

Для цитирования: Евдулов Д.В., Евдулов О.В., Набиев Н.А. МОДЕЛЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ, ВЫДЕЛЯЕМОЙ РЭА. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016;42 (3):53-63. DOI:10.21822/2073-6185-2016-42-3-53-63

For citation: Yevdulov D.V., Yevdulov O.V., Nabiyeв N.A THERMOELECTRIC SYSTEM MODEL FOR HEAT UTILIZATION GENERATED BY ELECTRONICS. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2016;42 (3): 53-63. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2016-42-3-53-63

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**  
**ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ**  
**TECHICAL SCIENCE**  
**POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING**

**УДК 621.362: 537.322**

**DOI: 10.21822/2073-6185-2016-42-3-53-63**

**Евдулов Д.В.<sup>1</sup>, Евдулов О.В.<sup>2</sup>, Набиев Н.А.<sup>3</sup>**

<sup>1-3</sup>Дагестанский государственный технический университет,  
367015 г. Махачкала, пр. И. Шамиля, 70,  
<sup>1,2</sup>e-mail:ole-ole-ole@rambler.ru  
<sup>3</sup>e-mail:alternativa9372@mail.ru

**МОДЕЛЬ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ  
ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ, ВЫДЕЛЯЕМОЙ РЭА**

**Аннотация. Цель.** В статье предложена термоэлектрическая система для утилизации теплоты, выделяемой радиоэлектронной аппаратурой, включающая в себя тепловой аккумулятор с плавящимися рабочими веществами и термоэлектрический генератор энергии. Рассмотрена ее тепловая и математическая модель. **Методы.** Модель построена путем решения задачи расчета процессов плавления и затвердевания рабочего вещества в теплоаккумуляторе, определения характеристик термоэлектрического генератора, преобразующего теплоту от радиоэлектронной аппаратуры в электрическую энергию. **Результаты.** Приведены результаты численного эксперимента по разработанной модели, представляющие собой графики, оценивающие продолжительность полного проплавления и затвердевания рабочего агента в зависимости от мощности радиоэлектронной аппаратуры, а также от интенсивности теплообмена с окружающей средой; зависимости генерируемой электродвижущей силы от перепада температур между спаями термоэлектрического генератора энергии, а также его коэффициента полезного действия. Установлено, что значение вырабатываемой электродвижущей силы термоэлектрического генератора в основном зависит от теплофизических характеристик вещества, используемого в качестве теплового аккумулятора, характеристик воздушного радиатора, обеспечивающего отвод теплоты от холодных спаев термоэлементов, а также температуры окружающей среды. **Вывод.** Доказано, что значение мощности рассеяния радиоэлектронной аппаратуры влияет на генерируемую электродвижущую силу лишь опосредственно путем влияния на процесс плавления вещества в теплоаккумуляторе.

**Ключевые слова:** теплота, РЭА, утилизация, тепловой аккумулятор, плавящееся рабочее вещество, термоэлектрический генератор, тепловая и математическая модель

**Denis V.<sup>1</sup> Yevdulov, Oleg V.<sup>2</sup> Yevdulov, Nabi A.<sup>3</sup> Nabiyeв**

<sup>1-3</sup>Daghestan State Technical University,  
70 I. Shamil Ave, Makhachkala, 367015,  
<sup>1,2</sup>e-mail:ole-ole-ole@rambler.ru,  
<sup>3</sup>e-mail:alternativa9372@mail.ru

## THERMOELECTRIC SYSTEM MODEL FOR HEAT UTILIZATION GENERATED BY ELECTRONICS

**Abstract. Aim.** Proposed is the thermoelectric system for utilizing the heat emitted by electronic equipment, including thermal battery with consumable working substance and thermoelectric power generator. It is considered the thermal and mathematical model. **Methods.** The model is built by solving the problem of calculation of melting processes and solidification of the working substance in the heat accumulator, characterization of a thermoelectric generator to convert the heat from electronics into electrical energy. **Results.** Given are the results of numerical experiment on the developed models, presented as graphs that evaluate the duration of complete melting and solidification of the working agent depending on the power electronics, as well as the intensity of heat exchange with the environment. **Conclusion.** Based on the efficiency generated by the temperature difference between the junctions of the thermoelectric power generator and its efficiency.

**Key words:** heat, electronics, recycling, thermal battery, melting working substance, thermoelectric generator, heat and a mathematical model

**Введение.** Экономия энергетических ресурсов - одна из главных задач в современной энергетике мира, и в России в частности. Значимость ее определяется, во-первых, все возрастающим потреблением топлива и энергии экономиками стран, во-вторых, невозобновляемостью запасов углеводородного сырья.

23 ноября 2009 г. вышел Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [1]. Федеральным законом определен комплекс правовых, организационных и экономических мер, направленных на стимулирование энергосбережения и повышение энергетической эффективности. В законе отмечено, что создание нового эффективного энергооборудования, рациональное и полное использование энергетических ресурсов во всех отраслях экономики, должны рассматриваться как приоритетные задачи. Одновременно все больше возрастает роль утилизации энергии от разного рода производств, эксплуатации различного оборудования. В этой связи важен тот факт, что в РЭА только часть поступившей электрической энергии преобразуется в полезный сигнал. При этом более 70% процентов энергии в блоках РЭА безвозвратно теряются в виде выделяющегося тепла [2,3,4]. Это приводит к тому, что внутри РЭА значительная часть подводимой энергии превращается в тепло, которое рассеивается в окружающую среду без каких-либо полезных действий. В данных условиях представляет интерес разработка конструкции специальной системы, которая давала бы возможность утилизации этой энергии, в частности, преобразовывала бы ее в электрическую для дальнейшего применения.

