

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.362: 537.322

DOI: 10.21822/2073-6185-2023-50-2-6-14

Оригинальная статья /Original Paper

Методика расчета двухкаскадной термоэлектрической системы  
для локальной гипотермии

З.М.-З. Бадрудинова, О.В. Евдулов, З.А. Камилова, С.Г. Магомедова, Г.М. Гусейнов  
Дагестанский государственный технический университет,  
367026, г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70, Россия

**Резюме. Цель.** Целью исследования является разработка методики расчета двухкаскадной термоэлектрической системы (ТЭС) для локальной гипотермии, а также анализ ее работы. **Методы.** Модель построена на основе решения трех задач, состоящих в определении параметров двухкаскадного термоэлектрического модуля (ТЭМ), теплофизических характеристик системы сопряжения с биологическим объектом и теплоотвода для охлаждения горячих спаев термомодуля. **Результаты.** По расчетной модели произведен расчет ТЭС, предназначенной для локальной гипотермии мягких тканей при лечении их воспалений и инфекционных образований, разработанной в лаборатории полупроводниковых термоэлектрических приборов и устройств Дагестанского государственного технического университета. Получены графики зависимости изменения холодопроизводительности ТЭМ, холодильного коэффициента, напряжения питания от перепада температур между спаями для различных значений тока питания, а также зависимость напряжения на ТЭМ от величины тока питания при различных значениях перепада температур между спаями, изменение температуры на холодном спае и мощности ТЭМ от тока питания. Графики рассчитаны при температуре горячего спая 300 К. **Вывод.** Установлено, что подобранный в результате расчета ТЭМ типа ТВ-2-(127-127)-1.15 имеет следующие характеристики: рабочий диапазон мощностей 8-10 Вт при среднем перепада температур между спаями 65 К, ток питания - 4,4-5,8 А при потребляемой мощности 45-85 Вт, холодильный коэффициент - 0,2-0,5.

**Ключевые слова:** термоэлектрическая система, двухкаскадный термоэлектрический модуль, тепловое воздействие, гипотермия, методика расчета, численный эксперимент, температура

**Для цитирования:** З.М.-З. Бадрудинова, О.В. Евдулов, З.А. Камилова, С.Г. Магомедова, Г.М. Гусейнов. Методика расчета двухкаскадной термоэлектрической системы для локальной гипотермии. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2023;50(2):6-14. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-6-14

Method for calculating a two-stage thermoelectric system for local hypothermia

Z.M.-Z. Badrudinova, O.V. Evdulov, Z.A. Kamilova, S.G. Magomedov, G.M. Guseynov  
Daghestan State Technical University,  
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

**Abstract. Objective.** The aim of the study is to develop a methodology for calculating a two-cascade thermoelectric system (TPS) for local hypothermia, as well as a theoretical analysis of its operation. **Method.** The model is built on the basis of solving three problems, consisting in determining the parameters of a two-stage thermoelectric module (TEM), thermophysical characteristics of the interface system with a biological object, and heat removal for cooling the hot junctions of the thermomodule. **Results.** According to the calculation model, the TES was calculated for local hypothermia of soft tissues in the treatment of their inflammation and infectious formations, developed in the laboratory of semiconductor thermoelectric devices and devices of the Daghestan State Technical University. Graphs of the dependence of the change in the cooling capacity of the TEM, the coefficient of performance, the supply voltage on the temperature differ-

ence between the junctions for various values of the supply current, as well as the dependence of the voltage on the TEM on the magnitude of the supply current at various values of the temperature difference between the junctions, the change in temperature by cold junction and TEM power from the supply current. The graphs are calculated at a hot junction temperature of 300 K. **Conclusion.** As a result of the calculations, it was found that the TV-2-(127-127)-1.15 TEM selected as a result of the calculation will have the following characteristics: an operating power range of 8-10 W with an average temperature difference between the junctions of 65 K, the supply current is 4.4-5.8 A with a power consumption of 45-85 W, the coefficient of performance is 0.2-0.5.

**Keywords:** thermoelectric system, two-stage thermoelectric module, thermal effect, hypothermia, calculation method, numerical experiment, temperature

**For citation:** Z.M.-Z. Badrudinova, O.V. Evdulov, Z.A. Kamilova, S.G. Magomedov, G.M. Huseynov. Method for calculating a two-stage thermoelectric system for local hypothermia. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Science. 2023; 50(2):6-14. DOI:10.21822/2073-6185-2023-50-2-6-14

**Введение.** В настоящее время для лечения различных заболеваний, связанных с повреждением, воспалением и гнойными инфекциями мягких тканей, активно используется локальная гипотермия пораженных зон [1-4]. Лечебные методики, основанные на ней, состоят в замораживании поврежденного участка до уровня температур порядка 240 K и ниже для активизации восстановительных процессов. При проведении такого рода процедур наблюдается снятие воспалительных процессов, отечности, улучшается циркуляция крови в микрососудах и трофика тканей [5-9]. Реализации данного метода теплового воздействия осуществляется посредством криогенных систем, работающих с использованием жидкого хладагента, парокомпрессионного холодильного оборудования, абсорбционных машин. К недостаткам рассмотренной аппаратуры относится ее громоздкость, обязательное наличие специальных емкостей с криоагентом, обеспечивающих его продолжительное хранение, сложность контроля дозировки охлаждающего воздействия [10].

