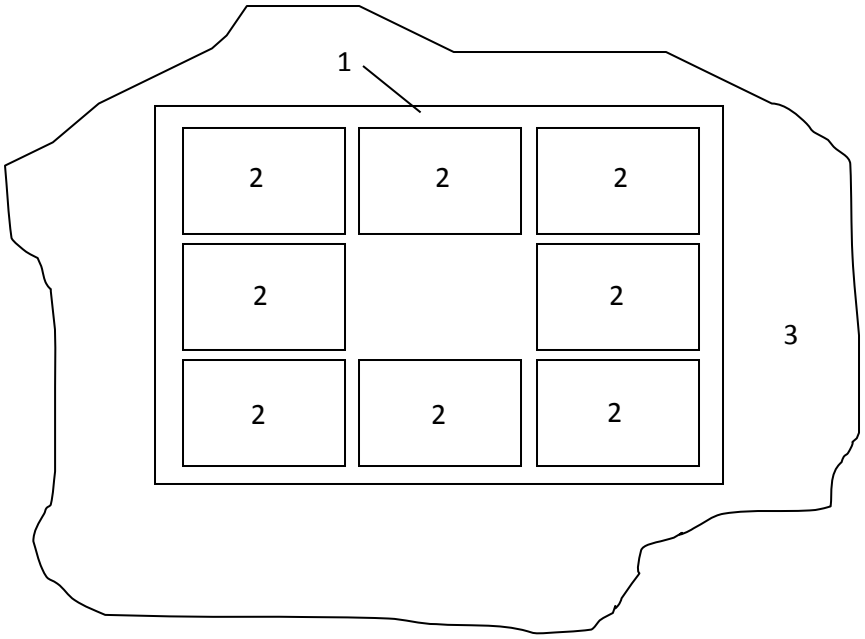

Рисунок 1 - Тепловая модель ТЭС теплового воздействий на отдельные зоны человеческого организма

В зависимости от проводимых косметологических процедур все ТЭМ могут работать либо в режиме охлаждения, либо в режиме нагрева, чередовать указанные режимы в течение определенного промежутка времени, а также формировать изменяющиеся во времени температурные поля различной конфигурации (например, шахматное или коридорное чередование холодных и теплых зон, бегущая волна и др.). Исследование тепловых характеристик ТЭС по рассмотренной модели приводит к необходимости анализа температурного поля пластины произвольной формы с дискретными источниками энергии [5].

С учетом представления источников и стоков теплоты (ТЭМ) в виде ступенчатой функции, математическая формулировка задачи расчета температурного поля объекта воздействия может быть получена в следующем виде:

$$\lambda\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\lambda\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+q_{ТЭМ}(x,y)+q_{ср}=c\rho\frac{\partial T}{\partial\tau}, \quad (1)$$

$$q_{ТЭМ}(x,y)=\sum_{j=1}^{J}q_{ТЭМ_j}(x,y); \quad (2)$$

$$q_{ТЭМ_j}(x,y)=\begin{cases}\dfrac{Q_{ТЭМ_j}}{S_{ТЭМ_j}} \text{ в области источника энергии}\\ 0 \text{ вне области источника энергии}\end{cases}, \quad (3)$$

$$S_{ТЭМ_j}=\iint\limits_{S_{ТЭМ_j}}S_{ТЭМ_j}(x,y)dxdy, \quad (4)$$

$$q_{ср} = \alpha(T - T_{ср}), \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_{ср}) \text{ при } x, y \in L,$$