**Постановка задачи.** Целью работы является разработка и всестороннее исследование термоэлектрической системы для утилизации теплоты, выделяемой компонентами РЭА, моделирование электро- и теплофизических процессов в ней.

РЭА в процессе своего функционирования выделяет значительное количество теплоты, которое, во-первых, оказывает негативное влияние на температурный режим работы приборов и их надежность, что требует применение специальных теплоотводящих систем, во-вторых, рассеивается безвозвратно в окружающей среде и практически не используется. В этой связи представляется перспективной разработка специальных систем, которые имели бы возможность совмещения функций системы охлаждения РЭА и частичной утилизации выделяемой ею теплоты с последующим преобразованием в электрическую энергию. Если в случае аккумуляции теплоты, выделяемой РЭА, могут быть использованы различного рода теплоаккумуляторы, принцип работы и описание которых приведены в [5, 6], то для дальнейшего преобразования аккумулированной теплоты в электрическую энергию могут быть эффективно применены только термоэлектрические преобразователи энергии [7]. Преимущества последних - значительный моторесурс, отсутствие подвижных частей, бесшумная работа, экологическая чистота, универсальность в отношении способов подвода и отвода теплоты и возможности рекуперации отработанной тепловой энергии [8-9].

Возможно несколько вариантов утилизации теплоты, выделяемой РЭА.

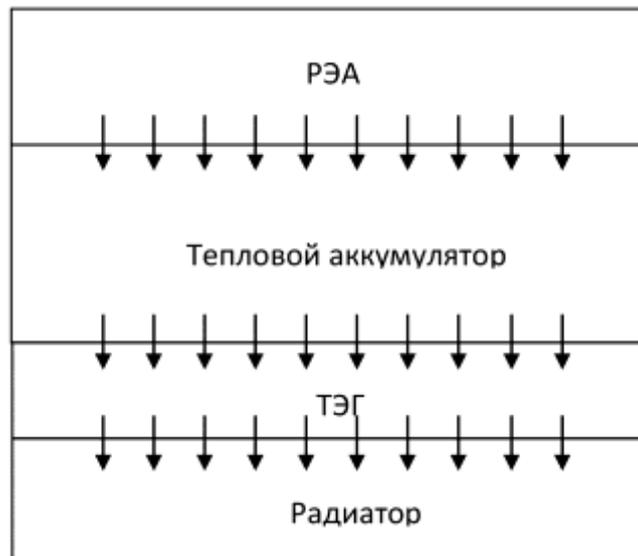
1. Преобразование тепловой энергии от работающей РЭА в электрическую путем непосредственного сопряжения тепловыделяющих компонентов со спаями термоэлектрических преобразователей с дальнейшей подачей получаемой термо-эдс на электрический аккумулятор. Данное техническое решение имеет несколько существенных недостатков. Первый недостаток состоит в невозможности в этом случае обеспечения требуемого температурного режима компонентов РЭА ввиду отсутствия возможности эффективного отвода теплоты от последних. Вторым недостатком является генерация электрической энергии только во время функционирования РЭА и соответственно обязательное применение аккумулятора электрической энергии, что не всегда бывает оправдано из-за ограничений по массогабаритным показателям.
2. Использование совместно с термоэлектрическими преобразователями энергии специальных систем теплоотвода. В этом случае спаи преобразователей будут сопрягаться с горячими поверхностями теплоотводящих систем. Для данного варианта недостаток, связанный с обеспечением требуемого температурного режима РЭА, будет устранен, но вместе с тем утилизация теплоты также будет осуществляться только во время работы компонентов РЭА, что также будет требовать наличие электрического аккумулятора.
3. Применение в качестве теплоотводящей системы тепловых аккумуляторов. Наиболее предпочтительным в этом случае будет применение теплоаккумуляторов, выполненных на основе плавящихся рабочих веществ с большой теплотой плавления и температурой плавления, лежащей в пределах 50-70° С.

К тепловым аккумуляторам своими спаями будут присоединяться термоэлектрические преобразователи энергии. Особенностью такой схемы утилизации теплоты РЭА будет возможность генерации электрической энергии, как во время ее работы, так и после. Продолжительность генерации электрической энергии после окончания цикла функционирования РЭА будет определяться теплофизическими характеристиками рабочего вещества, его количеством, а также условиями теплообмена с окружающей средой. Из всех трех рассмотренных вариантов утилизации теплоты, выделяемой РЭА, представляется наиболее эффективным и рациональным именно третий вариант, совмещающий в себе пассивную систему теплоотвода с возможностью генерации электрической энергии достаточно продолжительное время.

**Методы исследования.** Модель термоэлектрической системы может быть разбита на три основные части, включающие в себя расчет процесса плавления рабочего вещества в теплоаккумуляторе, определяющего эффективность отвода теплоты от компонента РЭА, а также продолжительность ее работы; расчет процесса охлаждения и затвердевания рабочего вещества в тепловом аккумуляторе, что определяет продолжительность генерации электрической энергии после прекращения цикла работы РЭА; расчет непосредственно термоэлектрического генератора (ТЭГ), определяющего количество получаемой электрической энергии за счет утилизации теплоты, выделяемой РЭА.

В соответствии с выбранной схемой утилизации теплоты ее тепловая модель имеет вид, изображенный на рис.1. В модель входят четыре основных блока: блок РЭА, теплового аккумулятора, ТЭГ и радиатора для отвода теплоты от вторых спаев ТЭГ.

