

Абдулхакимов У.І., Євдулов Д.В., Євдулов О.В., Набієв Н.А.

ФДБОУ ВПО «Дагестанський державний технічний університет»,
пр. імама Шаміля, 70, Махачкала, 367015, Росія

МОДЕЛЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ТЕПЛОВИХ КОСМЕТОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕДУР

Розглянута модель термоелектричної системи для проведення теплових косметологічних процедур, побудована на основі розв'язку двовимірної нестационарної задачі теплопровідності для системи складної конфігурації. Отримані залежності зміни температури в часі в різних точках об'єкта впливу – ділянки шкірного покриву, що зазнає теплових косметологічних процедур, залежно від холодопродуктивності й теплопродуктивності термоелектричних модулів.

Ключові слова: термоелектрична система, тепловий вплив, косметологія, біологічний об'єкт, температурне 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.

Вступ

В даний час у практиці проведення косметологічних процедур усе більше поширення одержують методи, засновані на тепловому впливі (термо- і кріотерапія) [1, 2]. Таке досить активне використання методів даного типу пов'язане з тим, що тепла дія дуже впливає на енергетичний баланс в організмі. Під впливом теплоти кровоносні й лімфатичні судини розширюються, що поліпшує кровообіг у багатьох внутрішніх органах. Дана обставина приводить до активізації обміну речовин і якісного насичення організму живильними речовинами й киснем. Нагрівання стимулює окиснення жиру, очищає організм, виводячи через піт шкідливі токсини й інші продукти життєдіяльності, тим самим сприяючи поліпшенню стану шкіри. Охолодження має сильний ефект, що омолоджує, розгладжує зморшки, усуває поширення вугрового висипу й акне, целюлітні відкладання, згладжує рубці, видаляє шкіряні утвори, папіломи й доброякісні пухлини. Охолодні маски знімають набряклість обличчя, моделюють його форму, розгладжують зморшки й поліпшують колір. Тепловий масаж застосовується для зміцнення шкіри голови й коріння волосся, ефективно лікує себорею.

Застосування теплового впливу на тіло в цілому або його частин постійно

удосконалюється, диференціюється й у цей час являє собою ряд апробованих методик, кожна з яких має свої показання [3]. Використання теплового впливу в косметологічній практиці на сьогоднішній день розвивається по двох основних напрямках. По-перше, охолодження або нагрівання всього організму або порівняно значних його частин. По-друге, тепловий вплив тільки на окремі ділянки тканини, у тому числі на патологічно змінені.

Якщо в першому випадку для охолодження (нагрівання) усього організму застосовуються потужні холодильні й теплові машини (наприклад, парокompресійні, абсорбційні й т.п.), то для теплового впливу на окремі зони людського організму можуть бути використані системи з меншою тепло- і холодопродуктивністю на основі інших принципів перетворення енергії.

У цих умовах для локального теплового впливу з метою проведення косметологічних процедур перспективним є застосування термоелектричних систем (ТЕС) [4], що відрізняються високою надійністю, екологічністю, безшумністю, функціональністю й значним ресурсом роботи, а також можливістю простого переходу від режиму охолодження до режиму нагрівання й навпаки.

Метою роботи є розробка теоретичної моделі для дослідження різних режимів роботи ТЕС для проведення теплових косметологічних процедур, що враховує складну конфігурацію системи, а також можливість одноразового контрастного теплового впливу на біологічний об'єкт у довільних зонах.

Конструкція ТЕС для проведення теплових косметологічних процедур.

Зовнішній вигляд активної частини ТЕС (баз блоку керування) показаний на рис. 1 [5]. До її складу входить основа, виконана у вигляді маски, що повторює контури обличчя людини з отворами в області очей, носа й рота. У чоловічій і щокочових областях із внутрішньої сторони основи розташовані зони теплового впливу, виконавчим елементом яких є термоелектричні модулі (ТЕМ), для створення рівномірного теплового потоку, контактуючі з тепловирівнюючими пластинами. ТЕМ підключаються до програмованого джерела постійного струму, що реалізує різні режими роботи модулів (охолодження, нагрівання, їхнє чергування) залежно від виду косметологічної процедури. Доза й тривалість теплового впливу визначається лікарем-косметологом, ним же проводиться поточний контроль над станом пацієнта.