$$T = 309{,}6К \text{ при } \tau = 0. \quad (6)$$

где T – температура в любой точке объекта воздействия; $T_{ср}$ – температура окружающей среды; τ – время; δ – толщина пластины; λ – эффективный коэффициент теплопроводности объекта воздействия; α – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду ($\alpha = const$); c – теплоемкость объекта воздействия, ρ - плотность объекта воздействия, $q_{ТЭМ}(x, y)$ – суммарная поверхностная плотность теплового потока от локальных источников и стоков теплоты, $q_{ТЭМ_j}(x, y)$ – поверхностная плотность теплового потока от j-го локального источника теплоты (ТЭМ); $Q_{ТЭМ\,j}$ – мощность, рассеиваемая j-м локальным источником теплоты; $q_{ср}$ – поверхностная плотность теплового потока на объект воздействия от окружающей среды; L – кривая, ограничивающая площадь биологического объекта, на который осуществляется тепловое воздействие, n – нормаль к кривой L, $n = (xh + yg)$; h, g – единичные вектора.

Решение уравнений численным методом конечных элементов (1)-(6) дало возможность определить изменение температуры в различных точках объекта воздействия – участка кожного покрова, подвергающегося тепловым косметологическим процедурам, а также отследить ее изменение в зависимости от величины теплового потока от ТЭС (холодопроизводительности и теплопроизводительности ТЭМ), внешних условий.

Расчет проводился в соответствии с необходимыми режимами проведения косметологических процедур: температура объекта воздействия –273÷318 К, продолжительность воздействия – 5÷15 мин., возможность чередования режима нагрева и охлаждения. В модели системы предполагалось использование 9 стандартных ТЭМ, расположенных в три ряда. В качестве исходных принимались следующие данные: $\lambda = 0{,}6$ Вт/(м·К), $C = 3458$ Дж/(кг·К), $\rho = 1041$ кг/м^3, $T|_{\tau=0} = 295$ К.

Геометрические размеры ТЭС и объекта воздействия приведены на рис.2. Для упрощения представления и интерпретации результатов численного эксперимента в качестве объекта воздействия рассматривается участок квадратной формы поверхности кожного покрова человека.

Результаты эксперимента и их обсуждение. Получены двумерные температурные поля биологического объекта при воздействии на него ТЭС, работающей в режиме охлаждения и нагрева при различных величинах теплового потока от каждого ТЭМ. Согласно зависимостям, единовременная работа всех ТЭМ в одинаковом режиме приводит к общему охлаждению, либо нагреву всей зоны воздействия. При этом с увеличением значения теплового потока имеет место снижение температуры биологического объекта при работе ТЭМ в режиме охлаждения и ее рост при работе ТЭМ в режиме нагрева.

