

Абдулхакимов У.И., Евдулов Д.В., Евдулов О.В., Набиев Н.А.

ФГБОУ ВО "Дагестанский государственный технический университет",
пр. Имама Шамиля, 70, г. Махачкала, 367015, Россия

МОДЕЛЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ КОСМЕТОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕДУР

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

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

A model of thermoelectric system for carrying out thermal cosmetology procedures is considered which is based on solving a two-dimensional nonstationary problem for a system of complex configuration. Temporal variations of temperature at different points of target object – skin area exposed to thermal cosmetology procedures, were obtained as a function of cooling capacity and heating efficiency of thermoelectric modules.

Key words: thermoelectric system, thermal exposure, cosmetology, biological object, temperature field, model.

Введение

В настоящее время в практике проведения косметологических процедур все большее распространение получают методы, основанные на тепловом воздействии (термо- и криотерапия) [1, 2]. Довольно активное использование методов данного типа связано с тем, что тепловое воздействие оказывает большое влияние на энергетический баланс в организме. В результате теплового воздействия теплоты кровеносные и лимфатические сосуды расширяются, что улучшает кровообращение во многих внутренних органах. Это приводит к активизации обмена веществ и качественному насыщению организма питательными веществами и кислородом. Нагрев стимулирует окисление жира, очищает организм, выводя с потом вредные токсины и другие продукты жизнедеятельности, способствуя тем самым улучшению состояния кожи. Охлаждение обладает сильным омолаживающим эффектом, разглаживает морщины, устраняет распространение угревой сыпи и акне, целлюлитные отложения, сглаживает рубцы, удаляет кожистые образования, папилломы и доброкачественные опухоли. Охлаждающие маски снимают отечность лица, моделируют его форму, разглаживают морщины и улучшают цвет. Тепловой массаж применяется для укрепления кожи головы и корней волос, эффективно лечит себорею.

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 [3].

Использование теплового воздействия в косметологической практике на сегодняшний день развивается по двум основным направлениям. Во-первых, охлаждение либо нагрев всего организма или сравнительно значительных его частей. Во-вторых, тепловое воздействие только на отдельные участки ткани, в том числе на паталогически измененные.

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

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

Целью настоящей работы является разработка теоретической модели для исследования различных режимов работы ТЭС для проведения тепловых косметологических процедур, учитывающей сложную конфигурацию системы, а также возможность одновременного контрастного теплового воздействия на биологический объект в произвольных зонах.

Конструкция ТЭС для проведения тепловых косметологических процедур

Внешний вид функциональной части ТЭС (без блока управления) показан на рис. 1. В ее состав входит основание, выполненное в виде маски, повторяющей контуры лица человека с отверстиями в области глаз, носа и рта. В области лба и щек с внутренней стороны основания расположены зоны теплового воздействия, исполнительным элементом которых являются термоэлектрические модули (ТЭМ), для создания равномерного теплового потока, контактирующие с тепловыравнивающими пластинами. ТЭМ подключаются к программируемому источнику постоянного тока, реализующему различные режимы работы модулей (охлаждение, нагрев, их чередование) в зависимости от вида косметологической процедуры. Доза и длительность теплового воздействия определяется врачом-косметологом, им же производится текущий контроль за состоянием пациента.

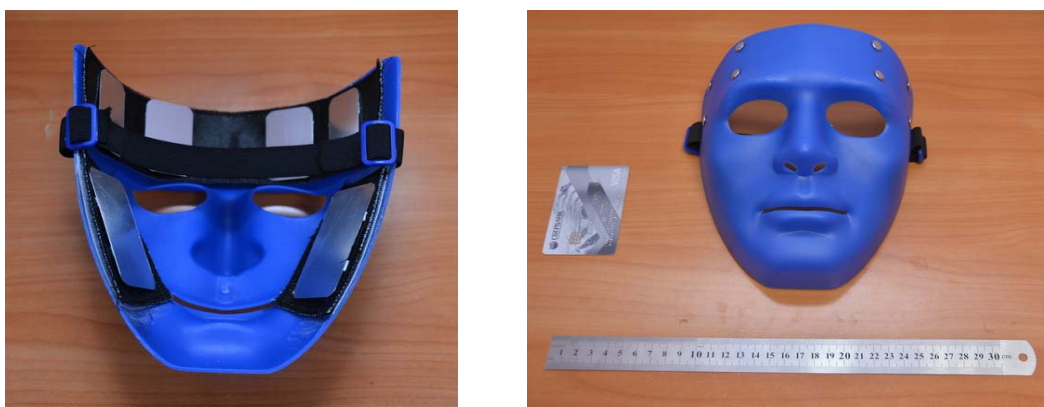


Рис. 1. Внешний вид функциональной части системы для проведения тепловых косметологических процедур [5].