В литературе рассматриваются устройства и системы, выполняющие данные функции, построенные на основе ТЭМ, работающие в режиме охлаждения [11-15]. В них реализуются такие преимущества последних, как малые размеры и масса, независимость от действия гравитационных сил, высокая надежность и ресурс работы, экологичность и бесшумность. Однако применение стандартных однокаскадных ТЭМ не позволяет снижать температуру мягких тканей до требуемого уровня и обеспечивать относительно высокую энергетическую эффективность прибора в целом.

**Постановка задачи.** Одним из возможных вариантов увеличения глубины охлаждения и повышения холодильного коэффициента термоэлектрических преобразователей энергии является их каскадирование [16, 17]. При таком подходе холодные спаи нижних каскадов термоэлектрических модулей, состоящих из последовательно соединенных термоэлементов, отводят теплоту от верхних, сокращая перепад температур между спаями отдельных каскадов и повышая энергетическую эффективность всего термоэлектрического охладителя в целом, существенно снижая температуру самого верхнего термомодуля. При этом на сегодняшний день в подобной термоэлектрической системе может использоваться до десяти и более каскадов.

Целью исследования является разработка методики расчета двухкаскадной ТЭС для локальной гипотермии, а также анализ ее работы.

**Методы исследования.** Конструктивно ТЭС для локальной гипотермии состоит из трех блоков, находящихся друг с другом в тепловом контакте, и включающих в себя непосредственно двухкаскадный ТЭМ (или несколько ТЭМ в зависимости от требуемой мощности прибора), систему сопряжения прибора с биологическим объектом, систему отвода теплоты от горячих спаев термомодуля. Соответственно, и расчетная модель ТЭС включает в себя решение трех задач, состоящих в определении параметров двухкаскадного ТЭМ, те-

плофизических характеристик системы сопряжения с биологическим объектом и теплоотвода для охлаждения горячих спаев термомодуля.

При расчете двухкаскадного ТЭМ предполагается, что питание каскадов последовательное. При этом обеспечение ТЭМ электрической энергией характеризуются равенством токов в каскадах, что позволяет произвести их термическое согласование не увеличением рабочих токов  $I_{ТЭМ}$ , а увеличением количества термоэлементов в первом каскаде (менее холодном) (рис. 1). При использовании данной схемы ограничения на температуры обоих каскадов не налагаются.

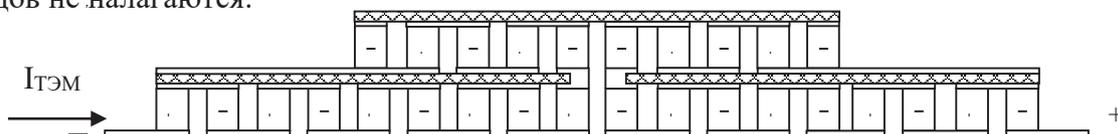


Рис. 1. Схема включения каскадов при последовательном питании двухкаскадного ТЭМ

Fig. 1. Scheme of switching on cascades with serial power supply of a two-stage TEM

Поэтому в данном случае можно задать оптимальную последовательность температур, т. е. оптимизировать каскад помимо величины питающего тока также еще по температурам его спаев.

Последовательная схема соединения каскадов содержит межкаскадные теплопереходы, которые должны обладать высокой теплопроводностью и удовлетворительной конструктивной и технологической совместимостью с материалом, из которого изготавливаются коммутационные пластины. Такая схема соединения позволяет оптимизировать параметры каскадного ТЭМ и осуществить более глубокое понижение температуры без значительного увеличения питающего тока.

Условие согласования тепловых потоков между каскадами следующее:

$$Q_{ТЭМ1} m_1 = Q_{ТЭМ2} m_2, \quad (1)$$

$$\text{равенства токов в каскадах: } I_{ТЭМ1} = I_{ТЭМ2} = I, \quad (2)$$

где индекс 1 соответствует первому (менее холодному) каскаду, а индекс 2 - второму (более холодному) каскаду. Используя указанные условия для случая работы ТЭМ в режиме максимальной эффективности из (1) можно получить:

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{e_1}{e_2} \frac{M_1}{M_2} \frac{M_1 T_{ТЭМ1} - T_{ТЭМ}}{M_2 T_{ТЭМ2} - T_{ТЭМ}} \frac{M_1^2 - 1}{M_1^2 - 1}. \quad (3)$$

Так как при последовательном питании каскадов токи в них равны, то расчет геометрических размеров ветвей (высоты  $\ell_{ТЭМ}$  и площади поперечного сечения  $s_{ТЭМ}$ ), а также значения силы тока питания в каждом каскаде осуществляется по формулам:

$$I_{ТЭМ} = \frac{(M^2 - 1) Q_{ТЭМ}}{eM(MT_{ТЭМГ} - T_{ТЭМx})}, \quad (4)$$

где  $M = \sqrt{1 + 0,5Z(T_{ТЭМx} + T_{ТЭМГ})}$ ,  $T_{ТЭМx}$  - температура холодного спаев термоэлемента,

$T_{ТЭМГ}$  - температура горячего спаев термоэлемента,  $t = \frac{T_{ТЭМГ}}{T_{ТЭМx}}$ ,  $Z = \frac{e^2}{(\sqrt{\lambda_p \rho_p} + \sqrt{\lambda_n \rho_n})^2}$  - доброт-

ность термоэлемента,  $e$  - коэффициент термо-э.д.с. термоэлемента,  $G = \frac{2M}{M-1} \frac{\sqrt{\lambda_p \rho_p} + \sqrt{\lambda_n \rho_n}}{\sqrt{\lambda_p \rho_p} + \sqrt{\lambda_n \rho_p}} \sqrt{\lambda_n \lambda_p}$ ,

$\lambda_p, \rho_p, \lambda_n, \rho_n$  - удельные теплопроводности и сопротивления ветвей терморпары р- и n-типа соответственно.