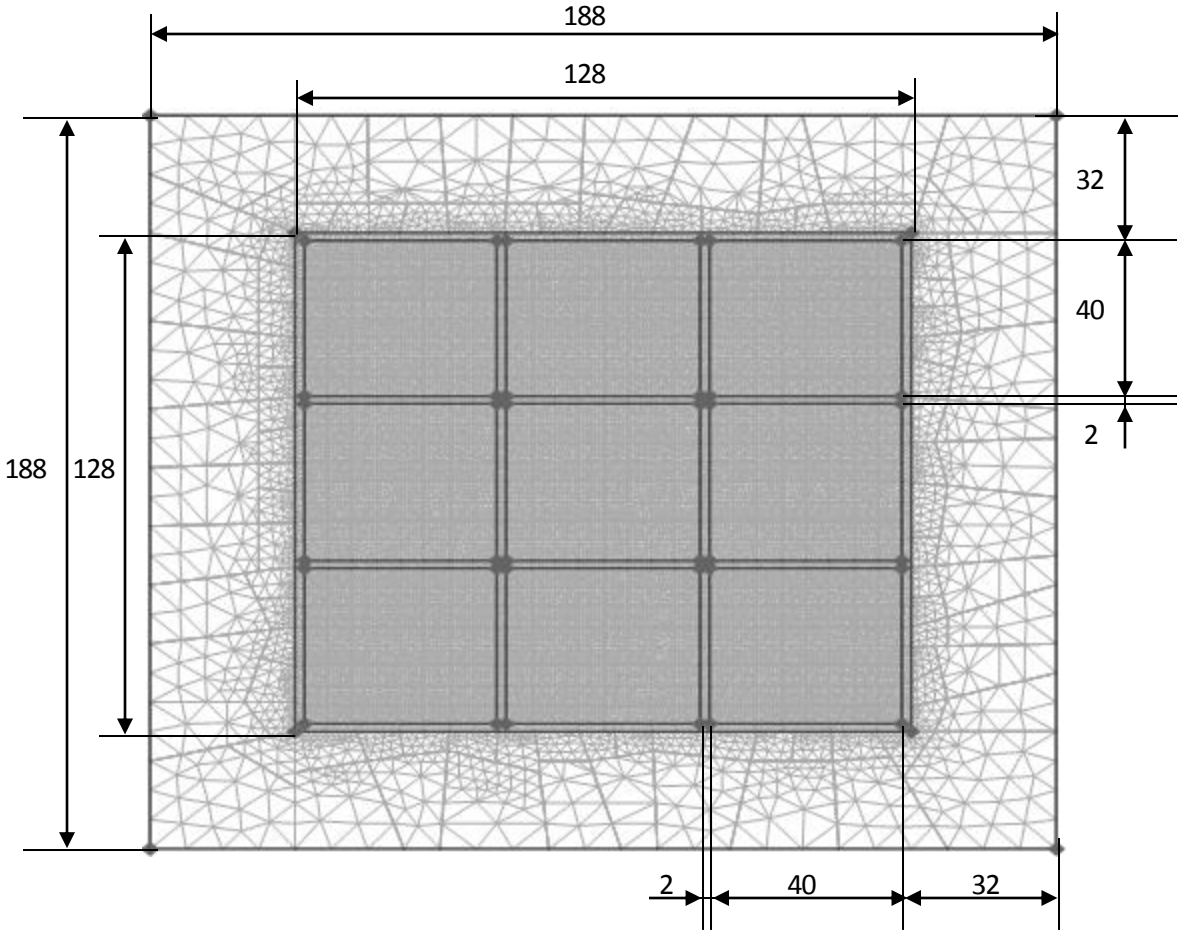

Рисунок 2 - Модель ТЭС – биологический объект с конечноэлементной сеткой и размерами

Например, увеличение холодопроизводительности термомодулей с 1200 Вт/м^2 до 2000 Вт/м^2 снижает температуру области воздействия с 283,5 К до 279 К, а увеличение их теплопроизводительности с 700 Вт/м^2 до 900 Вт/м^2 – увеличивает ее температуру с 316,6 К до 317, 6 К. При этом, в соответствии с расчетными данными наблюдается незначительное превышение температурного уровня в центральной части области воздействия (соответствует месту расположения центрального ТЭМ) по отношению к остальной ее части.

Указанное обстоятельство определяется дополнительным воздействием на эту зону соседних ТЭМ, причем отклонение температуры тем больше, чем выше величина теплового потока при работе ТЭС, как в режиме охлаждения, так и нагрева.

Так, по данным расчета указанное отклонение температуры в центральной области зоны биологического объекта от средней составляет около 0,5 К при рабочих мощностях ТЭМ, определяемых режимами процедур.

Помимо единовременного охлаждения и нагрева областей тела человека при косметологических процедурах представляет интерес контрастное тепловое воздействие, когда одновременно в биологическом объекте производится снижение температуры одних его областей и повышение других.

Для случая, соответствующего рис.2, исследованы варианты шахматного и коридорного расположения холодных и горячих зон. Полученные двумерные температурные поля представлены на рис.3-4.

Как и в случае единовременного воздействия тепловым потоком одного и того же знака, здесь для достижения необходимых при проведении косметологических процедур температурных уровней не требуется применение мощных ТЭМ.

В соответствие с результатами расчета для формирования зон шахматного расположения (рис.3) с температурами 283,5 К и 312 К могут быть использованы ТЭМ с холодопроизводительностью 1600 Вт/м^2 и теплопроизводительностью 600 Вт/м^2.

