

Для цитирования: Айгумов Т.Г., Алябьев В.А., Евдулов Д.В., Миспахов И.Ш. Модель портативного термоэлектрического генератора электрической энергии для условий Крайнего Севера. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (2): 8-19. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-8-19

For citation: Aigumov T.G., Alyabev V.A., Evdulov O.V., Mispahov I.Sh. Portable thermoelectric generator model electric energy for the Far North. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (2): 8-19. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-2-8-19

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.362

DOI: 10.21822/2073-6185-2019-46-2-8-19

МОДЕЛЬ ПОРТАТИВНОГО ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ УСЛОВИЙ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Айгумов Т.Г.³, Алябьев В.А.⁴, Евдулов Д.В.¹, Миспахов И.Ш.²

¹⁻⁴ Дагестанский государственный технический университет,

¹⁻⁴ 367026, г. Махачкала, пр. Имама Шамиля, 70, Россия,

¹ e-mail: ole-ole-ole@rambler.ru, ² e-mail: igran.mispahov@yandex.ru,

³ e-mail: 79634051239@yandex.ru, ⁴ e-mail: vyacheslav-alyabev@mail.ru

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка модели портативного термоэлектрического генератора (ТЭГ), предназначенного для работы при низких температурах окружающей среды, исследование теплофизических процессов происходящих при его работе. **Метод.** Создана тепловая модель ТЭГ для условий Крайнего Севера, в которой выделены пять основных блоков: источник теплоты (человек), тепловые аккумуляторы, ТЭГ, реализованный посредством некоторого количества последовательно соединенных термоэлектрических батарей (ТЭБ), теплопроводы и радиаторной системы для интенсификации теплообмена холодных спаев ТЭБ с окружающей средой, на границе которых имеют место граничные условия 2 и 3 рода. На основе тепловой модели разработана математическая модель устройства, включающая в себя решение задач расчета теплопровода, плавления и затвердевания рабочего вещества в тепловом аккумуляторе; генератора электрической энергии, построенного на основе термоэлектрического преобразователя. **Результат.** Получены графики зависимости, отражающие основные характеристики разработанной системы, в частности зависимость изменения величины э.д.с. от перепада температур между спаями ТЭГ при различных коэффициентах теплообмена с окружающей средой, к.п.д. ТЭГ от термо-э.д.с. **Вывод.** Значение вырабатываемой э.д.с. напрямую связано с перепадом температур между спаями ТЭГ, причем, чем больше величина последнего, тем выше значение э.д.с. Также очевидна прямая зависимость э.д.с. и значений коэффициентов теплообмена с окружающей средой. Для получения большей величины генерируемой э.д.с. необходимо подбирать тепловой аккумулятор, с как можно большей температурой и теплотой плавления. К.п.д. генератора уменьшается при увеличении генерируемой э.д.с. При условиях проведения численного эксперимента максимальная величина к.п.д. составила чуть менее 8 %. В качестве теплопроводов целесообразно использовать тепловые трубы ввиду минимальных тепловых потерь по их длине, а в качестве тепловых аккумуляторов кристаллический серноокислый натрий, кристаллический углекислый натрий, парафин.

Ключевые слова: Крайний Север, термоэлектрический генератор, модель, тепловая труба, плавящееся вещество, фазовый переход, расчет, теплообмен

PORTABLE THERMOELECTRIC GENERATOR MODEL ELECTRIC ENERGY FOR THE FAR NORTH

Timur G. Aigumov³, Vyacheslav A. Alyabev⁴, Denis V. Evdulov¹, Igramidin Sh. Mispahov²

¹⁻⁴Daghestan State Technical University,

¹⁻⁴70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia,

¹e-mail: ole-ole-ole@rambler.ru, ²e-mail: igran.mispahov@yandex.ru,

³e-mail: 79634051239@yandex.ru, ⁴e-mail: vyacheslav-alyabev@mail.ru

Abstract Objectives The aim of the study is to develop a model of a portable thermoelectric generator (TEG), designed to operate at low ambient temperatures, the study of thermophysical processes occurring during its operation. **Method** A thermal model of TEG for the conditions of the Far North was created, in which five main blocks are distinguished: a heat source (human), heat accumulators, TEG implemented by a certain number of thermoelectric batteries (TEB) connected in series, heat pipes and a radiator system for intensifying heat transfer cold junctions of thermopile elements with the environment, on the border of which there are boundary conditions of the 2nd and 3rd kind. Based on the thermal model, a mathematical model of the device has been developed, which includes solving the problems of calculating the heat conduction, melting and solidification of the working substance in a heat accumulator; an electric energy generator based on a thermoelectric converter. **Result** The dependency graphs are obtained, reflecting the main characteristics of the developed system, in particular, the dependence of the change in the emf on the temperature difference between the TEG junctions at various coefficients of heat exchange with the environment, efficiency TEG from thermo-emf. **Conclusion** As follows from the obtained data, the value of the generated emf directly related to the temperature difference between the TEG junctions, and the higher the value of the latter, the higher the emf value. The direct dependence of the emf is also evident. and values of heat transfer coefficients with the environment. From the graphs presented, we can conclude that to obtain a larger value of the generated emf it is necessary to select a heat accumulator with the highest possible temperature and heat of fusion. C.p.d. generator decreases with increasing generated emf. Under the conditions of a numerical experiment, the maximum value of the efficiency amounted to slightly less than 8%. It is advisable to use heat pipes as heat conduits because of the minimum heat loss along their length, and crystalline sodium sulfate, crystalline sodium carbonate, and paraffin as heat accumulators.

Keywords: Far North, thermoelectric generator, model, heat pipe, melting substance, phase transition, calculation, heat transfer

Введение. В настоящее время разработка портативных генераторов электрической энергии является важной и практически значимой задачей. Особенно остро данный вопрос стоит для областей, удаленных от линий электропередач со специфическим климатом. К подобным областям относятся территории Крайнего Севера - Сибирь, Дальний Восток и т.п. [1-3].

Основные трудности при работе традиционных аккумуляторных батарей в этих условиях создает то обстоятельство, что при низких температурах изменяются свойства составляющих их активных и конструкционных материалов, поэтому возможность эксплуатации подобных источников энергии затрудняется, а иногда исключается вообще. При этом влияние низкой температуры на работу аккумуляторной батареи заключается в следующем [4]: герметизирующая мастика теряет эластичность, растрескивается и отслаивается от поверхности крышек и моноблоков; моноблоки, крышки и пробки становятся хрупкими; при таянии снега на поверхности батареи образуется влага, в результате этого происходит сильный саморазряд батареи; при недостаточной плотности электролита и значительной разряженности батареи возможно его замерзание. Все это определяет необходимость разработки новых портативных источников энергии, приспособленных для работы в условиях Крайнего Севера.