На границе указанных блоков имеют место тепловые потоки, определяющие количество теплоты, передаваемое от РЭА к теплому аккумулятору, от теплоаккумулятора к первым спаям ТЭГ, от вторых спаев ТЭГ к радиатору. Исходными параметрами для расчета являются тепловая мощность, выделяемая РЭА, теплофизические и габаритные параметры теплоаккумулятора, теплофизические и электрофизические характеристики материалов ТЭГ, способ исполнения радиатора. Выходными параметрами являются зависимости изменения во времени температуры оболочки теплового аккумулятора и границы раздела фаз рабочего вещества при различных величинах мощности рассеяния РЭА, а также характеристик окружающей среды при плавлении и затвердевании рабочего агента, термо-эдс и мощность, вырабатываемая ТЭГ.



**Рисунок 1- Тепловая модель термоэлектрической системы утилизации теплоты**

Моделирование процессов, связанных с изменением агрегатного состояния рабочего вещества, осуществлено путем решения задачи Стефана с использованием метода Л.С.Лейбензона [10]. Метод приближенного решения заключается в том, что функции изменения температуры в жидкой и твердой фазе вещества подбираются таким образом, чтобы они удовлетворяли требуемым начальным и граничным условиям.

Подобранные таким образом функции подставляются в условие сопряжения на границе раздела фаз, и полученное дифференциальное уравнение решается относительно координаты границы раздела фаз. Для рассматриваемого случая профили температур в твердой и жидкой фазе представлены в виде полиномиальной зависимости в соответствии с рекомендациями [11].

В результате получены следующие системы уравнений для исследования процессов плавления и затвердевания рабочего агента [12]:

1. Для случая плавления рабочего вещества

$$\frac{dT_{об}}{d\tau} = \frac{1}{(c\rho\delta)_{об}} \left[ q_{РЭА} + \alpha_{cp} (T_{cp} - T_{об}) + \frac{\lambda_1}{\xi} (T_{кр} - T_{об}) \right], \quad (1)$$

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \frac{\frac{1}{2} c_1 \rho_1 \xi \frac{dT_{об}}{d\tau} + \frac{\lambda_1}{\xi} (T_{кр} - T_{об})}{c_1 \rho_1 \left( \frac{1}{2} T_{кр} - T_{об} \right) - c_2 \rho_2 (T_{кр} - T_{2R0}) \frac{\xi - R}{\xi_0 - R} - \rho_2 r}. \quad (2)$$

2. Для случая затвердевания рабочего вещества

$$\frac{dT_{об}}{d\tau} = \frac{1}{(c\rho\delta)_{об}} \left[ \alpha_{cp} (T_{cp} - T_{об}) + \frac{\lambda_2 (T_{кр} - T_{об})}{\xi} \right], \quad (3)$$

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \frac{\lambda_2 (T_{кр} - T_{об})}{\rho_1 r - \frac{1}{2} c_2 \rho_2 (T_{об} - T_{кр}) - c_1 \rho_1 (T_{1R0} - T_{кр}) \frac{R - \xi}{\xi_0 - R}}. \quad (4)$$

В соотношениях (1)-(4)  $c_i, \rho_i, \lambda_i$  - теплоемкость, плотность и теплопроводность жидкой и твердой фазы рабочего агента, где индекс 1 соответствует жидкой фазе, а индекс 2 – твердой фазе рабочего вещества;  $\tau$  - время;  $q_{РЭА}$  - количество теплоты, выделяемое элементом РЭА в единицу времени и приходящееся на единицу площади торцевой грани емкости с тепловым аккумулятором;  $\alpha_{cp}$  - коэффициент теплоотдачи в окружающую среду;  $T_{об}$  - среднemasсовая тем-

пература металлической оболочки устройства;  $T_{cp}$  - температура окружающей среды;  $r$  - теплота плавления рабочего вещества;  $T_{кр}$  - температура плавления рабочего вещества;  $R$  - толщина слоя рабочего вещества;  $\xi$  - граница раздела фаз;  $\alpha_{об}, \alpha_{кр}$  - соответственно коэффициенты теплоотдачи от оболочки к жидкости и от поверхности раздела фаз к жидкости;  $\tau_0, \xi_0$  - время и толщина расплава, при которых начинается интенсивное движение конвективных токов и поле температур по жидкой фазе практически исчезает;  $T_{2R}, T_{2R0}$  - соответственно температуры при  $x = R$  в любой момент времени  $\tau$  и при  $\tau = \tau_0, \xi_0$  - толщина расплава при  $\tau = \tau_0$ ;  $\tau_0$  - время, при котором начинает наблюдаться линейное изменение температуры  $T_{2R}$  от времени;  $n$  - параметр, определяемые экспериментально.

Для расчета ТЭГ в рассматриваемой модели использована стандартная методика, аналогичная приведенным в [13,14,15].

Если к горячему спаю ТЭГ подводится 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 спаю  $\Delta T$ , согласно эффекту Зеебека, возникнет термо-эдс.  $E$ .

При условии независимости термоэлектрических свойств от температуры

$$E = (\alpha_p + \alpha_n) \Delta T, \quad (5)$$

где  $\alpha_p$  и  $\alpha_n$  - абсолютные величины коэффициентов термо-эдс. ветвей р- и n-типов соответственно.

Под действием термо-эдс.  $E$  по замкнутой цепи ТЭГ, включающей полезную нагрузку  $R_n$ , потечет электрический ток  $I$ .