Модель ТЭС для проведения тепловых косметологических процедур

Модель построена на основе решения двух задач: определения требуемых величин теплового потока от функционального элемента ТЭС – ТЭМ и расчета основных характеристик последних.

Решение первой задачи производится на основе анализа температурного поля пластины произвольной формы, представляющей собой объект воздействия с дискретными источниками энергии, соответствующими ТЭМ в системе [6]. С учетом представления источников и стоков теплоты (ТЭМ) в виде ступенчатой функции, математическая формулировка задачи расчета температурного поля объекта воздействия приведена к следующему виду:

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

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

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

$$S_{ТЭМ_j} = \iint_{S_{ТЭМ_j}} S_{ТЭМ_j}(x, y) dx dy, \quad (4)$$

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

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_{cp}) \text{ при } x, y \in L, \quad (6)$$

$$T = 309.6 \text{ K при } \tau = 0. \quad (7)$$

где T – температура в любой точке объекта воздействия; T_{cp} – температура окружающей среды; τ – время; δ – толщина пластины; λ – эффективный коэффициент теплопроводности объекта воздействия; α – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду ($\alpha = \text{const}$); 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_{cp} – поверхностная плотность теплового потока на объект воздействия от окружающей среды; L – кривая, ограничивающая поверхность биологического объекта, на который осуществляется тепловое воздействие; n – нормаль к кривой L , $n = (xh + yg)$; h, g – единичные вектора.

Решение уравнений (1) – (7) численным методом конечных элементов 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 (холодо- и теплопроизводительности ТЭМ) и внешних условий.

Расчет проводился в соответствии с необходимыми режимами проведения косметологических процедур: температура объекта воздействия – $283 \div 313$ К, продолжительность воздействия – $3 \div 12$ мин, возможность чередования режима нагрева и охлаждения. В модели системы предполагалось использование 6 стандартных ТЭМ, 2 из

которых расположены в лобной части, и по 2 в щечных зонах. Размеры ТЭМ: длина – 40 мм, ширина – 40 мм. В качестве исходных принимались следующие данные: $\lambda = 0.6 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $C = 3458 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, $\rho = 1041 \text{ кг}/\text{м}^3$, $T_{cp} = 295 \text{ К}$, $\alpha = 5 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

Получены зависимости изменения во времени температуры биологического объекта в зонах воздействия при равномерном и контрастном тепловом воздействии. Результаты расчетов приведены на рис. 2 – 3.

На рис. 2 представлены зависимости изменения во времени температуры поверхности основания, приводимой в контакт с лицом человека при охлаждающем и нагревающем воздействиях для значений $q_{ТЭМ_j}(x, y)$, соответственно равных $7000 \text{ Вт}/\text{м}^2$; $9000 \text{ Вт}/\text{м}^2$; $11000 \text{ Вт}/\text{м}^2$; $13000 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