Перспективным при проектировании портативных источников электрической энергии, предназначенных для работы при низких температурах, является применение в качестве исполнительного элемента термоэлектрических преобразователей энергии, обеспечивающих построение экономичных, малогабаритных приборов с широкими функциональными возможностями [5-8].

Электроэнергетические приборы такого типа будут обладать существенными преимуществами: отсутствием движущихся частей в ТЭГ; сочетанием в едином устройстве таких традиционно отдельных элементов, как источник холода (теплоты) и теплообменный аппарат; универсальностью; возможностью работы при любой ориентации и при отсутствии сил гравитации вне зависимости от температуры окружающей среды; простотой устройства, компактностью, взаимозаменяемостью; высокой надежностью, практически неограниченным сроком службы; бесшумностью, экологичностью [9-12].

Предлагается такое конструктивное исполнение портативного ТЭГ, предназначенного для работы в условиях Крайнего Севера, при котором разность температур между спаями ТЭБ будет создаваться за счет низкой температуры окружающей среды и температуры человеческого тела.

Постановка задачи. Целью настоящей статьи является разработка модели портативного ТЭГ, предназначенного для работы при низких температурах окружающей среды, исследование теплофизических процессов происходящих при его работе.

Методы исследования. Предложенная конструктивная схема исполнения ТЭГ подразумевает три возможных варианта реализации.

1. Передача тепловой энергии от человека непосредственно на горячие спаи ТЭБ, при этом нахождение ее холодных спаев в непосредственном контакте с холодным окружающим воздухом через радиаторную систему. В данном случае генератор может работать только при нахождении на теле человека, при его съеме работа прибора будет прекращена.
2. Размещение между телом человека и горячими спаями ТЭБ и окружающей средой и холодными спаями ТЭБ тепловых аккумуляторов. В данном случае может быть обеспечена работа ТЭГ при съеме его с тела человека некоторое время, определяемое теплоаккумулирующими возможностями тепловых аккумуляторов.
3. Использование специальных теплопроводов, выполненных либо цельнометаллическими, либо в виде тепловых труб для передачи теплоты к спаям ТЭБ. Преимущество данного способа реализации ТЭГ состоит в возможности размещения прибора на некотором отдалении от тела человека и окружающей среды.

Из всех трех рассмотренных схем наиболее эффективной и рациональной является третья, совмещающая в себе возможности аккумуляции теплоты и разнесения источника тепла и холода на некоторое расстояние от ТЭБ, что дает возможность для вариаций в расположении ТЭГ. Ввиду данного обстоятельства проведем моделирование ТЭГ именно для этого случая.

В соответствии с выбранной схемой ТЭГ его тепловая модель имеет вид, изображенный на рис.1.

В модель входят пять основных блоков: источник теплоты (человек), тепловые аккумуляторы, ТЭГ, реализованный посредством некоторого количества последовательно соединенных ТЭБ, теплопроводы и радиаторной системы для интенсификации теплообмена холодных спаев ТЭБ с окружающей средой.

На границе перечисленных блоков имеют место тепловые потоки, определяющие количество теплоты, передаваемое от источников теплоты к тепловым аккумуляторам, от аккумуляторов к теплопроводам, от теплопроводов к спаям ТЭГ, от холодных спаев ТЭГ к радиаторной системе.

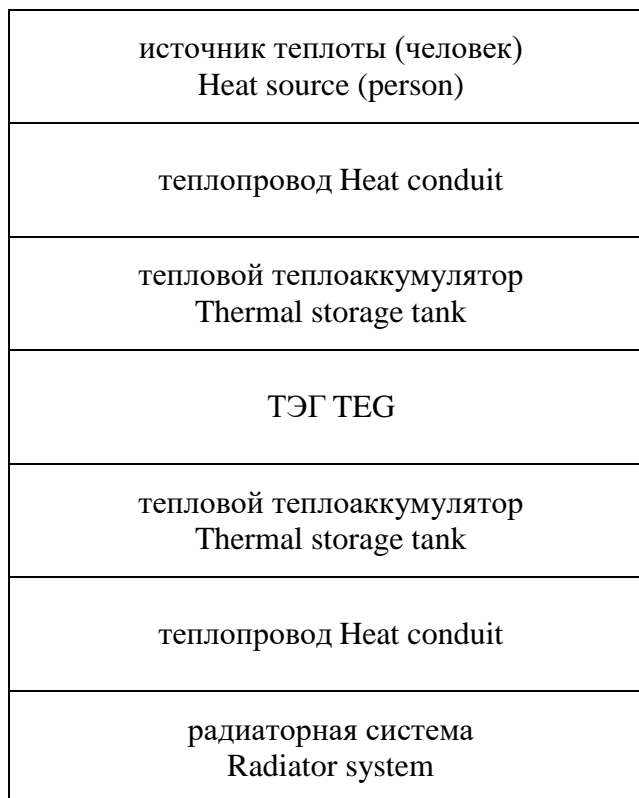


Рис.1. Тепловая модель термоэлектрического генератора для условий Крайнего Севера
Fig. 1. Thermal model of thermoelectric generator for the Far North

Математическая модель может быть разбита на три основные части, включающие в себя расчет процесса аккумулирования теплоты, передачи теплоты по теплопроводам, непосредственно расчет ТЭБ.

Расчет теплообмена в теплопроводе. В качестве теплопровода целесообразным является применение тепловой трубы, обеспечивающей минимальные потери при передаче теплоты на требуемое расстояние.

При использовании тепловых труб коэффициент теплообмена в испарительной и конденсационной зонах может достигать величины 10^5 Вт/м²·К [13].

Математическая постановка задачи расчета различных зон тепловой трубы при условии соприкосновения зоны испарения с источником тепла и зоны конденсации с источником холода соответствует [14].

Решается осесимметричная задача теплопередачи отдельно для зоны испарения, транспортной зоны и зоны конденсации методом конечных элементов.

Искомой величиной в модели является количество теплоты, переносимое через сечение канала тепловой трубы за единицу времени и связанное с ним значение температуры в каждой точке канала.

Расчет тепловых аккумуляторов. В качестве тепловых аккумуляторов эффективно использование плавящихся рабочих веществ, температура плавления которых лежит в пределах 35-40° С, в частности кристаллический серноокислый натрий (температура плавления 32,6° С), кристаллический углекислый натрий (температура плавления 34° С), парафин (температура плавления 40° С).