Внутреннее сопротивление составляющих ТЭГ термоэлементов  $R_{тэ}$  включает в себя сопротивления ветвей соответственно  $R_p$  и  $R_n$ , и сопротивления коммутационного компонента  $R_k$ :

$$R_{тэ} = R_p + R_n + R_k. \quad (6)$$

Сопротивление коммутационного компонента может быть представлено в виде относительной величины,

$$k = \frac{R_k}{R_p + R_n}, \quad (7)$$

а величины сопротивлений ветвей могут быть выражены через их геометрические размеры и удельные сопротивления термоэлектрических материалов.

Тогда,

$$R_{тэ} = \left( \rho_p \frac{\ell}{S_p} + \rho_n \frac{\ell}{S_n} \right) (1 + k), \quad (8)$$

где  $S_p$  и  $S_n$  - площади поперечных сечений ветвей соответственно р- и n-типов,  $\rho_p$  и  $\rho_n$  - удельные сопротивления ветвей термоэлемента соответственно р- и n-типов;  $\ell$  - длина ветвей.

Полное сопротивление термоэлектрической цепи равно  $R_{тэ} + R_n$ .

Полезную нагрузку также можно представить в виде относительной величины  $K = R_n / R_{тэ}$ , которая называется относительной полезной нагрузкой. Тогда общее сопротивление цепи будет равно  $R_{тэ} (1 + K)$ .

Согласно закону Ома, ток в цепи ТЭБ будет определяться выражением:

$$I = \frac{E}{(1 + K)R_{тэ}},$$

а напряжение на нагрузке:

$$U = \frac{K}{1 + K} E.$$

Полезная электрическая мощность, вырабатываемая ТЭГ, будет определяться по формуле:

$$W = UI = \frac{K}{(1+K)^2} \frac{E^2}{R_{\tau_0}} = \frac{K}{(1+K)^2} \frac{(\alpha_p + \alpha_n)^2 \Delta T^2}{\left( \rho_p \frac{\ell}{S_p} + \rho_n \frac{\ell}{S_n} \right) (1+k)}$$

а значение КПД по выражению:

$$\varepsilon = W/q,$$

где  $q$  - входная тепловая мощность, включающая в себя работу по отводу теплоты от холодных спаев ТЭГ.

Вышеприведенные формулы дают возможность вычислить все электрические параметры ТЭГ, а также его КПД, если известны его размеры, свойства материалов, а также количество теплоты, подводимой к его спаям.

**Обсуждение результатов.** Численный эксперимент по описанной модели проводился при следующих исходных данных:

$T_c=293$  К,  $\alpha_c=10$  Вт/К·м<sup>2</sup> (за исключением случаев, когда значение  $\alpha_c$  указано непосредственно в подрисуночной надписи на графиках),  $\xi_0=0,001$  м;  $\tau_0=20$  с; наполнители – парафин ( $\rho_1=760$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_2=780$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_1=2680$  Дж/кг·К,  $c_2=2350$  Дж/кг·К,  $\lambda=0,27$  Вт/м·К,  $r=156 \cdot 10^3$  Дж/кг,  $T_{кр}=316$  К), азотнокислый никель ( $\rho_1=1980$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_2=2050$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_1=2140$  Дж/кг·К,  $c_2=1800$  Дж/кг·К,  $\lambda=0,56$  Вт/м·К,  $r=155 \cdot 10^3$  Дж/кг,  $T_{кр}=329,7$  К), элаидиновая кислота ( $\rho_1=850$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_2=860$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_1=2180$  Дж/кг·К,  $c_2=1550$  Дж/кг·К,  $\lambda=0,16$  Вт/м·К,  $r=214 \cdot 10^3$  Дж/кг,  $T_{кр}=318$  К).

Параметры термоэлектрического материала: теплопроводность - 1,5 Вт/(м·К), удельное электрическое сопротивление -  $10,65 \cdot 10^{-6}$  Ом·м, теплоемкость - 123 Дж/(кг·К), коэффициент термо-эдс. -  $0,2 \cdot 10^{-3}$  В/К, и размеры ветвей термоэлементов - 2-2-2 мм.

Расчетные зависимости показывают, что температура оболочки и продолжительность плавления рабочего вещества зависят от величины тепловой нагрузки на теплоаккумулятор (значения  $q_{РЭА}$ ), типа рабочего агента, а также условий теплообмена с окружающей средой. При отсутствии конвективных токов в жидкой фазе процесс теплообмена является нестационарным процессом теплопроводности и температура оболочки устройства при этом все время возрастает. Скорость ее роста зависит от подводимого к ней количества теплоты (величины  $q_{РЭА}$ ), толщины слоя и теплопроводности наполнителя.

Также на температуру компонента РЭА в процессе его работы будет оказывать влияние подбор того или иного типа рабочего наполнителя.