Геометрические размеры термоэлементов, входящих в состав ТЭМ рассчитываются из задаваемого отношения  $\frac{s_{ТЭМ}}{\ell_{ТЭМ}}$ , а также по известной величине питающего электрического тока:

$$\frac{\ell_{\text{ТЭМ}}}{S_{\text{ТЭМ}}} = \frac{e(T_{\text{ТЭМ}_r} - T_{\text{ТЭМ}_x})\sigma_p}{I_{\text{ТЭМ}}(M-1)\left(1 + \frac{\sigma_p}{\sigma_n} \frac{S_p}{S_n}\right)}, \quad (5)$$

$$\frac{\ell_{\text{ТЭМ}}/S_p}{\ell_{\text{ТЭМ}}/S_n} = \sqrt{\frac{\lambda_p \sigma_p}{\lambda_n \sigma_n}}. \quad (6)$$

Напряжение на всем ТЭМ определяется как сумма напряжений на каждом каскаде, а потребляемая электроэнергия рассчитывается по выражению:

$$W_{\text{ТЭМ}} = I_{\text{ТЭМ}}^2 R_{\text{ТЭМ}}, \quad (7)$$

где  $R_{\text{ТЭМ}} = n(\rho_n \frac{\ell_{\text{ТЭМ}}}{S_n} + \rho_p \frac{\ell_{\text{ТЭМ}}}{S_p})$  - электрическое сопротивление ТЭМ.

Система сопряжения ТЭМ с биологическим объектом представляет собой воздушный радиатор. Расчет его проводится по известным соотношениям, изложенным в [18]. При этом ключевым параметром помимо массогабаритных характеристик системы и теплофизических параметров материала, из которого она изготовлена, является ее тепловое сопротивление, определяемое по выражению:

$$\sigma_{\text{вр}} = \frac{\lambda_{\text{вр}} \cdot S_{\text{вр}}}{\delta_{\text{вр}}}, \quad (8)$$

где  $\lambda_{\text{вр}}$  - коэффициент теплопроводности воздушного радиатора,  $S_{\text{вр}}$  - площадь поверхностей соприкосновения воздушного радиатора и биологического объекта,  $\delta_{\text{вр}}$  - толщина воздушного радиатора.

Так как ТЭМ является двухкаскадным, то для отвода теплоты от его горячих спаев необходимо использовать жидкостную теплообменную систему. При теплотехническом расчете системы жидкостного теплосъема важным является учет режима ее течения, конструкции и состояния теплоносителя. Вынужденное течение жидкости делится на ламинарное, переходное и турбулентное. Каждый из перечисленных режимов соответствует определенному диапазону числа Рейнольдса. В трубчатых каналах течение ламинарное при  $Re < 2300$  и турбулентное при  $Re > 10^4$ . Переходное течение соответствует диапазону чисел Рейнольдса от  $2,3 \cdot 10^3$  до  $10^4$ .

Важной особенностью жидкостных систем отвода теплоты является наличие длинных прямолинейных каналов, по которым протекает теплоноситель, при этом протяженность каналов может быть существенно больше начального теплового участка, при этом интенсивность теплопередачи практически не зависит от скорости и температуры жидкости на входе. Для большинства разновидностей жидкостных систем теплосъема вследствие небольшой длины каналов теплопередача производится в пределах начального гидродинамического и теплового участков, а также зависит от условий на входе в транспортную зону. Наличие в подобных системах криволинейных каналов приводит к возникновению в теплоносителе центробежных сил, которые в общем случае могут оказывать определенное влияние на теплообмен. При относительно больших тепловых нагрузках на теплообменную поверхность жидкостной теплоотводящей системы в вынужденном потоке может возникнуть свободная конвекция, вызванная неоднородностью распределения температуры в теплоносителе. В отличие от вязкостного режима, соответствующего течению вязких жидкостей при отсутствии влияния свободной конвекции, в вязкостно-гравитационном режиме силы вязкости и подъемные силы сопоставимы.

Расчетное значение отводимого теплового потока  $q_{\text{ж}}$  в данном случае определяется по формуле:

$$q_{\text{ж}} = \alpha_{\text{ж}}(T_{\text{ТЭМ}_r} - T_{\text{ж}}),$$

где  $\alpha_{\text{ж}}$  - коэффициент теплоотдачи к жидкости;  $T_{\text{ж}}$  - среднemasсовая температура жидкости, протекающей в канале системы теплоотвода.

При вязкостном режиме в транспортной зоне ( $Re < 2300$ ) охлаждающей системы средние коэффициенты теплоотдачи к жидкости могут быть рассчитаны по формуле [19]

$$Nu = 1,55 \left( \frac{1}{Re d} \right)^{-\frac{1}{3}} \left( \frac{\mu_c}{\mu_{ж}} \right)^{-0,14} \phi_{\ell}, \quad (9)$$

справедливой при  $\frac{1}{Re d} \leq 0,05$  и  $0,07 \leq \frac{\mu_c}{\mu_{ж}} \leq 1500$ , где  $\phi_{\ell}$  - поправка на гидродинамический начальный участок,  $Re$  – число Пекле.