Накопление и отдача теплоты в данном случае будет происходить за счет фазового перехода твердое вещество - жидкость и жидкость - твердое вещество.

Соотношения для расчета процесса теплообмена при плавлении вещества имеют вид [15, 16]:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_p \rho_p \xi_p \frac{dT_{об}}{d\tau} = q'_{TЭБг} + K_{cp} (T_{cp} - T_{об}) + \alpha_p (T_1 - T_{об}) \\ c_1 \rho_1 \xi \frac{dT_1}{d\tau} = \alpha_p (T_1 - T_{об}) + \alpha_{кр} (T_{кр} - T_1) \\ \frac{d\xi}{d\tau} \left[c_2 \rho_2 \left(\frac{-2 \cdot n (T_{кр} \cdot R - T_{2R0} \cdot R) + \xi (T_{2R0} - T_{кр})}{(n+1)(\xi_0 - R)} \right) + r \rho_2 \right] = \alpha_{кр} (T_1 - T_{кр}) \end{array} \right. , \quad (1)$$

а для процесса затвердевания:

$$(c\rho\delta)_{об} \frac{dT_{об}}{d\tau} = \alpha_{cp} (T_{cp} - T_{об}) + \alpha_{кр} (T_1 - T_{об}), \quad (2)$$

$$c_1 \rho_1 \xi \frac{dT_1}{d\tau} = \alpha_{об} (T_1 - T_{об}) + \alpha_{кр} (T_{кр} - T_1), \quad (3)$$

$$\frac{d\xi}{d\tau} \left[c_2 \rho_2 \left(\frac{-2 \cdot n (T_{кр} \cdot H - T_{2H0} \cdot H) + \xi (T_{2H0} - T_{кр})}{(n+1)(\xi_0 - H)} \right) + v \rho_1 \right] = \alpha_{кр} (T_1 - T_{кр}) - q_{TЭБх},$$

где $\alpha_{об}, \alpha_{кр}$ - соответственно коэффициенты теплоотдачи от оболочки к жидкости и от поверхности раздела фаз к жидкости; T_1 - средняя температура жидкой фазы; τ_0, ξ_0 - время и толщина расплава, при которых начинается интенсивное движение конвективных токов и поле температур по жидкой фазе практически исчезает; $(c, \rho, \delta)_{об}$ - соответственно теплоемкость, плотность и толщина металлической оболочки устройства; τ - время; k_{cp} - коэффициент теплоотдачи в окружающую среду $T_{об}$ - среднемассовая температура металлической оболочки устройства; T_{cp} - температура окружающей среды; c_i, ρ_i, λ_i - теплоемкость, плотность и теплопроводность жидкой и твердой фазы рабочего вещества, где индекс 1 соответствует жидкой фазе, а индекс 2 - твердой фазе рабочего вещества, r - теплота плавления рабочего вещества; R - толщина слоя рабочего вещества; ξ - граница раздела фаз; T_{2R}, T_{2R0} - соответственно температуры при $x=R$ в любой момент времени τ и при $\tau = \tau_0$ ($T_{2R0} = T_{TЭБх}$), ξ_0 - толщина расплава при $\tau = \tau_0$; τ_0 - время, при котором начинает наблюдаться линейное изменение температуры T_{2R} от времени; n - параметр, определяемый экспериментально.

Выражения (1)-(3) получены при решении задачи «Стефана» с использованием приближенного метода, изложенного в [17]. Согласно этому методу профиль температуры в твердой фазе предполагается известным, удовлетворяющим начальным и граничным условиям задачи. Известное выражение для распределения температуры в твердой фазе вещества подставляется в исходные выражения, описывающие теплообмен при фазовом переходе, которые затем решаются относительно температуры и координаты раздела фаз.

Расчет ТЭГ. Схематически единичный термоэлемент, работающий в режиме генерирования электрической энергии, изображен на рис.2 [18-19].

Если к горячему спаю термоэлемента подвести некоторый поток теплоты q_r при температуре T_r , а от холодного спаю отвести некоторый поток тепла q_x при температуре T_x , то под действием перепада температур на его спаюх ΔT , согласно эффекту Зеебека, возникнет термо-э.д.с. $E_{тэ}$.

При условии независимости термоэлектрических свойств от температуры

$$E_{тэ} = (\alpha_p + \alpha_n) \Delta T,$$

где α_p и α_n - абсолютные величины коэффициентов термо-э.д.с. ветвей p- и n-типов соответственно.

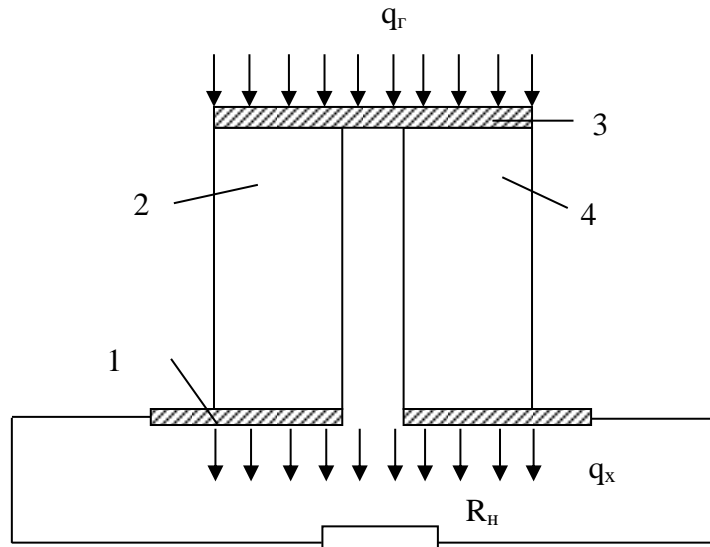


Рис.2. Схематический разрез термоэлемента, работающего в режиме термоэлектрического генератора

1 и 3 - коммутационные пластины, 2 и 4 - ветви термоэлемента

Fig. 2. Schematic section of a thermoelectric element operating in the thermoelectric generator mode
 1 and 3 - patch plates, 2 and 4 - thermocouple branches

Под действием термо-э.д.с. E по замкнутой цепи термоэлемента, включающей полезную нагрузку R_n , потечет электрический ток I . Внутреннее сопротивление термоэлемента $R_{ТЭ}$ состоит из сопротивлений ветвей соответственно R_p и R_n , и сопротивления коммутационного компонента R_k :

$$R_{ТЭ} = R_p + R_n + R_k. \quad (4)$$

Представим сопротивление коммутационного компонента в виде относительной величины

$$k = \frac{R_k}{R_p + R_n}, \quad (5)$$

а величины сопротивлений ветвей представим через их геометрические размеры и удельные сопротивления термоэлектрических материалов. Тогда ,

$$R_{ТЭ} = \left(\rho_p \frac{\ell}{S_p} + \rho_n \frac{\ell}{S_n} \right) (1 + k), \quad (6)$$