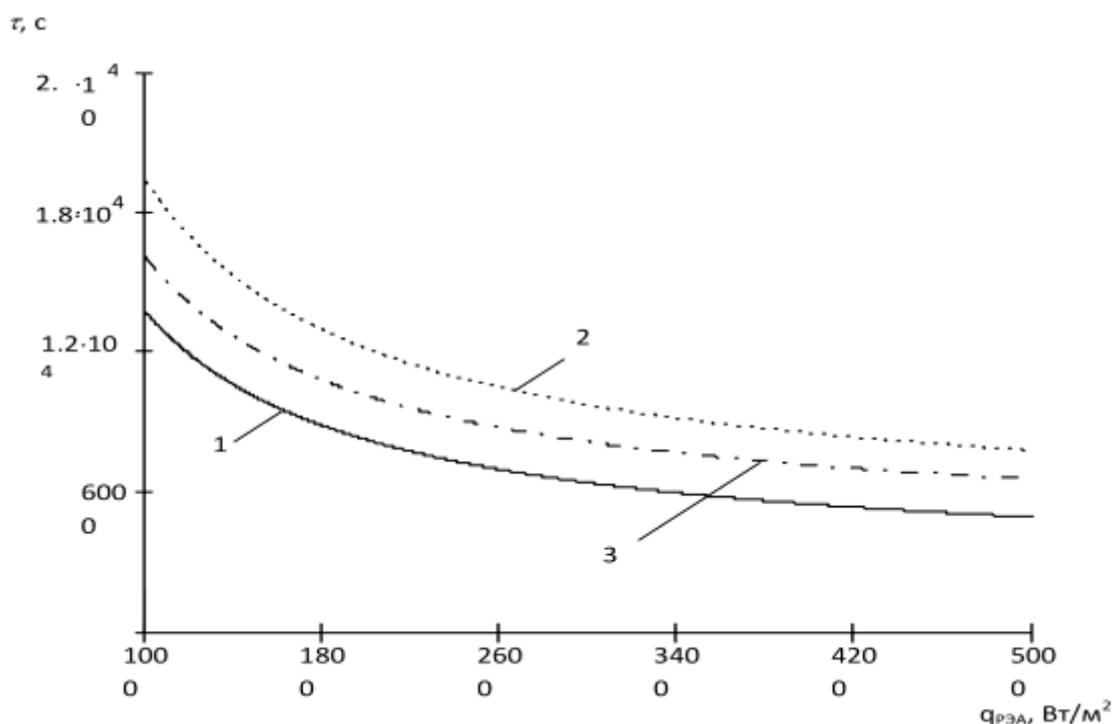
При этом наиболее лучшим в этом отношении будет материал с наиболее высоким значением коэффициента теплопроводности, теплоемкости и теплоты плавления.

На рис.2 приведены графики зависимости длительности полного проплавления различных наполнителей от величины мощности рассеяния РЭА, что соответствует длительности его стабильной работы.

Здесь наибольшую продолжительность плавления в диапазоне удельных мощностей от 1000 до 5000 Вт/м<sup>2</sup> имеет азотнокислый никель, что объясняет его более высокая температура и теплота плавления, а также величина удельного коэффициента теплопроводности. Аналогичные процессы будут происходить в тепловом аккумуляторе при затвердевании рабочего вещества. Здесь также на скорость остывания и затвердевания рабочего агента будут оказывать влияние его теплофизические характеристики, а также интенсивность теплообмена с окружающей средой.

Указанные обстоятельства иллюстрируют зависимости, представленные на рис.3-4. Как следует из графиков, время остывания рабочего вещества и оболочки устройства выше времени их плавления. Это связано с низким значением коэффициента теплообмена при естественном воздушном теплоотводе.

Так, при величине  $\alpha_c=1,5$  Вт/К·м<sup>2</sup> продолжительность полного затвердевания парафина составляет примерно 4 часа при толщине его слоя 3,5 см.



**Рисунок 2- Зависимость времени полного плавления различных тепловых аккумуляторов от мощности тепловыделений элемента РЭА, приходящихся на единицу площади,  $(срδ)_{ог} = 2,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $R = 0,03 \text{ м}$ .**

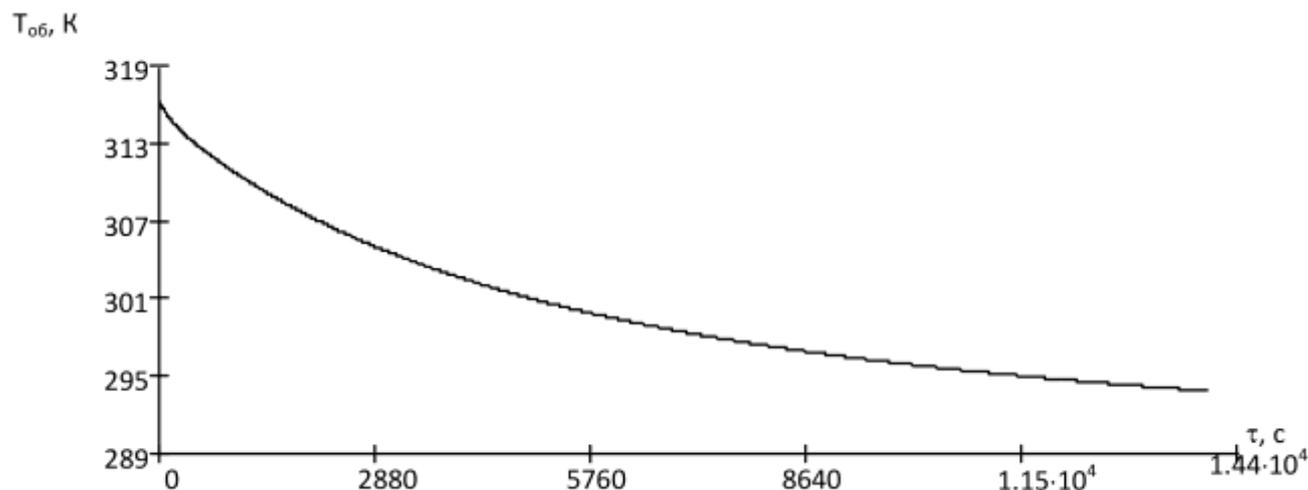
**1 – парафин, 2 – азотнокислый никель, 3 – элаидиновая кислота**

Для сравнения при  $q_{РЭА} = 4000 \text{ Вт}/\text{м}^2$  продолжительность полного проплавления такого же слоя парафина в 2,7 раза меньше.