При однородном распределении скорости на входе и  $\frac{1}{Re d} \leq 0,1$

$$\phi_{\ell} = 0,6 \left( \frac{1}{Re d} \right)^{-\frac{1}{7}} \left( 1 + 2,5 \frac{1}{Re d} \right). \quad (10)$$

В выражениях (9)-(10) определяющими размерами, входящими в числа  $Re$ ,  $Pe$  и  $Nu$ , являются внутренний диаметр и длина транспортной зоны. При вязкостно-гравитационном режиме течения жидкости при расчете теплообмена используются следующее выражение:

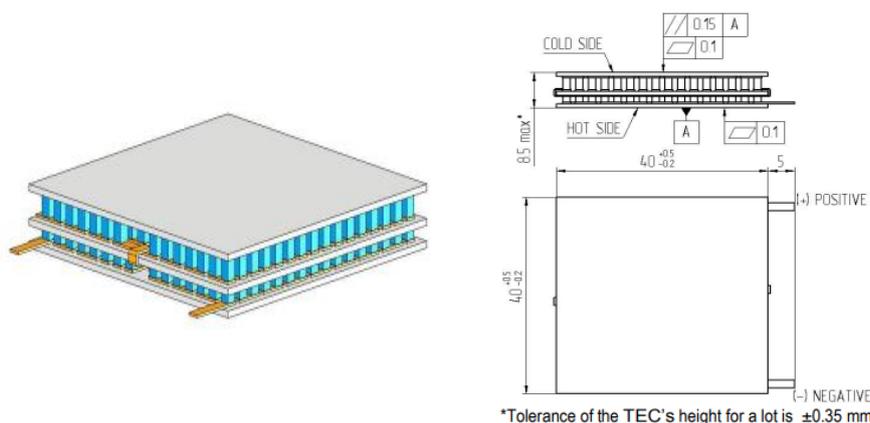
$$Nu = 0,35 \left( Pe \frac{\ell}{d} \right)^{0,3} \left( Gr Pr \frac{\ell}{d} \right)^{0,18}.$$

В случае турбулентного режима ( $Re > 10^4$ ) для расчета теплообмена в прямых гладких каналах при  $\frac{\ell}{d} \geq 50$  используется соотношение:

$$Nu = 0,023 Re_{ж}^{0,8} Pr_{ж}^{0,43} \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25}.$$

При переходном режиме течения жидкости ( $2,3 \cdot 10^3 < Re < 10^4$ ) теплопередача зависит от значительного количества параметров, достаточно трудно поддающихся учету. Расчет теплообмена осуществляется непосредственно по опытным данным, полученным в условиях, соответствующих расчетным [19].

**Обсуждение результатов.** В результате расчета по рассмотренной методике установлено, что для решаемых целей может быть использован двухкаскадный ТЭМ типа ТВ-2-(127-127)-1.15 (производитель - компания ООО «Криотерм», г. Санкт-Петербург) [20] с воздушным радиатором для сопряжения с биологическим объектом и жидкостной системой для отвода теплоты от его горячих спаев. Предельные параметры термомодуля следующие:  $I_{ТЭМ,max} = 5,8$  А,  $Q_{ТЭМ,max} = 34$  Вт,  $U_{ТЭМ,max} = 15,4$  В,  $\Delta T_{ТЭМ,max} = 84$  К,  $R_{ТЭМ} = 2,3$  Ом.



**Рис. 2. Внешний вид ТЭМ типа ТВ-2-(127-127)-1.15 и его геометрические размеры**  
**Fig. 2. Appearance of TEM type TV-2-(127-127)-1.15 and its geometrical dimensions**

На рис. 2. представлены внешний вид и характеристики данного ТЭМ. Графики представлены на рис. 3-6 при температуре горячего спаев 300 К.