Рис. 1. Зовнішній вигляд активної частини системи для проведення теплових косметологічних процедур.

Модель ТЕС для проведення теплових косметологічних процедур.

Модель побудована на основі розв'язку двох задач: визначення необхідних величин теплового потоку від виконавчого елемента ТЕС – ТЕМ і розрахунків основних характеристик останніх.

Розв'язок першої задачі проводиться на основі аналізу температурного поля пластини довільної форми, що представляє собою об'єкт впливу, з дискретними джерелами енергії, що відповідають ТЕМ у системі [6]. З урахуванням представлення джерел і стоків теплоти (ТЕМ) у вигляді східчастої функції, математичне формулювання задачі розрахунків температурного поля об'єкта впливу отримане у наступному вигляді:

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

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

$$q_{ТЕМj}(x, y) = \begin{cases} \frac{Q_{ТЕМj}}{S_{ТЕМj}} & \text{в області джерела енергії} \\ 0 & \text{поза області джерела енергії} \end{cases}, \quad (3)$$

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

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

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

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

де T – температура в будь-якій точці об'єкта впливу; $T_{сер}$ – температура навколишнього середовища; τ – час; δ – товщина пластини; λ – ефективний коефіцієнт теплопровідності об'єкта впливу; α – коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище ($\alpha = \text{const}$); c – теплоємність об'єкта впливу, ρ – густина об'єкта впливу, $q_{ТЕМj}(x, y)$ – сумарна поверхнева густина теплового потоку від локальних джерел і стоків теплоти, $q_{ТЕМj}(x, y)$ – поверхнева густина теплового потоку від j -го локального джерела теплоти (ТЕМ); $Q_{ТЕМj}$ – потужність, що розсіюється j -м локальним джерелом теплоти; $q_{сер}$ – поверхнева густина теплового потоку на об'єкт впливу від навколишнього середовища; L – крива, що обмежує площу біологічного об'єкта, на який здійснюється тепловий вплив, n – нормаль до кривої L , $\mathbf{n} = (x\mathbf{h} + y\mathbf{g})$; \mathbf{h}, \mathbf{g} – одиничні вектора.

Розв'язок рівнянь чисельним методом кінцевих елементів (1)–(7) дав можливість визначити зміну температури в різних точках об'єкта впливу – ділянки шкірного покриву, що зазнає теплових косметологічних процедур, а також відстежити її зміну залежно від величини теплового потоку від ТЕС (холодопродуктивності й теплопродуктивності ТЕМ), зовнішніх умов.

Розрахунки проводились відповідно до необхідних режимів проведення косметологічних процедур: температура об'єкта впливу – $283 \div 313$ К, тривалість впливу – $3 \div 12$ хв., можливість чергування режиму нагрівання й охолодження. У моделі системи передбачалося використання 6 стандартних ТЕМ, 2 з яких розташовані в чоловій частині, і по 2 у щокових зонах. Розміри ТЕМ: довжина – 40 мм, ширина – 40 мм. У якості вихідних приймалися наступні дані:

$\lambda = 0.6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $C = 3458 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, $\rho = 1041 \text{ кг/м}^3$, $T_{\text{сер}} = 295 \text{ К}$, $\alpha = 5 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.

Отримані залежності зміни в часі температури біологічного об'єкта в зонах впливу при рівномірному й контрастному тепловому впливі. Результати розрахунків наведені на рис. 2 – 3.

На рис. 2 представлені залежності зміни в часі температури поверхні основи, що приводиться в контакт із обличчям людини при охолоджуючому і зігріваючому впливі $q_{\text{ТЕМ}_j}(x, y)$ для значень, відповідно рівних 7000 Вт/м^2 ; 9000 Вт/м^2 ; 11000 Вт/м^2 ; 13000 Вт/м^2 .