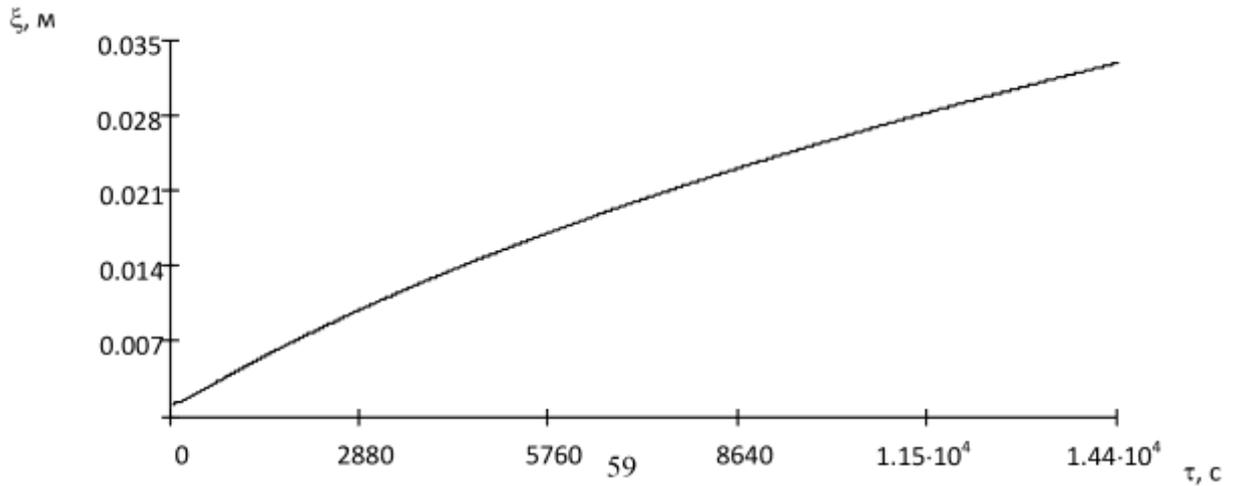
Данное обстоятельство говорит о возможности достаточно продолжительного времени генерации электрической энергии после прекращения цикла работы РЭА, а продолжительность полного проплавления такого же слоя парафина в 2,7 раза меньше.

Здесь также на скорость остывания и затвердевания рабочего агента будут оказывать влияние его теплофизические характеристики, а также интенсивность теплообмена с окружающей средой.

Указанные обстоятельства иллюстрируют зависимости, представленные на рис.3-4.

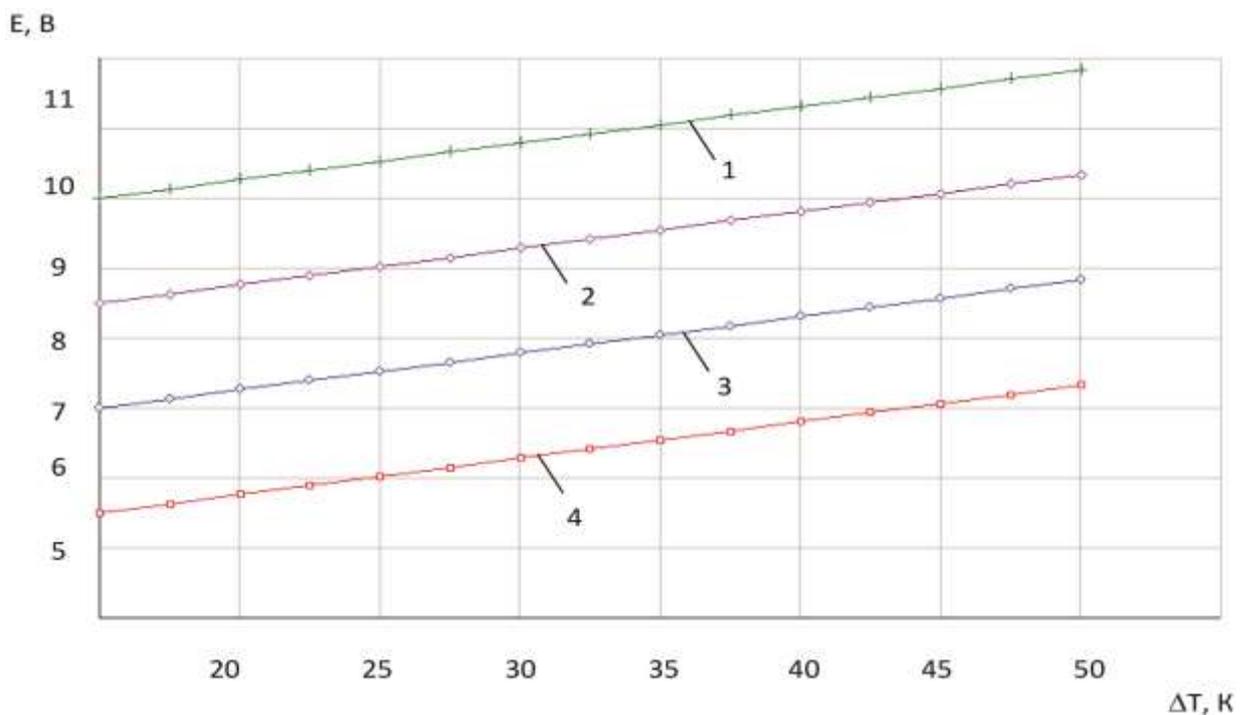


**Рисунок 3 - Зависимость координаты раздела фаз от времени при затвердевании вещества (вещество – парафин) за счет естественного теплообмена с окружающей средой,  $(срδ)_{ог} = 2,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,  $R = 0,035 \text{ м}$ ,  $\alpha_c = 1,5 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$**