где S_p и S_n - площади поперечных сечений ветвей соответственно р- и п-типов, ρ_p и ρ_n - удельные сопротивления ветвей термоэлемента соответственно р- и п-типов; ℓ - длина ветвей;

Полное сопротивление термоэлектрической цепи равно $R_{ТЭ} + R_n$. Представим также полезную нагрузку в виде относительной величины $K = R_n / R_{ТЭ}$, которая называется относительной полезной нагрузкой. Тогда общее сопротивление цепи будет равно $R_{ТЭ} (1 + K)$. Таким образом, согласно закону Ома, ток в цепи ТЭГ будет определяться выражением:

$$I = \frac{E_{ТЭ}}{(1 + K)R_{ТЭ}}, \quad (7)$$

а напряжение на нагрузке

$$U = \frac{K}{1 + K} E_{ТЭ}. \quad (8)$$

Полезная электрическая мощность, вырабатываемая ТЭГ, будет определяться по формуле

$$W_{T_3} = UI = \frac{K}{(1+K)^2} \frac{E_{T_3}^2}{R_{T_3}} = \frac{K}{(1+K)^2} \frac{(\alpha_p + \alpha_n)^2 \Delta T^2}{\left(\rho_p \frac{\ell}{S_p} + \rho_n \frac{\ell}{S_n}\right)(1+K)} \quad (9)$$

Отношение $\frac{E_{T_3}^2}{R_{T_3}}$ является максимальной электрической мощностью, вырабатываемой в цепи термоэлемента, когда сопротивление этой цепи минимально, т. е. при $R_n = 0$. Указанный случай соответствует режиму короткого замыкания.

Обсуждение результатов. По разработанной модели, описываемой уравнениями (1)-(9) произведен численный эксперимент. Его результаты представлены на рис.3-8. основные параметры и характеристики материалов взяты из [20]. На рис.3 рассмотрено изменение теплового потока вдоль продольной оси тепловой трубы. В качестве теплоносителя предполагалось использование хладагента R 124 b ($C_2H_3ClF_2$). Как следует из полученных результатов, поле распределения теплового потока в тепловой трубе практически равномерное. При этом максимальное отличие в величине теплового потока между его концами равно 900 Вт/м^2 . Для сравнения это значение в случае использования медного теплопровода составляет 5800 кВт/м^2 . Данное обстоятельство определяет целесообразность применения в качестве теплопровода именно тепловую трубу, характеризующуюся минимальными потерями переносимого теплового потока по длине.

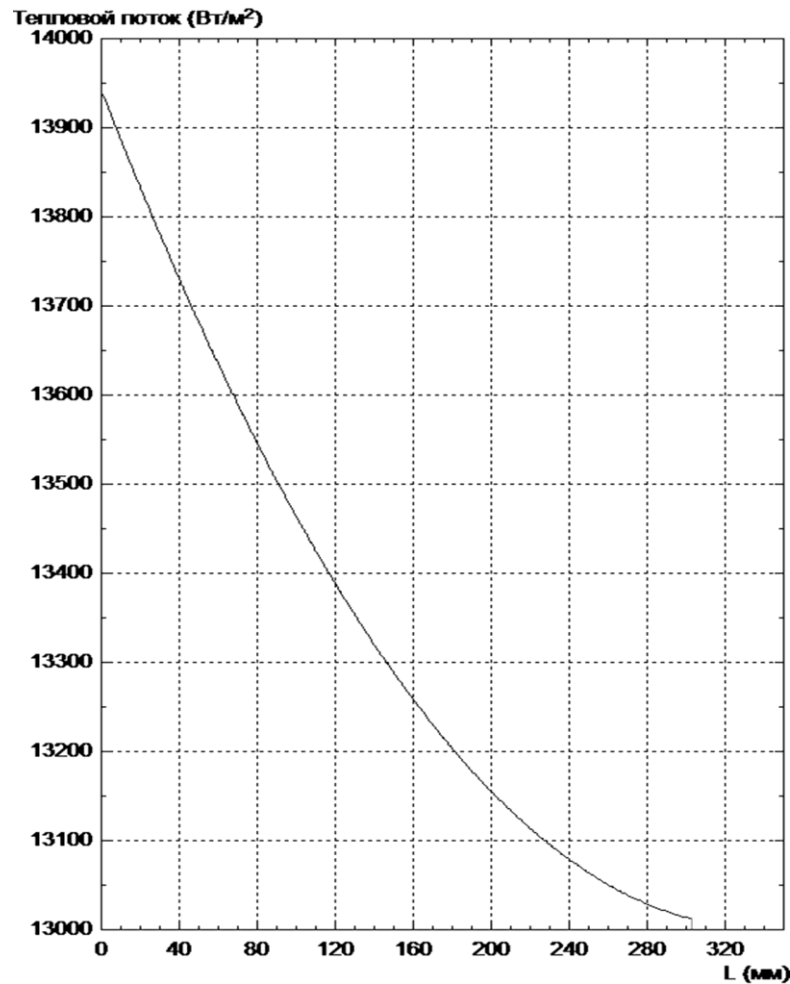


Рис.3. Изменение теплового потока вдоль продольной оси тепловой трубы
 Fig. 3. Change in heat flux along the longitudinal axis of the heat pipe

Результаты расчетов тепловых аккумуляторов представлены на рис.4-6. Рассмотрены зависимости изменения координаты границы раздела фаз от времени при различных мощностях рассеяния источника теплоты при плавлении вещества (рис.4), продолжительность полного плавления рабочего вещества от мощности тепловыделений внешнего источника (рис.5), продолжительность полного затвердевания рабочего вещества (рис.6).