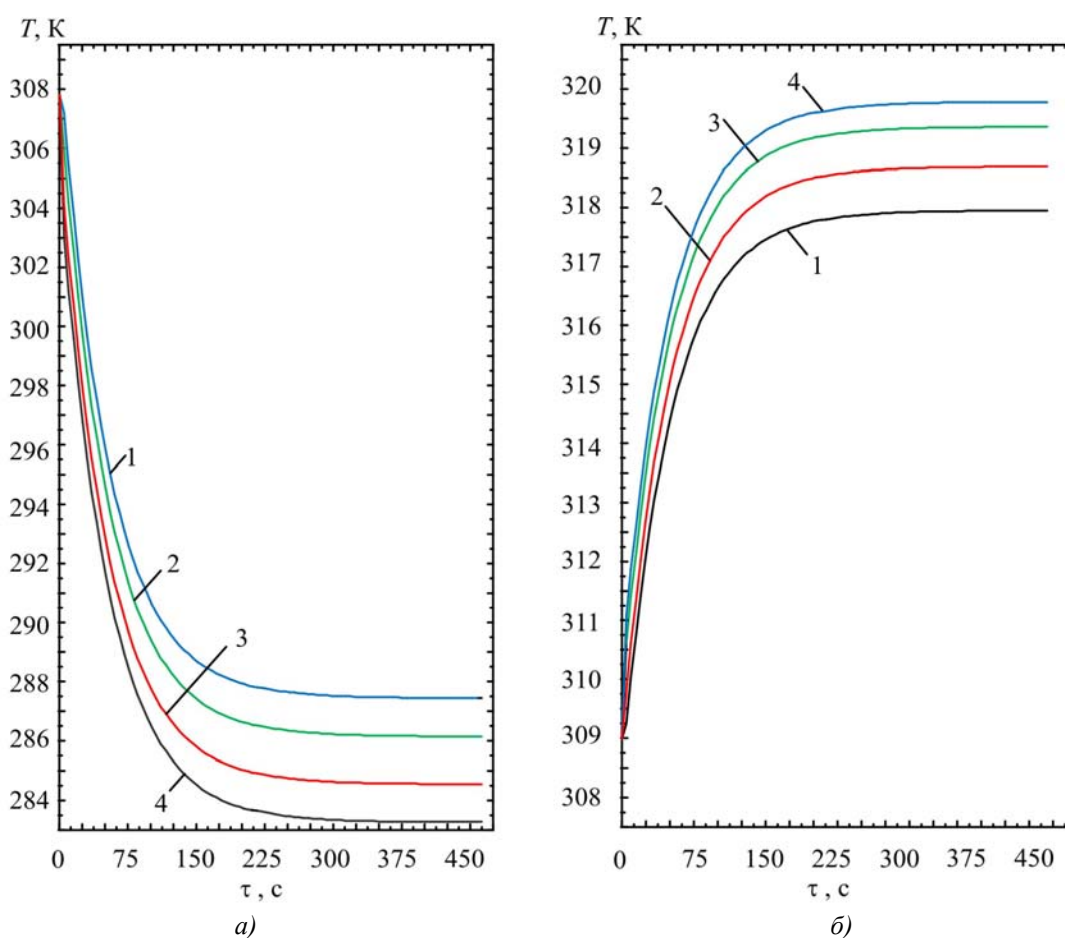


Рис. 2. Изменение температуры имитатора биологического объекта во времени при охлаждающем (а) и нагревающем (б) воздействиях для различных значений $q_{ТЭМ_j}(x, y)$.
 1 – $q_{ТЭМ_j} = 7000 \text{ Вт}/\text{м}^2$; 2 – $q_{ТЭМ_j} = 9000 \text{ Вт}/\text{м}^2$; 3 – $q_{ТЭМ_j} = 11000 \text{ Вт}/\text{м}^2$; 4 – $q_{ТЭМ_j} = 13000 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Как следует из приведенных зависимостей, продолжительность выхода в стационарный режим системы составляет для работы прибора в режиме охлаждения порядка 5 мин и для работы прибора в режиме нагрева – 4 мин. При этом увеличение поверхностной плотности теплового потока от ТЭМ приводит соответственно к уменьшению температуры биологического объекта при работе ТЭС в режиме охлаждения и увеличению его температуры при работе ТЭС в режиме нагрева, что соответствует увеличению холодо- и

теплопроизводительности модулей. Так увеличение значения $q_{ТЭМ_j}(x,y)$ от 7000 до 13000 Вт/м² при охлаждении биологического объекта снижает его температуру от 287.5 до 283 К, а при нагреве увеличение $q_{ТЭМ_j}(x,y)$ на ту же величину повышает температуру объекта воздействия от 317.7 до 320 К.

Следует отметить, что представляется целесообразным вывод ТЭС на рабочий режим до проведения косметологических процедур с целью повышения их комфортности. Этого можно достичь путем предварительного охлаждения (нагрева) основания и уже затем, по достижении требуемых температур, его наложения на область лица человека.

Использование предложенной конструкции ТЭС позволяет реализовать динамический тепловой режим работы прибора, характеризующийся сменой режимов охлаждения и нагрева в соответствии с задаваемой программой.