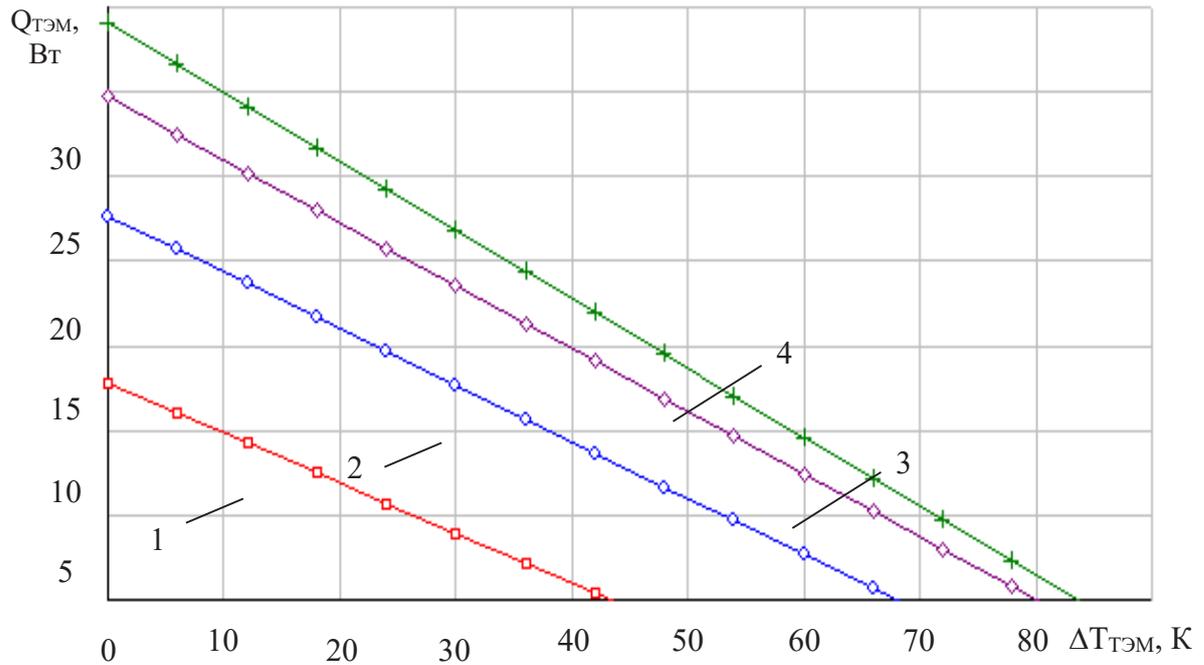


Рис. 3. Зависимость мощности ТВ-2-(127-127)-1.152 от перепада температур между спаями при различных значениях тока питания 1-  $I_{TЭМ}=1,5$  А, 2-  $I_{TЭМ}=2,9$  А, 3 -  $I_{TЭМ}=4,4$  А, 4 -  $I_{TЭМ}=5,8$  А  
 Fig. 3. Dependence of TV-2-(127-127)-1.152 power on the temperature difference between the junctions at different values of the supply current 1-  $I_{TЭМ}=1.5$  А, 2-  $I_{TЭМ}=2.9$  А, 3-  $I_{TЭМ}=4.4$  А, 4 -  $I_{TЭМ}=5.8$  А

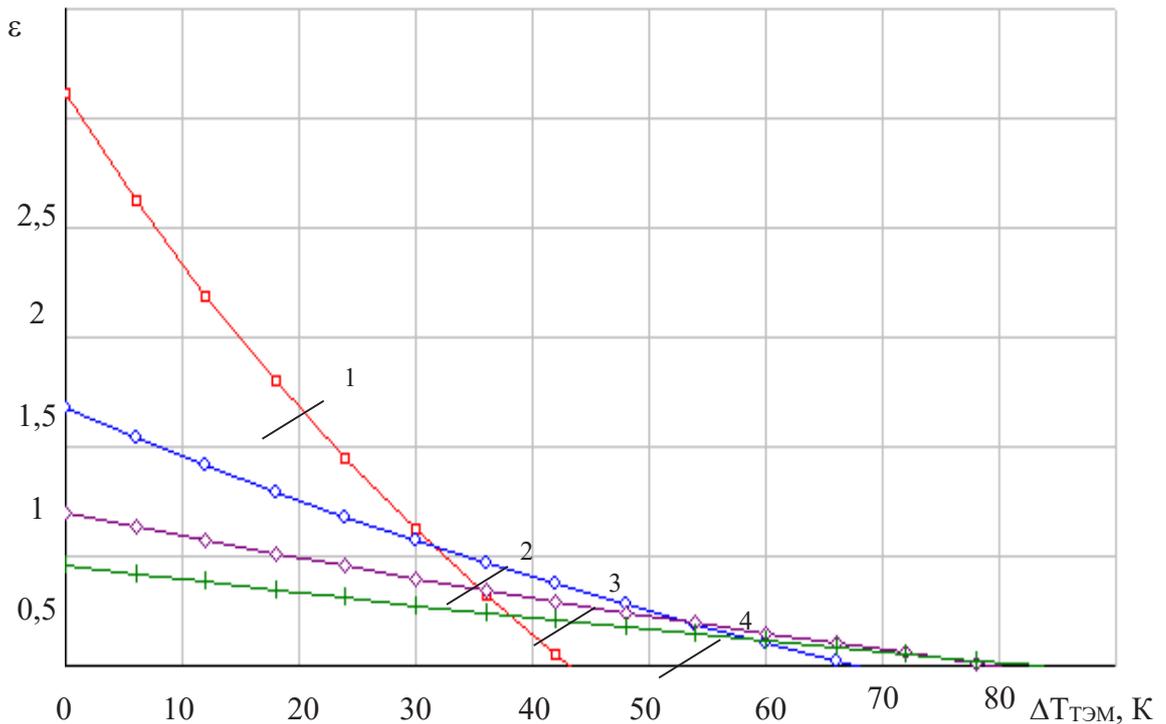


Рис. 4. Зависимость холодильного коэффициента ТЭМ ТВ-2-(127-127)-1.15 от перепада температур между спаями при различных значениях тока питания 1-  $I_{TЭМ}=1,5$  А, 2-  $I_{TЭМ}=2,9$  А, 3 -  $I_{TЭМ}=4,4$  А, 4 -  $I_{TЭМ}=5,8$  А  
 Fig. 4. Dependence of the coefficient of performance of TEM TV-2-(127-127)-1.15 on the temperature difference between the junctions at different values of the supply current 1-  $I_{TЭМ}=1.5$  А, 2-  $I_{TЭМ}=2.9$  А, 3-  $I_{TЭМ}=4.4$  А, 4 -  $I_{TЭМ}=5.8$  А