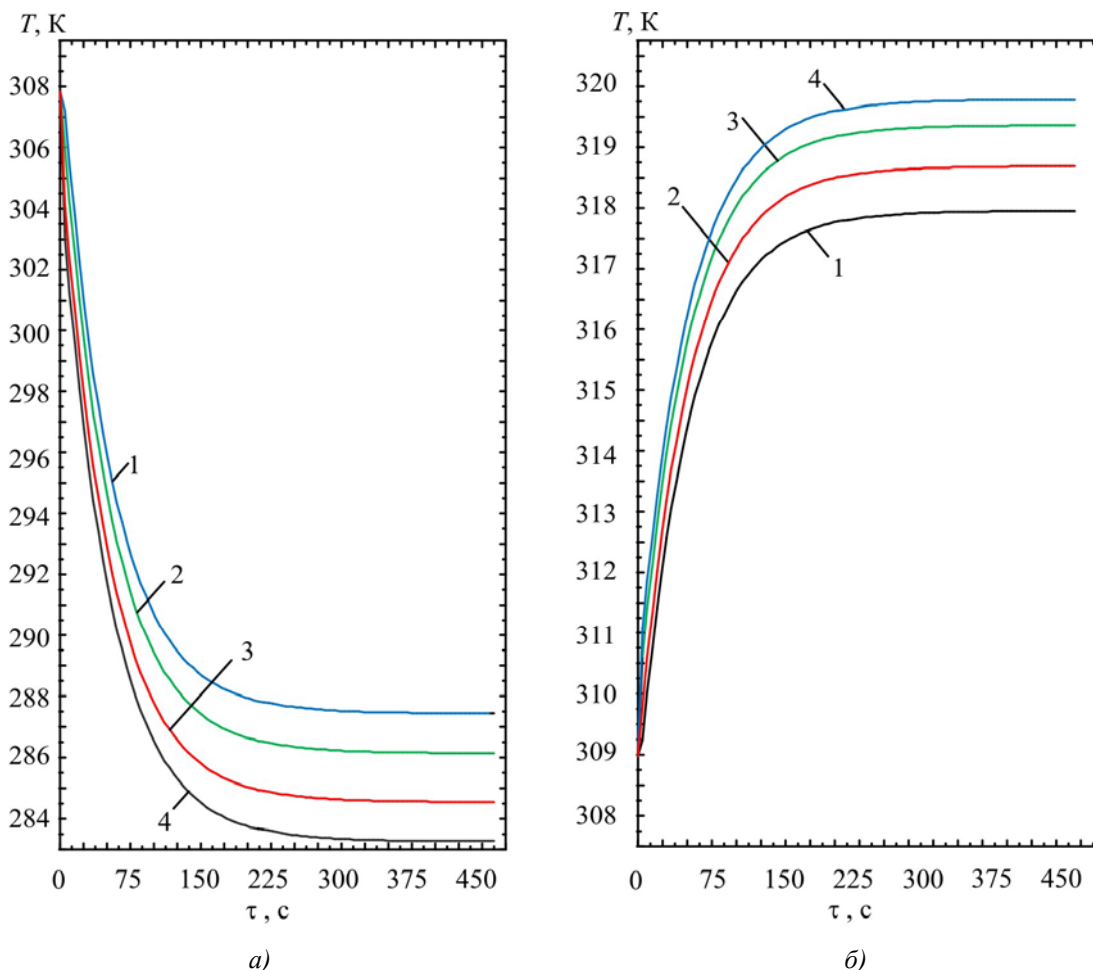


Рис. 2. Зміна температури імітатора біологічного об'єкта в часі при охолоджуючому (а), при зігріваючому впливі (б), для різних значень $q_{\text{ТЕМ}_j}(x, y)$: 1 – $q_{\text{ТЕМ}_j} = 7000 \text{ Вт/м}^2$; 2 – $q_{\text{ТЕМ}_j} = 9000 \text{ Вт/м}^2$; 3 – $q_{\text{ТЕМ}_j} = 11000 \text{ Вт/м}^2$; 4 – $q_{\text{ТЕМ}_j} = 13000 \text{ Вт/м}^2$.