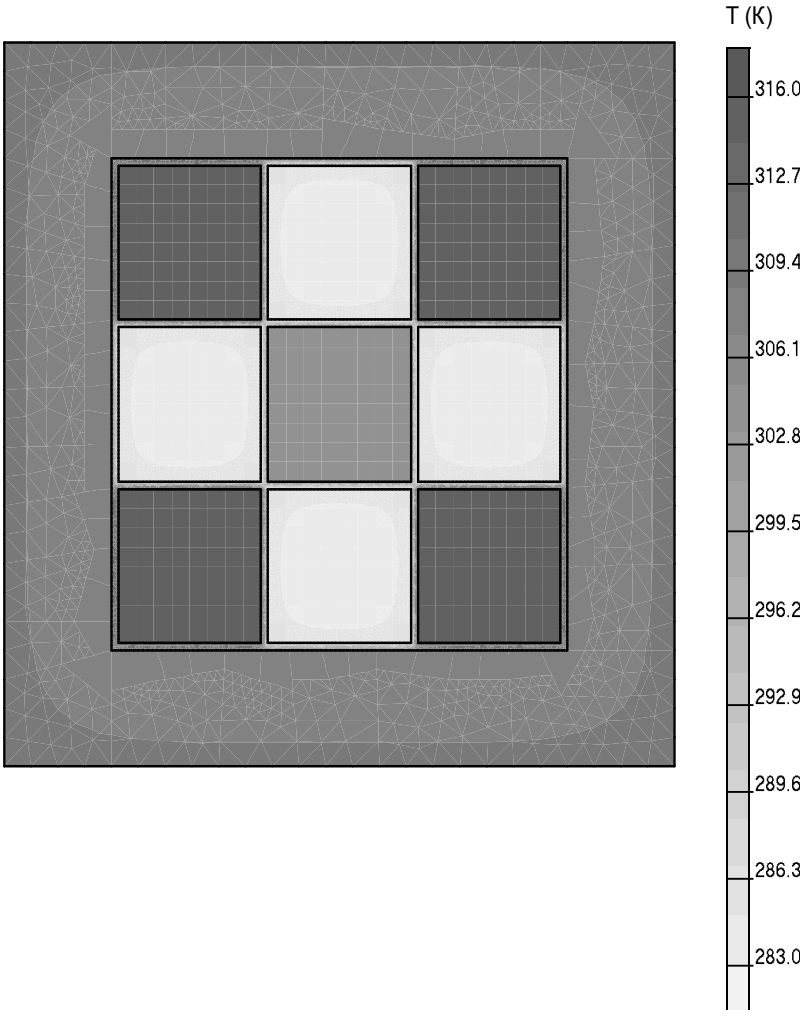

Рисунок 3 - Двумерное температурное поле системы ТЭС – биологический объект в стационарном режиме при шахматном расположении холодных и горячих зон $q_{ТЭМх} = -1600$ Вт/м^2; $q_{ТЭМг} = 600$ Вт/м^2

Однако, в отличие от ранее рассмотренных случаев, в указанных условиях на величину температуры в центральной зоне объекта воздействия существенное влияние будут оказывать соседние ТЭМ, формирующие тепловой поток обратного знака.

Согласно полученным данным разность температур нагретых зон по бокам и в центре устройства составляет примерно 7 К. Данное обстоятельство во многих случаях недопустимо при проведении косметологических процедур, рассчитанных на одинаковые температурные уровни областей зоны воздействия.

В этих условиях для формирования необходимого температурного уровня в центре зоны воздействия на биологический объект необходимо использование более мощного ТЭМ, при одинаковой величине тока питания с другими модулями, входящими в состав ТЭС, имеющего большую холодо- или теплопроизводительность.