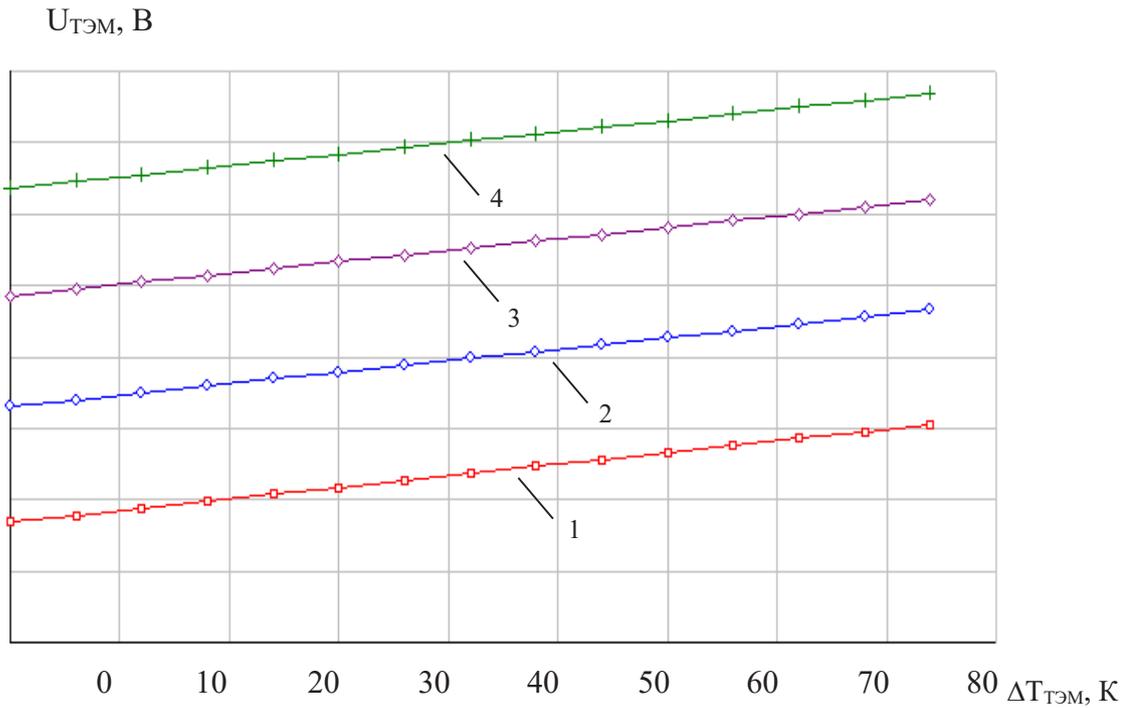


Рис. 5. Зависимость напряжения питания ТЭМ ТВ-2-(127-127)-1.15 от перепада температур между спаями при различных значениях тока питания 1-  $I_{ТЭМ}=1,9 А$ , 2-  $I_{ТЭМ}=3,8 А$ , 3 -  $I_{ТЭМ}=5,7 А$ , 4 -  $I_{ТЭМ}=7,6 А$

Fig. 5. Dependence of the supply voltage of TEM TV-2-(127-127)-1.15 on the temperature difference between the junctions at different values of the supply current 1-  $I_{ТЕМ} = 1.9 А$ , 2-  $I_{ТЕМ} = 3.8 А$ , 3 -  $I_{ТЕМ} = 5.7 А$ , 4 -  $I_{ТЕМ} = 7.6 А$