Як випливає з наведених залежностей тривалість виходу в стаціонарний режим системи становить для роботи приладу в режимі охолодження порядку 5 хв і для роботи приладу в режимі нагрівання – 4 хв. При цьому збільшення поверхневої густини теплового потоку від ТЕМ приводить відповідно до зменшення температури біологічного об'єкта при роботі ТЕС у режимі охолодження й збільшенню його температури при роботі ТЕС у режимі нагрівання, що відповідає збільшенню холодо- і теплопродуктивності модулів. Так збільшення значення $q_{\text{ТЕМ}_j}(x, y)$ ТЕМ струму з 7000 Вт/м^2 до 13000 Вт/м^2 при охолодженні біологічного об'єкта знижує його температуру з 287.5 К до 283 К , а при нагріванні збільшення $q_{\text{ТЕМ}_j}(x, y)$ на ту ж величину підвищує температуру об'єкта впливу з 317.7 К до 320 К .

Тут слід зазначити, що представляється доцільним виводити ТЕС на робочий режим до

проведення косметологічних процедур з метою підвищення їх комфортності. Зазначене може бути реалізоване шляхом попереднього охолодження (нагрівання) основи й уже потім по досягненню необхідних температур його накладення на область обличчя людини.

З використанням запропонованої конструкції ТЕС може бути реалізований динамічний тепловий режим роботи приладу, що характеризується зміною режимів охолодження й нагрівання у відповідності із програмою, що задається.

Для дослідження можливостей ТЕС при реалізації такого режиму роботи отримані залежності зміни температури імітатора біологічного об'єкта в часі при зміні режимів роботи приладу, наведені на рис. 3. Результати представлено для $q_{ТЕМj}(x, y)$, рівної 6000 Вт/м^2 ; 5000 Вт/м^2 ; 4000 Вт/м^2 . В обох випадках тривалість перехідного процесу з режиму охолодження на режим нагрівання й навпаки становить порядку 5 хв, що, вимагає подальшої оптимізації в частині скорочення тривалості переходу з одного режиму на іншій.