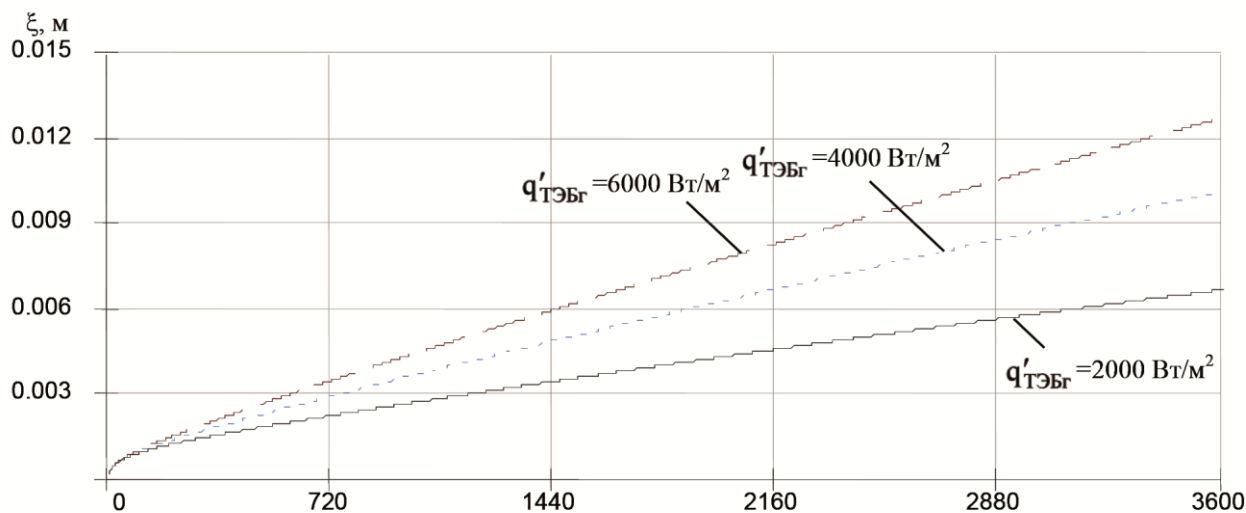


Рис.4. Зависимость изменения координаты границы раздела фаз во времени при различных значениях мощности рассеяния источника теплоты
 Fig. 4. The dependence of the change in the coordinate of the phase boundary in time at different values of the dissipation power of the heat source

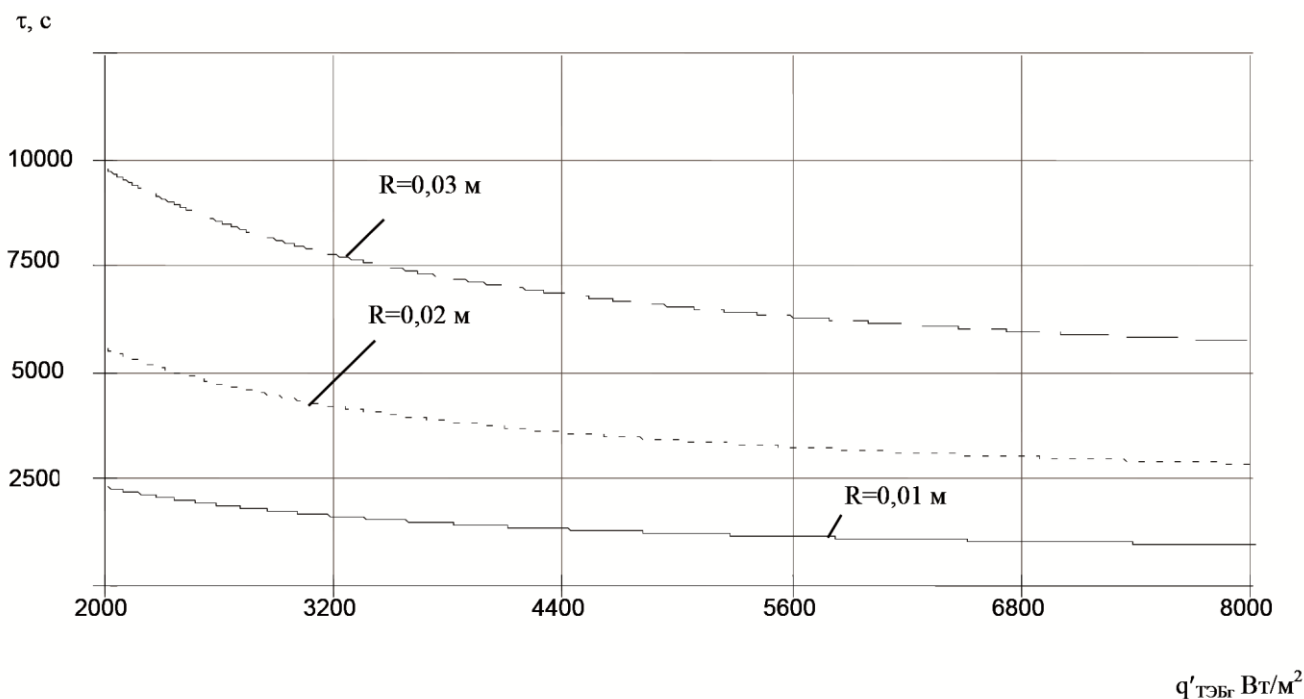


Рис.5. Зависимость изменения времени полного проплавления рабочего вещества от мощности рассеяния источника теплоты при различных значениях R
 Fig. 5. The dependence of the change in the time of full penetration of the working substance on the power dissipation of the heat source at various values of R