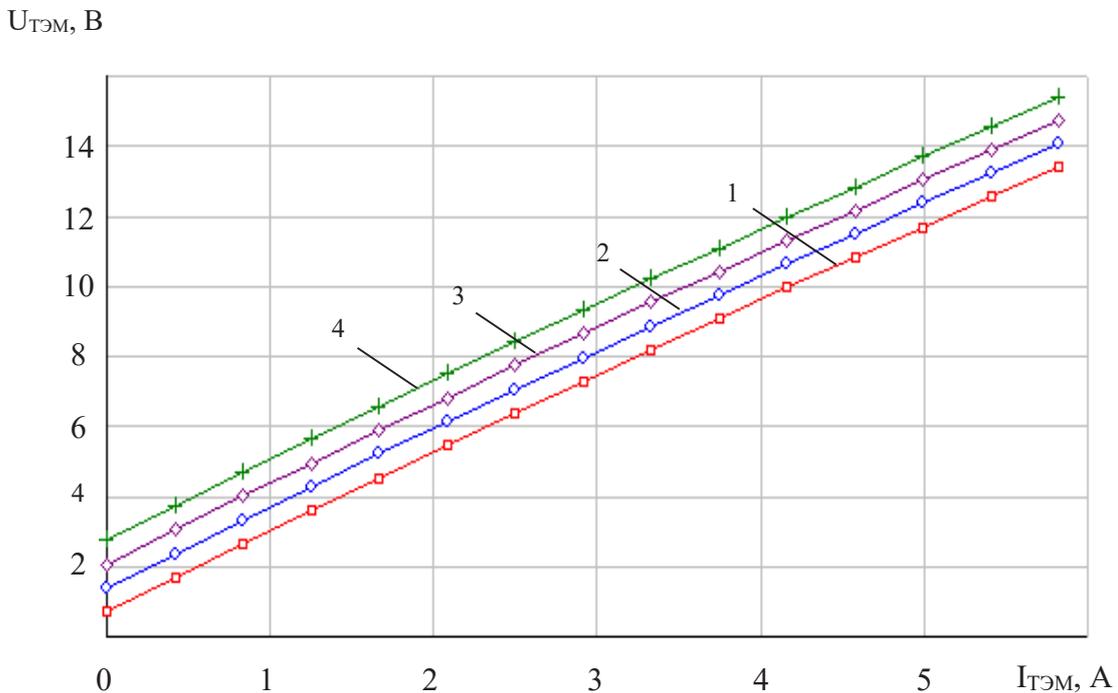


Рис. 6. Зависимость напряжения ТЭМ ТВ-2-(127-127)-1.15 от величины тока питания при различных значениях перепада температур между спаями 1-  $\Delta T_{ТЭМ} = 21 К$ , 2-  $\Delta T_{ТЭМ} = 42 К$ , 3 -  $\Delta T_{ТЭМ} = 63 К$ , 4 -  $\Delta T_{ТЭМ} = 84 К$

Fig. 6. Dependence of the voltage of TEM TV-2-(127-127)-1.15 on the magnitude of the supply current at different values of the temperature difference between the junctions 1-  $\Delta T_{ТЕМ} = 21 К$ , 2-  $\Delta T_{ТЕМ} = 42 К$ , 3 -  $\Delta T_{ТЕМ} = 63 К$ , 4 -  $\Delta T_{ТЕМ} = 84 К$

Для данного типа ТЭМ основные рабочие параметры имеют значения: рабочий диапазон мощностей 8-10 Вт при среднем перепаде температур между спаями 65 К, ток питания - 4,4-5,8 А при потребляемой мощности 45-85 Вт. Холодильный коэффициент изменяется в пределах от 0,2 до 0,5.

**Вывод.** Разработана расчетная модель двухкаскадной ТЭС для локальной гипотермии. Она включает в себя решение задач, состоящих в определении параметров двухкаскадного ТЭМ, теплофизических характеристик системы сопряжения с биологическим объектом и теплоотвода для охлаждения горячих спаев термомодуля. Представлен расчет характеристик ТЭС, выполненной на основе стандартного двухкаскадного ТЭМ типа ТВ-2-(127-127)-1.15 с воздушным радиатором для сопряжения с биологическим объектом и жидкостной системой для отвода теплоты от его горячих спаев. Расчеты показали, что данный тип модуля соответствует требованиям проведения лечебных процедур.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00130, <https://rscf.ru/project/23-29-00130/>.

**Acknowledgments.** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-29-00130, <https://rscf.ru/project/23-29-00130/>.

#### Библиографический список:

1. Зубкова С.М. Роль тепловой компоненты в лечебном действии физических факторов // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2011. - №6. - С.3-10.
2. Боголюбов В.М., Сидоров В.Д. Физиотерапия в реабилитации больных ревматоидным артритом // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2012. - № 2. - С.3-9.
3. Ушаков А.А. Практическая физиотерапия. М.: ООО Медицинское информационное агентство, 2009. - 612 с.
4. Пономаренко Г.Н. Восстановительная медицина: фундаментальные основы и перспективы развития // Физическая и реабилитационная медицина. - 2022. - т. 4, № 1. - С.8-20.
5. Боголюбов В.М. Техника и методики физиотерапевтических процедур. - М.: Бином, 2017. - 464 с.
6. Баранов А.Ю., Василенок А.В., Соколова Е.В., Чубова С.Д., Зиявидинов А.М. Выбор альтернативного криоагента для покрытия тепловой нагрузки в установке для общего криотерапевтического воздействия // Вестник Международной академии холода. - 2022. - № 1. - С.76-82.
7. Ежов В.В. Физиотерапия и физиопрофилактика как методы и средства сохранения и восстановления здоровья // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. - 2011. - № 4. - С.33-36.
8. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual. - New York: Springer, 2015. - 441 p.
9. Цыганов Д.И. Криомедицина: процессы и аппараты. - М.: Сайнс-Пресс, 2011. - 304 с.
10. Гуляев А.А. Оформление аппаратно/физиотерапевтических процедур согласно требованиям Минздрава РФ // Аппаратная косметология. - 2017. - № 1. - С.14-20.
11. 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.
12. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Набиев Н.А., Рагимова Т.А. Термоэлектрическое устройство для остановки кровотечения // Медицинская техника. 2019. № 2. С. 12-14.
13. Исмаилов Т.А. Евдулов О.В., Набиев Н.А., Магомедова С.Г. Модель термоэлектрического устройства для теплового воздействия на рефлексогенные зоны // Медицинская техника. 2020. № 1. С. 40-43.
14. Hu B., Shi X.-L., Chen Z.-G., Zou J. Thermoelectrics for medical applications: progress, challenges and perspectives // Chemical engineering journal. - 2022. - Vol. 437. - P.135268.
15. Zafarani S.H., Ghomashchi R., Sams M.W., Chen Z.-G. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical application: design, optimization and advancement. Nano energy. - 2021. - Vol. 90. - P. 106572.
16. Goldsmid H.J. Thermoelectric refrigeration, New York: Springer, 2013. - 240 p.
17. Yevdulov O.V., Ragimova T.A. Investigation of thermoelectric system for local freezing of tissues of the larynx // Journal of Thermoelectricity. - 2015. - № 2. - P. 86-94.
18. Теория тепломассообмена / Под ред. А.И. Леонтьева. - М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. - 464 с.
19. Васильев Е.Н. Расчет и оптимизация теплообменников термоэлектрического блока охлаждения // Теплофизика и аэромеханика. - 2022. - Т. 29, № 3. - С. 419-430
20. <http://www.kryotherm.ru/> (accessed 05/03/2023).