**Рисунок 4 - Зависимость координаты раздела фаз от времени при затвердевании вещества (вещество – парафин) за счет естественного теплообмена с окружающей средой,  $(\text{ср}\delta)_{\text{об}} = 2,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,  $R = 0,035 \text{ м}$ ,  $\alpha_c = 1,5 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$**

Как следует из графиков 3-4, время остывания рабочего вещества и оболочки устройства выше времени их плавления. Это связано с низким значением коэффициента теплообмена при естественном воздушном теплоотводе. Так при величине  $\alpha_c = 1,5 \text{ Вт}/\text{К} \cdot \text{м}^2$  продолжительность полного затвердевания парафина составляет примерно 4 часа при толщине его слоя 3,5 см. Для сравнения при  $q_{\text{РЭА}} = 4000 \text{ Вт}/\text{м}^2$  продолжительность полного проплавления такого же слоя парафина в 2,7 раза меньше. Данное обстоятельство говорит о возможности достаточно продолжительного времени генерации электрической энергии после прекращения цикла работы РЭА.



**Рисунок 5- Зависимость изменения величины ЭДС от перепада температур между спаями ТЭГ при различных коэффициентах теплообмена с окружающей средой  
 1 –  $T_{\text{ср}} = 15^\circ \text{ С}$ , 2 –  $T_{\text{ср}} = 18^\circ \text{ С}$ , 3 –  $T_{\text{ср}} = 21^\circ \text{ С}$ , 4 –  $T_{\text{ср}} = 24^\circ \text{ С}$**

На рис.5 представлена зависимость изменения температуры генерируемой эдс от перепада температур между спаями ТЭГ при различных величинах температуры окружающей среды. Как следует из представленных данных, значение вырабатываемой эдс напрямую связано с перепадом температур между спаями ТЭГ, причем, чем больше величина последнего, тем выше значение эдс. Данное обстоятельство очевидно и следует из выражения (5). Также очевидна обратная зависимость эдс и значения температуры окружающей среды. Естественно, чем выше температура окружающей среды, тем выше будет температура холодных спаев ТЭГ и, соответственно, перепад температур между спаями. Из представленного графика видно, что для получения большей величины генерируемой эдс необходимо подбирать теплоаккумулятор с как можно большей температурой плавления. Однако в данном случае необходимо учитывать требования к температурным характеристикам компонентов РЭА. Большое значение температуры плавления теплового аккумулятора может повлечь за собой несоблюдение требуемого температурного режима отдельных компонентов РЭА, что скажется на надежности функционирования аппаратуры в целом. Поэтому задача подбора вещества для теплоаккумулятора является задачей оптимизационной, что требует учета соблюдения и температурного режима РЭА, и возможного значения генерируемой эдс ТЭГ.

На рис.6 представлена зависимость изменения КПД ТЭГ от термо-эдс. Как следует из представленных данных КПД генератора уменьшается при увеличении генерируемой эдс. При условиях проведения численного эксперимента максимальная величина КПД составила чуть менее 10 %.

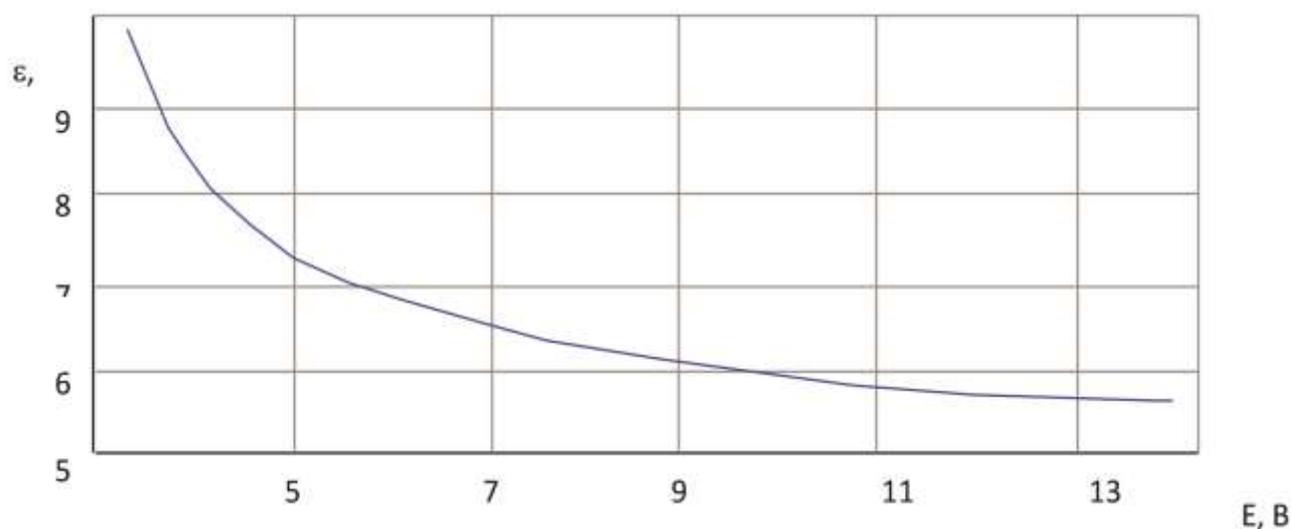


Рисунок 6 - Зависимость изменения КПД ТЭГ от термо-эдс

**Вывод.** Значение вырабатываемой эдс ТЭГ в основном зависит от теплофизических характеристик вещества, используемого в качестве теплового аккумулятора, характеристик воздушного радиатора, обеспечивающего отвод теплоты от холодных спаев термоэлементов, а также от температуры окружающей среды. Значение мощности рассеяния РЭА влияет на генерируемую эдс лишь опосредственно путем влияния на процесс плавления вещества в теплоаккумуляторе и определяет в основном лишь количество вещества в тепловом аккумуляторе в зависимости от требуемой продолжительности работы своих элементов.