Другим возможным вариантом решения указанной проблемы является использование двух режимов работы ТЭМ в ТЭС. Например, ТЭМ, размещаемые по бокам могут работать в режиме максимального холодильного коэффициента, характеризующегося большей экономичностью, но меньшей вырабатываемой мощностью, а ТЭМ, находящийся в центре устройства, работать в режиме максимальной холодопроизводительности, менее экономичном, но дающем возможность получить большие значения теплового потока.

При использовании указанного способа выравнивания температурного уровня в зонах воздействия биологического объекта необходимо предусмотреть в устройстве более высокую величину тока питания центрального ТЭМ по сравнению с остальными термомодулями.

Этого можно добиться, например, за счет смешанного соединения ТЭМ в системе, а также применения двухканального источника электрической энергии, через один канал которого осуществляется питание центрального ТЭМ, а через другой – всех остальных.

Для численного эксперимента, условия которого соответствуют рис.3 необходимое увеличение теплового потока центрального ТЭМ составило порядка 400 Вт/м^2.

При режиме работы устройства, соответствующему коридорному расположению холодных и горячих зон (рис.4), также наблюдается отличие в температурных уровнях центральной и боковых однознаковых областей зоны теплового воздействия.

Однако в данном случае, в отличие от распределения температуры при шахматном чередовании холодных и горячих областей, температура в центральной области по уровню ниже, чем в боковых. Поэтому для успешного проведения косметологических процедур необходимо уменьшить величину формируемого теплового потока центрального модуля. Этого можно добиться по аналогии с предыдущим случаем либо применением менее мощного ТЭМ, либо использованием двух различных режимов работы ТЭМ.

В соответствие с расчетами, тепловой поток центрального модуля для получения одинакового температурного уровня во всех областях зоны воздействия должен быть уменьшен примерно на 650 Вт/м^2.

Для исследования временных параметров исследуемой ТЭС в работе получены графики изменения температуры отдельных точек области биологического объекта, подвергаемой тепловому воздействию во времени.