#### References:

1. Zubkova S.M. The role of the thermal component in the therapeutic effect of physical factors. *Physiotherapy, balneology and rehabilitation*. 2011; 6:3-10 (In Russ)
2. Bogolyubov V.M., Sidorov V.D. Physiotherapy in the rehabilitation of patients with rheumatoid arthritis *Physiotherapy, balneology and rehabilitation*. 2012; 2:3-9. (In Russ)

3. Ushakov A.A. Practical physiotherapy. M.: OOO Medical Information Agency, 2009; 612. (In Russ)
4. Ponomarenko G.N. Restorative medicine: fundamental foundations and development prospects. *Physical and Rehabilitation Medicine*. 2022; 4(1): 8-20. (In Russ)
5. Bogolyubov V.M. Technique and methods of physiotherapeutic procedures. M.: Binom, 2017; 464. (In Russ)
6. Baranov A. Yu., Vasilenok A. V., Sokolova E. V., Chubova S. D., Ziyavidinov A. M. The choice of an alternative cryoagent to cover the heat load in the installation for general cryotherapy. *Bulletin of the International Academy of Cold*. 2022; 1:76-82. (In Russ)
7. Ezhov V.V. Physiotherapy and physiopraxology as methods and means of maintaining and restoring health. *Physiotherapy, balneology and rehabilitation*. 2011; 4:33-36. (In Russ)
8. Pasquali P. Cryosurgery: a practical manual. New York: Springer, 2015; 441.
9. Tsyganov D.I. Cryomedicine: processes and devices. M.: SCIENCE PRESS, 2011; 304. (In Russ)
10. Gulyaev A.A. Registration of hardware / physiotherapy procedures in accordance with the requirements of the Ministry of Health of the Russian Federation. *Hardware cosmetology*. 2017; 1:14-20. (In Russ)
11. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Yusufov Sh.A., Aminov G.I. Devices for local temperature effects on the human body. *Izvestiya vuzov. North Caucasian region. Technical Sciences*, 2003; 2:3-6. (In Russ)
12. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Nabiev N.A., Ragimova T.A. Thermoelectric device to stop bleeding. *Medical technology*. 2019; 2:12-14. (In Russ)
13. Ismailov T.A., Evdulov O.V., Nabiev N.A., Magomedova S.G. Model of a thermoelectric device for thermal action on reflexogenic zones. *Meditinskaya tekhnika*. 2020; 1: 40-43. (In Russ).
14. Hu B., Shi X.-L., Chen Z.-G., Zou J. Thermoelectrics for medical applications: progress, challenges and perspectives. *Chemical engineering journal*. 2022; 437:135268.
15. Zaferani S.H., Ghomashchi R., Sams M.W., Chen Z.-G. Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical application: design, optimization and advancement. *Nano energy*. 2021; 90:106572.
16. Goldsmid H.J. Thermoelectric refrigeration, New York: Springer, 2013; 240.
17. Yevdulov O.V., Ragimova T.A. Investigation of thermoelectric system for local freezing of tissues of the larynx. *Journal of Thermoelectricity*. 2015; 2: 86-94.
18. Theory of heat and mass transfer. A.I. Leontiev. M.: MSTU im. N.E. Bauman, 2018; 464. (In Russ)
19. Vasiliev E.N. Calculation and optimization of heat exchangers of a thermoelectric cooling unit. *Thermal Physics and Aeromechanics*. 2022; 29(3): 419-430 (In Russ)
20. <http://www.kryotherm.ru> (accessed 05/03/2023). (In Russ)

#### **Сведения об авторах:**

Бадрудинова Заира Магомед-Загировна, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники; badrudinova.zair@yandex.ru.

Евдулов Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и общей электротехники; ole-ole-ole@rambler.ru

Камилова Зури Анваровна, старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники; zuri2408@mail.ru.

Магомедова Сарат Гусеновна, соискатель кафедры теоретической и общей электротехники; saratmag05@yandex.ru.

Гусейнов Гусейн Магомедзагирович, аспирант кафедры теоретической и общей электротехники; xxxguseynxxx@mail.ru.

#### **Information about authors:**

Zaira M.-Z. Badrudinova, Post-graduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; badrudinova.zair@yandex.ru.

Oleg V. Evdulov, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Theoretical and General Electrical Engineering; ole-ole-ole@rambler.ru

Zuri A. Kamilova, Senior Lecture, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; zuri2408@mail.ru.

Sarat G. Magomedova, Competitor, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; saratmag05@yandex.ru.

Gussein M. Guseynov, Post-graduate Student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering; xxxguseynxxx@mail.ru.

#### **Конфликт интересов/Conflict of interest.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.**

**Поступила в редакцию/Received 18.03.2023.**

**Одобрена после рецензирования/ Reved 09.04.2023.**

**Принята в печать/Accepted for publication 09.04.2023.**