Для исследования возможностей ТЭС при реализации такого режима работы нами получены зависимости изменения температуры имитатора биологического объекта во времени при смене режимов работы прибора (рис. 3). Результаты представлены для $q_{ТЭМ_j}(x,y)$, равной 6000; 5000 и 4000 Вт/м². В обоих случаях продолжительность переходного процесса с режима охлаждения на режим нагрева и наоборот составляет около 5 мин, что требует дальнейшей оптимизации в части сокращения продолжительности перехода с одного режима на другой.

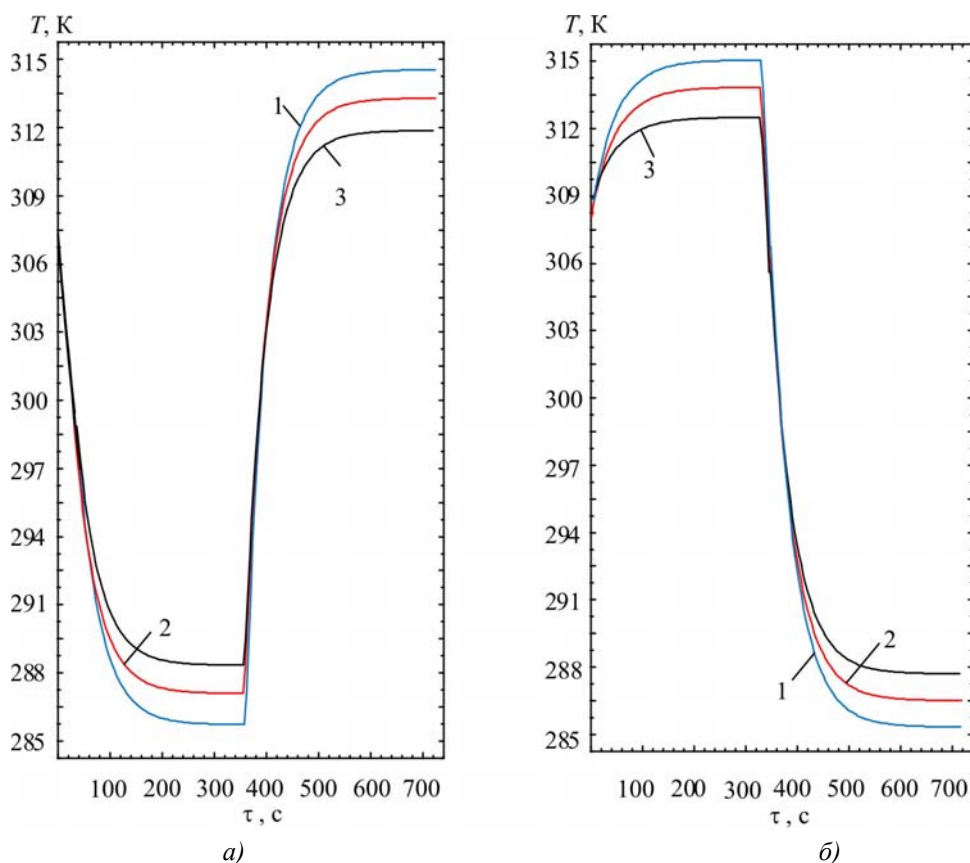


Рис. 3. Изменение температуры биологического объекта во времени при контрастном динамическом тепловом воздействии с переходом ТЭС из режима охлаждения в режим нагрева (а) и из режима нагрева в режим охлаждения (б) для различных значений $q_{ТЭМ_j}$: 1 – 6000 Вт/м²; 2 – 5000 Вт/м²; 3 – 4000 Вт/м².

Данная оптимизация представляется возможной путем подбора соответствующего типа ТЭМ, характеризующегося большим быстродействием; переходом при переключении ТЭС с охлаждения на нагрев от режима максимального коэффициента охлаждения (нагревания) до режима максимальной холодопроизводительности (теплопроизводительности); уменьшением общей теплоемкости конструкции путем подбора соответствующего материала основания; уменьшением общей тепловой инерционности конструкции за счет исключения отдельных зон лица человека из косметологической процедуры и, соответственно, площади основания (воздействие только на отдельные участки лица человека по мере необходимости); размещением ТЭМ непосредственно в зоне воздействия, а не использование их для охлаждения (нагревания) всего основания.