#### Библиографический список:

1. [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_93978](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978).
2. Алексеев В.Ф. Принципы конструирования и автоматизации проектирования РЭУ. - Мн.: БГУИР. - 2003. - 197 с.
3. Кондратьев Г.М., Дульнев Г.Н., Платунов Е.С., Ярышев Н.А. Теплообмен в приборостроении. - СПб.: ГУИТМО. - 2004. - 513 с.

4. Дульнев Г.Н. Теория тепло-и массообмена. -СПб.: СПбНИУИТМО.- 2012.-194 с.
5. Рубан С.С. Нетрадиционные источники энергии. - М.: Энергия. - 2003. - 134
6. Левенберг В.Д., Ткач М.Р., Гольстрем В.А. Аккумулирование тепла. - Киев: Техника. - 1991. - 112 с.
7. Kajikawa T., Funahashi R. Recent activity on thermoelectric power generation technology in Japan. *Journal of thermoelectricity*. 2016, vol.1, pp.5-15.
8. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. Comparative analysis of thermoelectric and compression heat pumps for individual air-conditioners. *Journal of thermoelectricity*. 2016, vol. 2, pp.31-39.
9. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. Optimization of power supply system of thermoelectric liquid-liquid pump. *Journal of thermoelectricity*. 2015, vol. 6, pp.51-56.
10. Лыков А.В. Теория теплопроводности. - М.: Высшая школа. - 1967. - 600 с.
11. Алексеев В.А. Охлаждение радиоэлектронной аппаратуры с использованием плавящихся веществ. - М.: Энергия. - 1975. - 88 с.
12. Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Yevdulov D.V. Results of theoretical research on cooling system for radio electronic equipment elements working in the intermittent heat release mode. *Journal of thermoelectricity*. 2015, vol.6, pp.66-77.
13. Охотин А.С., Ефремов А.А., Охотин В.С., Пушкарский А.С. Термоэлектрические генераторы. - М.: Атомиздат. - 1971. - 292 с.
14. Lobunets Y.M. Performance analysis of heat-exchange type thermoelectric generator. *Journal of thermoelectricity*. 2014, vol.1, pp.57-64.
15. Lobunets Y.M. Criteria for performance evaluation of thermoelectric energy converter. *Journal of thermoelectricity*. 2014, vol. 2, pp.70-84.

#### References:

1. [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_93978](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978). (In Russian)
2. Alekseev V.F. Principles for the design and design automation REU. Minsk: BSUIR. 2003, 197p (In Russian)
3. Kondratyev G.M., Dulnev G.N., Platunov E.S., Yaryshev N.A. Heat transfer in the instrument. *St. Petersburg: GUITMO*. 2004, 513 p. (In Russian)
4. Dulnev G.N. Theory of heat and mass transfer. *St. Petersburg: SPbNIUITMO*. 2012, 194 p. (In Russian)
5. Ruban S.S. Alternative energy sources. *Moscow: Energiya*. 2003, 134 p. (In Russian)
6. Levenberg V.D., Tkach M.R., Gulf V.A. Stream heat accumulation. *Kiev: Tekhnika*. 1991, 112 p.
7. Kajikawa T., Funahashi R. Recent activity on thermoelectric power generation technology in Japan. *Journal of thermoelectricity*. 2016, vol.1, pp.5-15.
8. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. Comparative analysis of thermoelectric and compression heat pumps for individual air-conditioners. *Journal of thermoelectricity*. 2016, vol. 2, pp.31-39.
9. Anatyshuk L.I., Prybyla A.V. Optimization of power supply system of thermoelectric liquid-liquid pump. *Journal of thermoelectricity*. 2015, vol. 6, pp.51-56.
10. Lykov A.V. Theory of thermal conductivity. *Moscow: Vysshaya shkola*. 1967, 600 p. (In Russian)
11. Alekseev V.A. Cooling of electronic equipment using a meltable substance. *Moscow: Energiya*. 1975, 88p. (In Russian)
12. Ismailov T.A., Yevdulov O.V., Yevdulov D.V. The results of theoretical studies on the cooling of electronic components in intermittent heat. *Journal of thermoelectricity*. 2015, vol. 6., pp. 66-77.
13. Okhotin A.S., Efremov A.A., Okhotin V.S., Pushkarsky A.S. The Thermoelectric Generators. *Moscow: Atomizdat*. 1971, 292 p.
14. Lobunets Y.M. Performance analysis of heat-exchange type thermoelectric generator. *Journal of thermoelectricity*. 2014, vol.1, pp.57-64.
15. Lobunets Y.M. Criteria for performance evaluation of thermoelectric energy converter. *Journal of thermoelectricity*. 2014, vol. 2, pp.70-84.

**Сведения об авторах.**

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

**Евдулов Олег Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и общей электротехники.

**Набиев Наби Абдулаевич** – магистр

**Authors information.**

**Denis V. Evdulov** – candidate of technical Sciences, senior lecturer of the Department of theoretical and General electrical engineering, school of computing, computing and energy.

**Oleg V. Evdulov** – candidate of technical Sciences, Associate Professor, Department of theoretical and General electrical engineering, school of computing, computing and energy.

**Nabi A. Nabiyev** – magistr.

**Конфликт интересов**

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

**Поступила в редакцию** 01.06.2016.

**Received** 01.06.2016.

**Принята в печать** 19.07.2016.

**Accepted for publication** 19.07.2016.