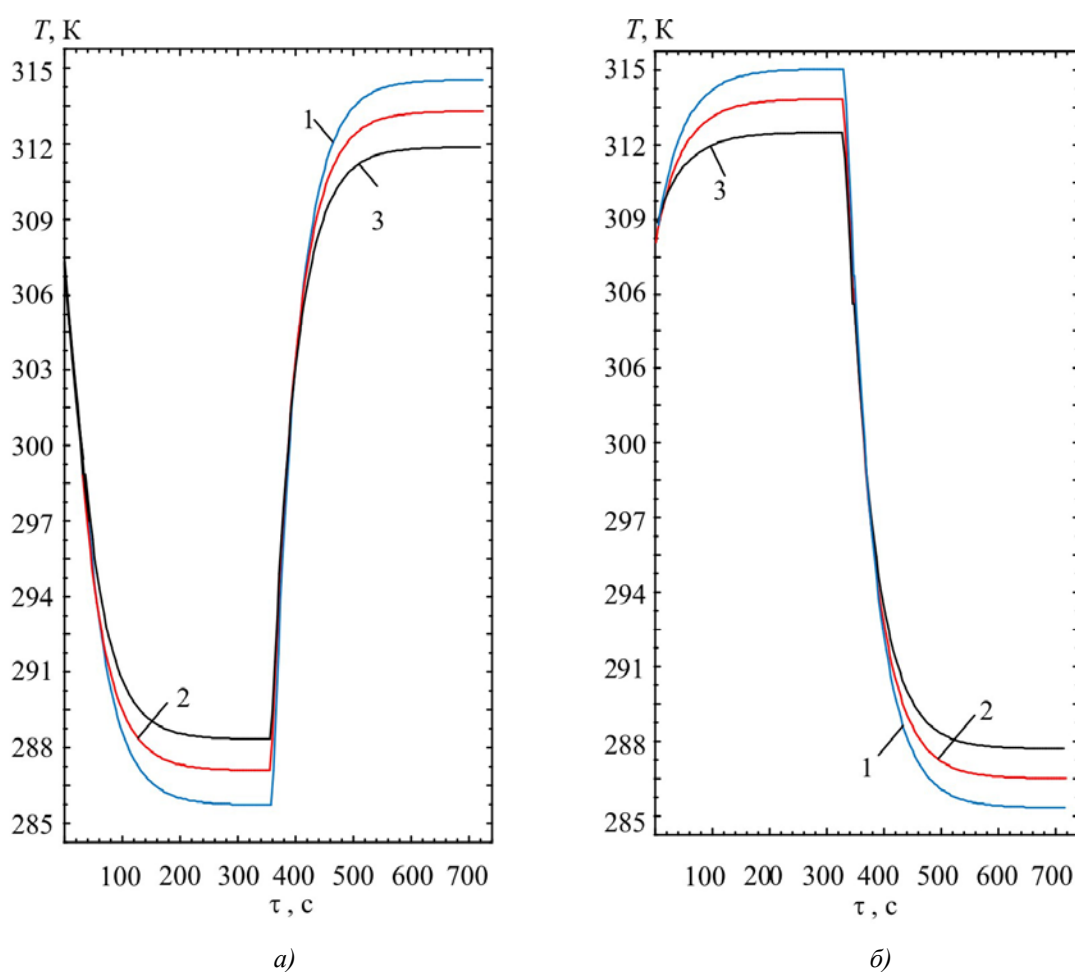


Рис. 3. Зміна температури біологічного об'єкта в часі при контрастному динамічному тепловому впливі з переходом ТЕС з режиму охолодження в режим нагріву (а), і з режиму нагріву в режим охолодження (б), для різних значень $q_{ТЕМj}$:
1 – $q_{ТЕМj} = 6000 \text{ Вт/м}^2$; 2 – $q_{ТЕМj} = 5000 \text{ Вт/м}^2$; 3 – $q_{ТЕМj} = 4000 \text{ Вт/м}^2$.

Дана оптимізація представляється можливою шляхом добору відповідного типу ТЕМ, що характеризується більшою швидкістю; переходом при перемиканні ТЕС із охолодження на нагрівання з режиму максимального холодильного (теплого) коефіцієнта в режим максимальної холодопродуктивності (теплопродуктивності); зменшенням загальної

теплоємності конструкції шляхом добору відповідного матеріалу основи; зменшенням загальної теплової інерційності конструкції за рахунок виключення окремих зон обличчя людини з косметологічної процедури й відповідно площі основи (вплив тільки на окремі ділянки обличчя людини в міру необхідності), розміщенням ТЕМ безпосередньо в зоні впливу, а не використання їх для охолодження (нагрівання) усієї основи.

Тут слід зазначити, що існуючі аналоги, котрі реалізують подібного роду теплові косметологічні процедури, наприклад косметологічні апарати Vivax Стурорго (компанія "Vivax", Франція) [7], ОхОта-5М (ТОВ "ОхОта", м. Москва) [8], Flash 1 Jumbo (компанія "General Project", Італія) [9] і інші, досить докладно описані в [4], мають більш високу швидкодію (може бути реалізована зміна режиму в межах десятків секунд). Однак відмінною рисою даних систем є використання як виконавчого елемента малогабаритного зонда, при проведенні процедур механічно переміщуваного по обличчю людини. При цьому висока швидкість зміни теплових режимів впливу відноситься тільки до зони дії цього зонда в цей момент часу. Якщо ж розглядати косметологічну процедуру стосовно всього обличчя пацієнта, або більшої його частини, то реалізація контрастної теплової дії буде суттєво більш тривалою. Таким чином, відсутність можливості одночасного охоплення більших по площі зон впливу буде нівелювати перевагу у швидкодії аналогів, знижувати ефективність процедур, підвищувати їхню тривалість при охопленні всього обличчя в цілому.