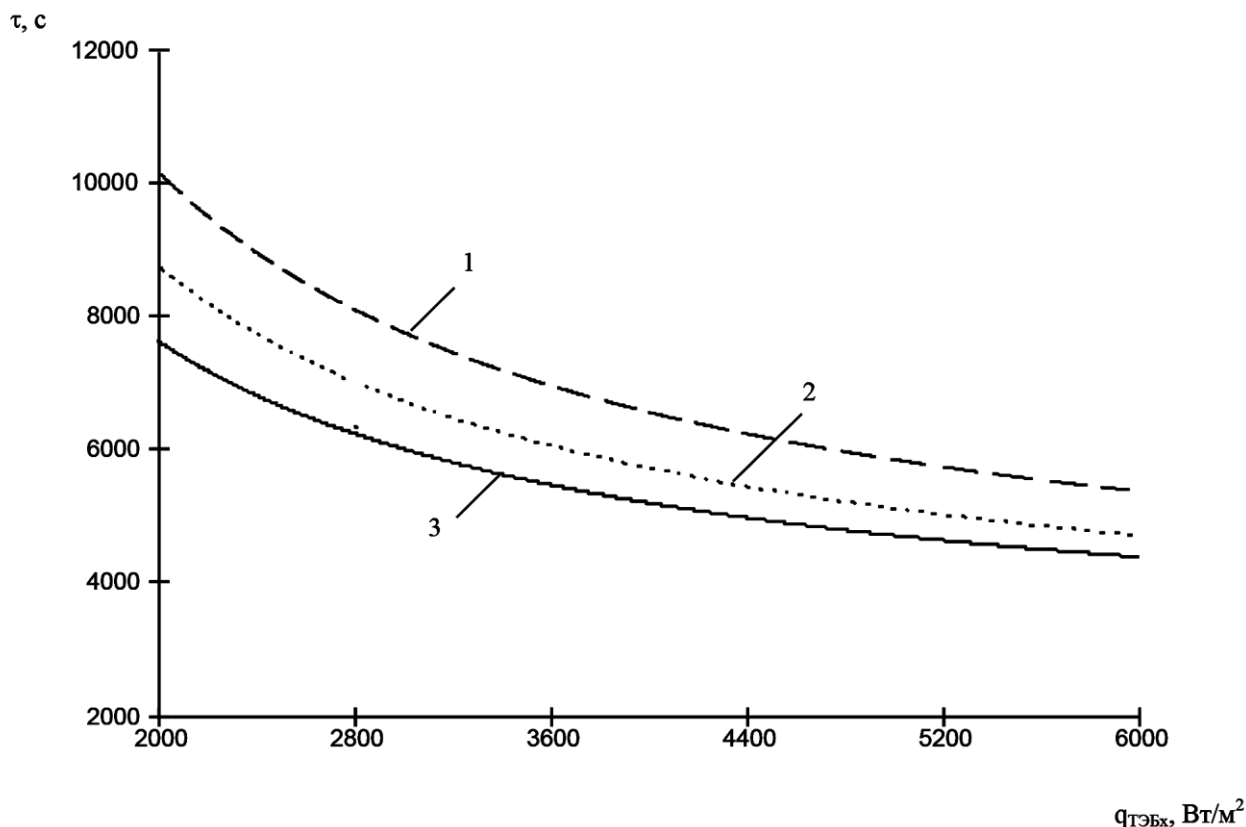


Рис.6. Зависимость времени полного затвердевания рабочего вещества от отводимой мощности, $(\text{ср}\delta)_{00}=2,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$,
 $R=0,025 \text{ м}$

1 – парафин, 2 – кристаллический углекислый натрий, 3 – кристаллический сернокислый натрий

Fig. 6. Dependence of the time of complete solidification of the working substance on the output power, $(\text{ср}\delta)_{00}=2,5 \cdot 10^3, \text{ J} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $R = 0.025 \text{ m}$ 1 - paraffin, 2 - crystalline sodium carbonate, 3 - crystalline sodium sulfate

Расчетные зависимости определяют, что длительность полного проплавления рабочего вещества, соответствующая длительности стабильной работы ТЭГ, лежит в необходимых пределах при использовании незначительного количества рабочего агента (согласно расчетным графикам его значение лежит в пределах 6000-24000 с при толщине рабочего вещества 0,01-0,03 м). При этом с увеличением теплопритоков увеличивается скорость перемещения границы раздела фаз и соответственно длительность полного проплавления вещества. Как следует из приведенных графиков, длительность полного проплавления вещества толщиной 3 см варьируется от 24000 до 13500 с при изменении $q_{TЭГ}$ от 2000 до 8000 Вт/м².

Согласно расчетным данным длительность поддержания стабильной температуры спаев в зависимости от темпов остывания тепловых аккумуляторов может варьироваться от 3600 до 10000 с, что определяет необходимость тепловой изоляции элементов ТЭГ от окружающей среды. Данные, полученные при расчете характеристик ТЭГ, приведены на рис.7-8. Рабочим веществом теплового аккумулятора является парафин с температурой плавления 40° С.

На рис.7 представлена зависимость изменения температуры генерируемой э.д.с. от перепада температур между спаями ТЭГ при различных коэффициентах теплообмена с окружающей средой. Как следует из представленных данных значение вырабатываемой э.д.с. напрямую связано с перепадом температур между спаями ТЭГ, причем, чем большее величина последнего, тем выше значение э.д.с. Также очевидна прямая зависимость э.д.с. и значений коэффициентов теплообмена с окружающей средой. Из представленных графиков можно сделать важный вывод, что для получения большей величины генерируемой э.д.с. необходимо подбирать тепловой аккумулятор с как можно большей температурой и теплотой плавления.