Здесь следует отметить, что существующие аналоги, реализующие подобного рода тепловые косметологические процедуры, например, косметологические аппараты Vivax CryoPro (компания "Vivax", Франция) [7], ОхОтА-5М (ООО "ОхОта", г. Москва) [8], Flash 1 Jumbo (компания "General Project", Италия) [9] и другие, достаточно подробно описанные в [4], обладают более высоким быстродействием (возможна реализация смены режима в пределах десятков секунд). Однако отличительной особенностью данных систем является использование в качестве исполнительного элемента малогабаритного зонда, при проведении процедур механически перемещаемого по лицу человека. При этом высокая скорость смены тепловых режимов воздействия относится только к зоне действия этого зонда в данный момент времени. Если же рассматривать косметологическую процедуру по отношению ко всему лицу пациента, либо большей его части, то реализация контрастного теплового действия будет существенно более продолжительной. Таким образом, отсутствие возможности одновременного охвата больших по площади зон воздействия будет нивелировать преимущество в быстродействии аналогов, снижать эффективность процедур, повышать их продолжительность при охвате всего лица в целом.

На основе анализа полученных значений теплового потока, формируемых ТЭС, эквивалентных величине холодо- и теплопроизводительности ТЭМ, может быть произведен расчет характеристик последних, составляющий вторую задачу, решаемую при построении модели системы. Искомыми величинами в данном случае являются геометрические размеры термоэлементов, входящих в состав модуля, величина питающего электрического тока, потребляемая электрическая энергия. Подробное описание методики расчета данных характеристик ТЭМ приведено в [10]. При этом 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 [11]. Данное программное обеспечение позволяет получить зависимости изменения таких параметров ТЭМ, как холодопроизводительность, холодильный коэффициент от его токовых характеристик.

Выводы

1. На сегодняшний день в косметологической практике все большее распространение получают методы воздействия, основанные на использовании теплового фактора

- (охлаждение и нагрев биологического объекта).
2. Среди существующих методик тепловых косметологических процедур эффективным является использование технических средств, выполненных на базе термоэлектрических преобразователей энергии.
 3. Разработана ТЭС для теплового косметологического воздействия на лицо человека, исполнительными элементами которой являются ТЭМ, дающие возможность сочетать в едином приборе режимы охлаждения и нагрева.
 4. Разработана модель ТЭС для проведения тепловых косметологических процедур, построенная на основе решения двумерной нестационарной задачи теплопроводности для системы сложной конфигурации.
 5. Получены зависимости изменения температуры во времени в различных точках объекта воздействия – участка кожного покрова, подвергающегося тепловым косметологическим процедурам, в зависимости от холодопроизводительности и теплопроизводительности ТЭМ.
 6. Установлено, что продолжительность выхода на режим ТЭС составляет порядка 4 – 5 мин, поэтому представляется целесообразным вывод ТЭС на рабочий режим до проведения косметологических процедур путем их предварительного охлаждения или нагрева.
 7. В рамках эксперимента установлено, что продолжительность переключения ТЭС с режима охлаждения в режим нагрева и наоборот составляет 5 мин., что требует дальнейшей оптимизации конструкции за счет использования более совершенных типов ТЭМ, варьирования режимов работы ТЭМ, а также уменьшения общей теплоемкости прибора.

Литература

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. Анатычук Л.И., Денисенко О.И., Кобылянский Р.Р., Каденюк Т.Я. Об использовании термоэлектрического охлаждения в дерматологии и косметологии. *Термоэлектричество*. 2015. № 3. С. 57 – 71.
5. Термоэлектрическое устройство для косметологических процедур на лицо человека Пат. № 2562509 РФ: опубл. 10.09.2015, бюл. № 25.
6. 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.
7. <http://ankportal.ru/catalog/vivax-cryo-pro>.
8. <http://www.tepmoxota.ru/agregat.htm>.
9. <http://medbuy.ru/apparat-dlya-elektroepilyacii/general-projektflash-1-jumbo>.
10. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Киев. 1979. 768 с.
11. <http://www.kryotherm.ru>.

Поступила в редакцию 21.11.2016