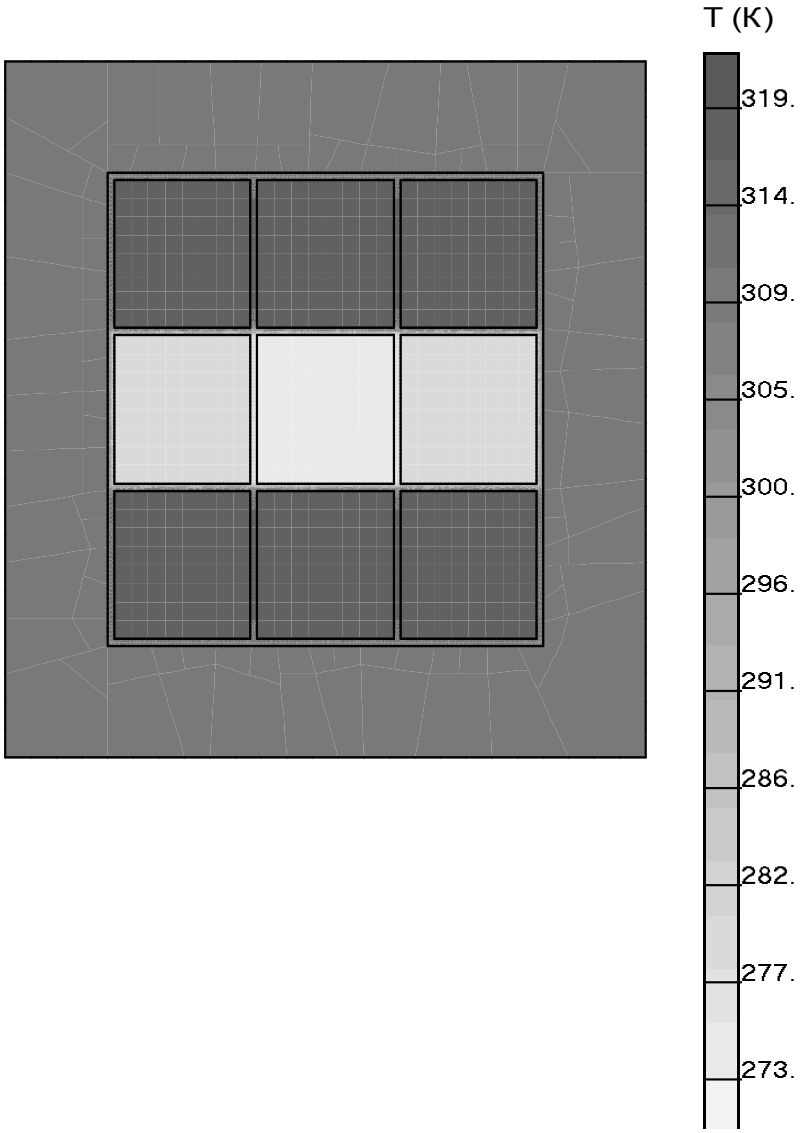

Рисунок 4 - Двумерное температурное поле системы ТЭС – биологический объект в стационарном режиме при коридорном расположении холодных и горячих зон $q_{ТЭМх} = -2000$ Вт/м^2; $q_{ТЭМг} = 1000$ Вт/м^2

В качестве примера на рис.5 показано изменение во времени температуры холодной и горячей зон биологического объекта при контрастном динамическом тепловом воздействии. Согласно полученным результатам длительность выхода системы на стационарный режим работы лежит в относительно небольших пределах. Для случая, соответствующего приведенным зависимостям, время, необходимое для стабилизации температуры биологического объекта, находится в пределах 7-8 мин.

Данное обстоятельство необходимо учитывать при проведении косметологических процедур, то есть целесообразным является включение системы до проведения процедур для вывода ее на рабочий режим и уже затем, воздействие на пациента.