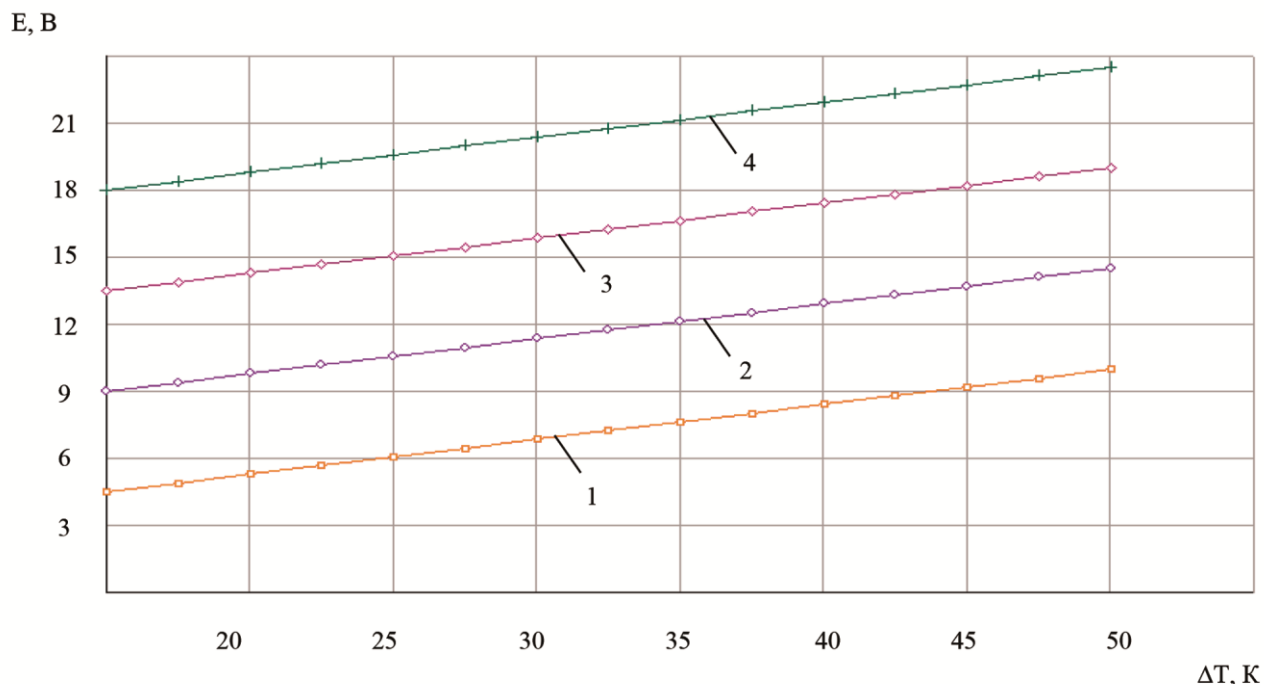


Рис.7. Зависимость изменения величины э.д.с. от перепада температур между спаями ТЭГ при различных коэффициентах теплообмена с окружающей средой 1 - $\alpha_{ср}=1,5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, 2 - $\alpha_{ср}=2,5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, 3 - $\alpha_{ср}=3,5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, 4 - $\alpha_{ср}=4,5 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$
 Fig. 7. Dependence of the change in the magnitude of the emf from the temperature difference between the TEG junctions at different coefficients of heat exchange with the environment 1 - $\alpha_{ср} = 1.5 \text{ W / m}^2\text{K}$, 2 - $\alpha_{ср} = 2.5 \text{ W / m}^2\text{K}$, 3 - $\alpha_{ср} = 3.5 \text{ W / m}^2\text{K}$, 4 - $\alpha_{ср} = 4.5 \text{ W / m}^2\text{K}$

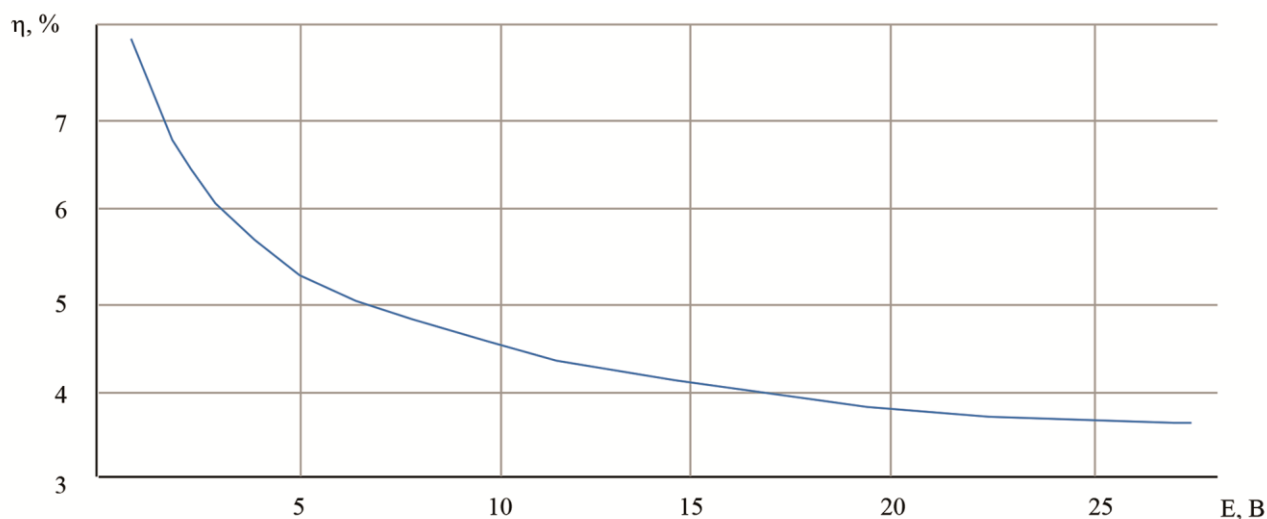


Рис.8. Зависимость изменения к.п.д. термоэлектрического генератора от термо-э.д.с.
 Fig. 8. The dependence of the change in efficiency thermoelectric generator from thermo-emf.

На рис.8 представлена зависимость изменения к.п.д. ТЭГ от термо-э.д.с. Как следует из представленных данных к.п.д. генератора уменьшается при увеличении генерируемой э.д.с. При условиях проведения численного эксперимента максимальная величина к.п.д. составила чуть менее 8 %.

Вывод. Предложена конструкция системы электропитания в условиях Крайнего Севера, выполненная на базе термоэлектрических преобразователей энергии, разность температур между спаями которых будет создаваться за счет низкой температуры окружающей среды и температуры человеческого тела, проведено моделирование электро- и теплофизических процессов в ней. Создана тепловая модель ТЭГ для условий Крайнего Севера. На основе тепловой

модели разработана математическая модель устройства, включающая в себя решение задач расчета теплопровода, плавления и затвердевания рабочего вещества в тепловом аккумуляторе; генератора электрической энергии, построенного на основе термоэлектрического преобразователя. Получены графики зависимости, отражающие основные характеристики разработанной системы. Совокупность результатов проведенных исследований дает возможность использовать их в качестве научной основы при создании новых систем портативного электропитания.

Библиографический список:

1. Дроздов В.В. Общая экология. СПб.: РГГМУ, 2011. 412 с.
2. Воронов В.К., Гречнева М.В., Сагдеев Р.З. Основы современного естествознания. М.: Высшая школа, 1999. - 247 с.
3. Еремин Ю.Н. Мое Заполярье. - Мурманск: МОИПКРО, 2004. 78 с.
4. <http://www.eemb.com>.
5. Ssenoga Twaha, Jie Zhu, Yuying An, Bo Li A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modeling and performance improvement // Renewable and sustainable energy reviews. - 2016. - №65.
6. Rowe D.M. Thermoelectrics and its energy harvesting, materials, preparation and characterization. BocaRaton: CRC Press. 2012.
7. Такенобу Кадзикава, Риодзи Фунахами Новейшие разработки в области технологии термоэлектрического генерирования электроэнергии в Японии // Термоэлектричество. 2016. № 1. С. 4-11.
8. Анатычук Л.И. Современное состояние и некоторые перспективы термоэлектричества // Термоэлектричество. 2007. №2. С. 21-29.
9. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Т.2. Термоэлектрические преобразователи энергии. Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества. 2003. 376 с.
10. Заяков В.П., Киншова Л.А., Моисеев В.Ф. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Одесса: Политехпериодика, 2009. 175 с.
11. Булат Л.П. Прикладные исследования и разработки в области термоэлектрического охлаждения в России // Холодильная техника. 2009. № 7. С. 14-19.
12. Шучитангшу Чаттерджи Термоэлектричество по индийскому сценарию // Термоэлектричество. 2016. №6. С. 7-15.
13. Дульнев Г.Н. Теория тепло- и массообмена. СПб.: СПбНИУИТМО, 2012. 194 с.
14. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В. Математическая модель холодильной установки на базе слоистых термоэлектрических батарей с тепловыми термосифонами // Ползуновский вестник. 2010. №2. С. 15-20.
15. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В. Моделирование процессов теплообмена в термоэлектрическом устройстве для охлаждения электронной аппаратуры // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2002. №7. С. 59-62.
16. Исмаилов Т.А., Евдулов Д.В., Евдулов О.В. Системы отвода теплоты от элементов РЭА на базе плавящихся тепловых аккумуляторов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2015. №1 (36). С. 38-44.
17. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа. 1967. 600 с.
18. Анатычук Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства. Справочник. - Киев: Наукова Думка, 1979. 385 с.
19. Поздняков Б.С., Коктейлев Е.А. Термоэлектрическая энергетика. М.: Атомиздат, 1974. 264 с.
20. Григорьев И.С., Мейлихов Е.З. Физические величины. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 156 с.