На основі аналізу отриманих значень теплового потоку, формованих ТЕС, еквівалентних величині холодо- і теплопродуктивності ТЕМ, може бути проведений розрахунок характеристик останніх, що становить другу задачу, розв'язувану при побудові моделі системи. Шуканими величинами в цьому випадку є геометричні розміри термоелементів, що входять до складу модуля, величина електричного струму живлення, споживана електрична енергія. Докладний опис методики розрахунків даних характеристик ТЕМ наведено в [10]. При цьому в більшості випадків у ТЕС можуть бути використані ТЕМ стандартного типу, добір яких може бути зроблений з використанням спеціальних пакетів прикладних програм. Для досліджуваного варіанта ТЕС, наприклад, можуть бути використані стандартні ТЕМ типу ТВ-127-1.0-1.5, вироблені ІПФ Кріотерм (м. Санкт-Петербург), що повною мірою реалізують необхідні режими проведення терапевтичних процедур. Для їхнього добору може бути використаний пакет прикладних програм Thermoelectric system calculation [11]. Дане програмне забезпечення дозволяє одержати залежності зміни таких параметрів ТЕМ, як холодопродуктивність, холодильний коефіцієнт від його струмових характеристик.

Висновки

1. На сьогоднішній день у косметологічній практиці все більше поширення одержують методи впливу, засновані на використанні теплового фактора (охолодження й нагрівання біологічного об'єкта).
2. Серед існуючих методик теплових косметологічних процедур ефективним є використання технічних засобів, виконаних на базі термоелектричних перетворювачів енергії.
3. Розроблена ТЕС для теплового косметологічного впливу на обличчя людини, виконавчими елементами в якій є ТЕМ, що дають можливість поєднувати в єдиному приладі режими охолодження й нагрівання.
4. Розроблена модель ТЕС для проведення теплових косметологічних процедур, побудована на основі розв'язку двовимірної нестационарної задачі теплопровідності для системи

- складної конфігурації.
- Отримані залежності зміни температури в часі в різних точках об'єкта впливу – ділянки шкірного покриву, що зазнає теплових косметологічних процедур, залежно від холодопродуктивності й теплопродуктивності ТЕМ.
 - Установлено, що тривалість виходу на режим ТЕС становить порядку 4-5 хв, тому представляється доцільним виводити ТЕС на робочий режим до проведення косметологічних процедур шляхом їхнього попереднього охолодження або нагрівання.
 - У рамках експерименту встановлено, що тривалість перемикання ТЕС із режиму охолодження в режим нагрівання й навпаки становить 5 хв., що вимагає подальшої оптимізації конструкції за рахунок використання більш досконалих типів ТЕМ, варіювання режимів роботи ТЕМ, а також зменшення загальної теплоємності конструкції приладу.

Література

- Ежов В.В. Физиотерапия и физиопрофилактика как методы и средства сохранения и восстановления здоровья. *Физиотерапия, бальнеология и реабилитация*. 2011. № 4. С. 33 – 36.
- Боголюбов В.М., Улащик В.С. Комбинирование и сочетание лечебных физических факторов. *Физиотерапия, бальнеология и реабилитация*. 2004. № 5. С. 39 – 45.
- Зубкова С.М. Роль тепловой компоненты в лечебном действии физических факторов. *Физиотерапия, бальнеология и реабилитация*. 2011. № 6. С. 3 – 10.
- 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.
- Термоэлектрическое устройство для косметологических процедур на лицо человека Пат. № 2562509 РФ: опубл. 10.09.2015, бюл. № 25.
- 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.
- <http://ankportal.ru/catalog/vivax-cryo-pro>.
- <http://www.tepmoxota.ru/agregat.htm>.
- <http://medbuy.ru/apparat-dlya-elektroepilyacii/general-projektflash-1-jumbo>.
- Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Киев. 1979. 768 с.
- <http://www.kryotherm.ru>.

Надійшла до редакції 21.11.2016