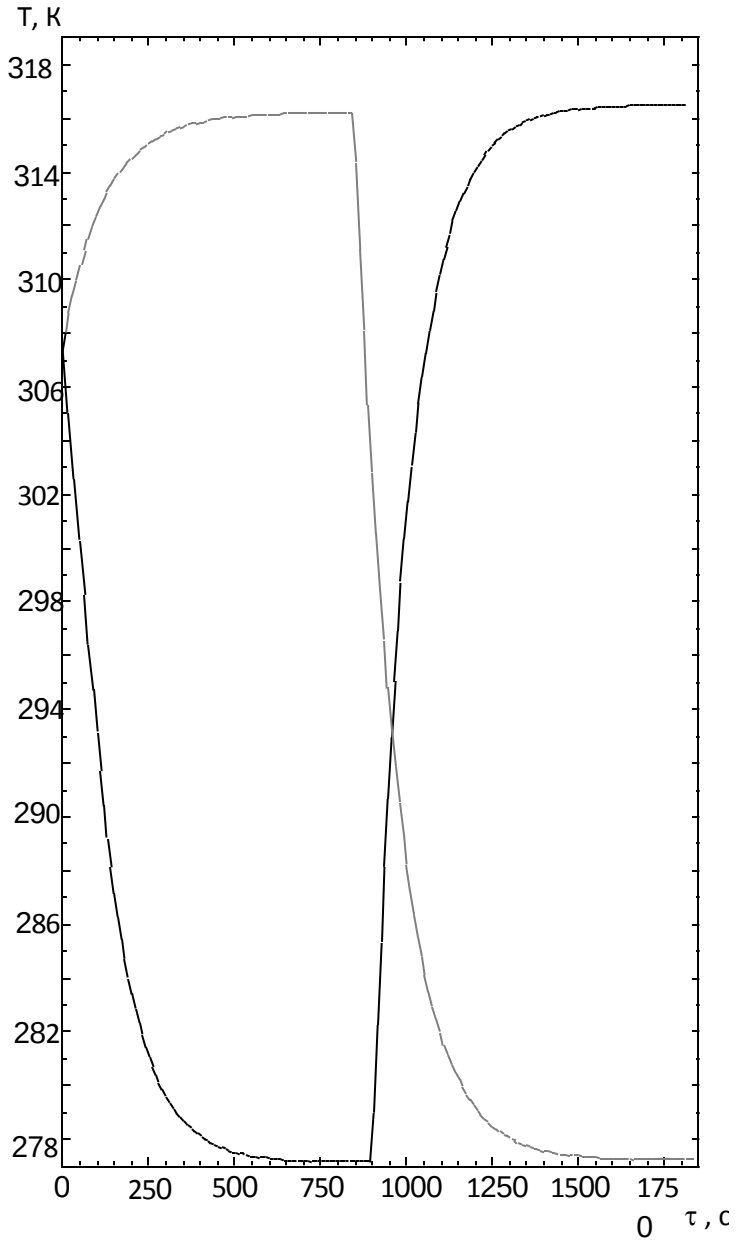

Рисунок 5 - Изменение температуры холодной и горячей зон биологического объекта во времени при контрастном динамическом тепловом воздействии $q_{ТЭМх} = -1850$ Вт/м^2; $q_{ТЭМг} = 1100$ Вт/м^2

На основе анализа полученных значений теплового потока, формируемых ТЭС, эквивалентных величине холодо- и теплопроизводительности ТЭМ, может быть произведен расчет характеристик последних. Искомыми величинами в данном случае являются геометрические размеры термоэлементов ТЭ, входящих в состав модуля, величина питающего электрического тока, потребляемая электрическая энергия. В большинстве случаев в ТЭС могут быть использованы ТЭМ стандартного типа, подбор которых может быть произведен с использованием специальных пакетов прикладных программ.

Для исследуемого варианта ТЭС, например, могут быть использованы стандартные ТЭМ типа ТВ-127-1.0-1.5, производимые ИПФ «Криотерм» (г.

Санкт-Петербург), в полной мере реализующие требуемые режимы проведения терапевтических процедур. Для их подбора может быть использован пакет прикладных программ Thermoelectric system calculation [6].

Вывод. На основе разработанной модели может быть проведено исследование теплофизических процессов, протекающих в ТЭС для проведения тепловых косметологических процедур, разработаны и созданы новые конструкции косметологических устройств, обеспечивающих высокую точность дозировки и надежность теплового воздействия.

Библиографический список:

1. Ежов В.В. Физиотерапия и физиопрофилактика как методы и средства сохранения и восстановления здоровья//Физиотерапия, бальнеология и реабилитация, 2011. - № 4. – С. 33-36.
2. Боголюбов В.М., Улащик В.С. Комбинирование и сочетание лечебных физических факторов//Физиотерапия, бальнеология и реабилитация, 2004, № 5 – С. 39-45.
3. Зубкова С.М. Роль тепловой компоненты в лечебном действии физических факторов//Физиотерапия, бальнеология и реабилитация, 2011. - № 6 – С. 3-10.
4. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Юсуфов Ш.А., Аминов Г.И. Приборы для локального температурного воздействия на человеческий организм//Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки, 2003, №2. – С. 3-6.
5. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Хазамова М.А., Магомадов Р.А.- М. Математическая модель термоэлектрической системы для локального теплового воздействия на руку человека//Термоэлектричество, 2014, № 1. – С.77-86.
6. http://www.kryotherm.ru.

УДК 621.362

Гаджиев Х.М., Челушкин Д.А.

ПОЛУПРОВОДНИКОВОЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЦЕССОРА С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕРИАЛОВ В СОСТОЯНИИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

Gadjiyev H.M., Chelushkin D.A.

THE SEMICONDUCTOR THERMOELECTRIC DEVICE FOR TEMPERATURE CONTROL OF COMPUTER PROCESSOR WITH USE OF MATERIALS IN THE CONDITION OF PHASE TRANSITION