References:

1. Drozdov V.V. Obschchaya ekologiya. SPb.: RGGMU, 2011. 412 s. [Drozdov V.V. General ecology. St. Petersburg: RGGMU, 2011.412 p. (In Russ.)]
2. Voronov V.K., Grechneva M.V., Sagdeyev R.Z. Osnovy sovremennogo yestestvoznaniya. M.: Vysshaya shkola, 1999. - 247 s. [Voronov V.K., Grechneva M.V., Sagdeev R.Z. Fundamentals of modern science. M.: Higher school, 1999. 247 p.]
3. Yeremin YU.N. Moye Zapolyar'ye. - Murmansk: MOIPKRO, 2004. 78 s. [Eremin Yu.N. My Arctic. - Murmansk: MOIPKRO, 2004. 78 p. (In Russ.)]
4. <http://www.eemb.com>.
5. Ssenoga Twaha, Jie Zhu, Yuying An, Bo Li A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modeling and performance improvement // Renewable and sustainable energy reviews. 2016. No. 65.
6. Rowe D.M. Thermoelectrics and its energy harvesting, materials, preparation and characterization. BocaRaton: CRC Press. 2012.
7. Takenobu Kajikawa, Ryoji Funahami The latest developments in the field of technology of thermoelectric power generation in Japan // Thermoelectricity. 2016. No. 1. pp. 4-11.

8. Anatyshuk L.I. Current state and some prospects of thermoelectricity // Thermoelectricity. 2007. No2. S. 21-29.
9. Anatyshuk L.I. Thermoelectricity. T.2. Thermoelectric energy converters. Kiev, Chernivtsi: Institute of Thermoelectricity. 2003.376 p.
10. Zayakov V.P., Kinshova L.A., Moiseev V.F. Prediction of reliability indicators of thermoelectric cooling devices. Odessa: Polytechnic Periodics, 2009.175 p.
11. Bulat L.P. Prikladnyye issledovaniya i razrabotki v oblasti termoelektricheskogo okhlazhdeniya v Rossii // Kholodil'naya tekhnika. 2009. № 7. S. 14-19. [Bulat L.P. Applied research and development in the field of thermoelectric cooling in Russia // Refrigeration equipment. 2009. No. 7. pp. 14-19. (In Russ.)]
12. Shuchitangshu Chatterjee Thermoelectricity according to the Indian scenario // Thermoelectricity. 2016. No.6. pp. 7-15.
13. Dul'nev G.N. Teoriya teplo- i massoobmena. SPb.: SPbNIUITMO, 2012. 194 c. [Dulnev G.N. Theory of heat and mass transfer. SPb.: SPbNIUITMO, 2012.194 p (In Russ.)]
14. Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Yevdulov D.V. Matematicheskaya model' kholodil'noy ustanovki na baze sloistykh termoelektricheskikh batarey s teplovymi termosifonami // Polzunovskiy vestnik. 2010. №2. S. [Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Yevdulov D.V. A mathematical model of a refrigeration unit based on layered thermoelectric batteries with thermal thermosiphons // Polzunovsky Bulletin. 2010. No 2. pp. 15-20. (In Russ.)]
15. Ismailov T.A., Yevdulov O.V. Modelirovaniye protsessov teploobmena v termoelektricheskom ustroystve dlya okhlazhdeniya elektronnoy apparatury // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroyeniye. 2002. №7. S. 59-62. [Ismailov T.A., Yevdulov O.V. Modeling of heat transfer processes in a thermoelectric device for cooling electronic equipment // News of higher educational institutions. Instrument making. 2002. No. 7. pp. 59-62. (In Russ.)]
16. Ismailov T.A., Yevdulov D.V., Yevdulov O.V. Sistemy otvoda teploty ot elementov REA na baze plavyashchikhsya teplovykh akkumulyatorov // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiiye nauki. 2015. №1 (36). S. 38-44. [Ismailov T.A., Yevdulov D.V., Yevdulov O.V. Systems of heat removal from REA elements based on melting heat accumulators // Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2015. No1 (36). pp. 38-44. (In Russ.)]
17. Lykov A.V. Teoriya teploprovodnosti. M.: Vysshaya shkola. 1967. 600 s. [Lykov A.V. Theory of thermal conductivity. M.: Higher school. 1967.600 p. (In Russ.)]
18. Anatyshuk L.I. Thermocouples and thermoelectric devices. Directory. Kiev: Naukova Dumka, 1979. 385 p.
19. Pozdnyakov B.S., Kokteylev Ye.A. Termoelektricheskaya energetika. M.: Atomizdat, 1974. 264 s. [Pozdnyakov B.S., Kokteylev Ye.A. Thermoelectric power. M.: Atomizdat, 1974.264 p. (In Russ.)]
20. Grigor'yev I.S., Meylikhov Ye.Z. Fizicheskiye velichiny. Spravochnik. M.: Energoatomizdat, 1991. 156 s. [Grigoriev I.S., Meilikhov E.Z. Physical quantities. Directory. M.: Energoatomizdat, 1991.156 p. (In Russ.)]

Сведения об авторах:

Айгумов Тимур Гаджиевич – кандидат экономических наук, заведующий кафедрой программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем.

Алябьев Вячеслав Алексеевич – магистрант, кафедра теоретической и общей электротехники.

Евдулов Денис Викторович – кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра теоретической и общей электротехники.

Миспахов Играмидин Шарафидинович – кандидат технических наук, старший преподаватель, кафедра теоретической и общей электротехники.

Information about the authors:

Timur G. Aigumov– Cand.Sci. (Economics), Head of the Department of Computer Software and Automated Systems.

Vyacheslav A. Alyabev– Master student, Department of Theoretical and General Electrical Engineering.

Denis V. Evdulov – Cand.Sci. (Technical), Senior Lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering.

Igramidin Sh. Mispakhov - Cand.Sci. (Technical), Senior Lecturer, Department of Theoretical and General Electrical Engineering.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 11.04.2019.

Принята в печать 26.05.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 11.04.2019.

Accepted for publication 26.05.2019.