

Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В.

ФГБОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», Россия,
г. Махачкала, пр. имама Шамиля, д.70, 367015

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ РЭА, РАБОТАЮЩИХ В РЕЖИМЕ ПОВТОРНО-КРАТКОВРЕМЕННЫХ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЙ

В работе рассмотрена система охлаждения элементов РЭА с повторно-кратковременными тепловыделениями, выполненная на основе плавящихся рабочих веществ с дополнительным теплоотводом, реализованным посредством термоэлектрической батареи. Приведены основные расчетные соотношения для ее теоретического исследования. Представлены зависимости продолжительности стабильной работы элемента РЭА, а также его температурные характеристики при обеспечении теплового режима работы исследуемой системой.

Ключевые слова: система охлаждения, элемент РЭА, теплообмен, плавящееся рабочее вещество, плавление, затвердевание, термоэлектрическая батарея, моделирование.

The paper deals with cooling system for radio electronic equipment elements working in the intermittent heat release mode based on melting working agents with the additional heat removal via a thermopile. The basic design ratios for its theoretical study are given. Dependences of REE element stable operation time, as well as its temperature characteristics with provision of its thermal conditions by the system in question are represented.

Key words: cooling system, REE element, heat exchange, melting working agent, melting, solidification, thermopile, simulation.

Введение

При проектировании радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), предназначенной для работы в широком диапазоне тепловых нагрузок, приходится учитывать влияние температуры на ее характеристики и параметры. Если последние выходят за пределы, допустимые для ее нормального функционирования, прибегают к тем или иным методам охлаждения и температурной стабилизации.

В настоящее время в практике проектирования РЭА используются различные методы обеспечения ее тепловых режимов, среди которых следует выделить воздушные, жидкостные, кондуктивные, испарительные, термоэлектрические и некоторые специальные [1-3]. Каждый из перечисленных методов имеет свои преимущества и недостатки. В частности, охлаждение РЭА на основе воздушного и кондуктивного методов является малоэффективным вследствие низкой интенсивности теплоотвода и точности поддержания температуры на требуемом уровне. Жидкостная и испарительная система термостабилизации сложна для реализации, требует громоздкого и сложного в конструктивном исполнении оборудования. Кроме того, в данном случае требуется наличие источника электрической энергии для питания охлаждающих систем.

Перспективным для охлаждения РЭА, работающей в режиме повторно-кратковременных тепловыделений, является способ, основанный на использовании плавящихся рабочих веществ

со стабильной температурой плавления [4]. Конструктивно устройства, реализующие данный метод, выполняются в виде контейнера, заполненного плавящимся рабочим веществом, в непосредственный контакт с которым приводится элемент РЭА, причем последний может размещаться как внутри контейнера, так и на его поверхности [5]. Во время работы основная часть теплоты, рассеиваемой элементом или блоком аппаратуры, поглощается за счет скрытой теплоты плавления вещества. После окончания работы аппаратуры происходит остывание вещества и его затвердевание вследствие теплообмена с окружающей средой.

Главным недостатком таких систем, ограничивающим их применение для охлаждения элементов РЭА с высокими плотностями теплового потока, является необходимость поддержания рабочего вещества в состоянии фазового перехода на протяжении всего цикла работы электронного прибора. Так как элемент в течение времени своего функционирования выделяет значительные мощности, то во многих случаях теплоаккумулирующей способности рабочего вещества оказывается недостаточно для обеспечения требуемого температурного режима на протяжении всего цикла его работы (рабочее вещество полностью расплавится к концу цикла работы элемента).

В связи с этим при охлаждении мощных радиоэлектронных устройств с применением плавящихся рабочих веществ целесообразно использование некоторой дополнительной охлаждающей системы для отвода избытка тепла от рабочего вещества. В отношении энергетических и массогабаритных показателей эффективным является использование в качестве такой дополнительной системы охлаждения термоэлектрической батареи (ТЭБ). Подобного рода система рассмотрена в [6], где представлены различные конструктивные варианты ее реализации, отличающиеся различными способами ориентации контейнера с плавящимся рабочим веществом и ТЭБ, а также режимами функционирования.

Целью настоящей статьи является разработка математической модели и теоретические исследования описанной в данной работе системы отвода теплоты от элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений, основанной на совместном применении плавящихся в заданном температурном диапазоне рабочих веществ и термоэлектрического метода охлаждения.

Конструкция системы охлаждения элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений.

На рис. 1 представлена структурная схема рассматриваемой системы, а на рис. 2 ее внешний вид. Здесь ТЭБ 1 приводится в хороший тепловой контакт с торцевой поверхностью тонкостенного металлического контейнера 2, заполненного рабочим веществом 3, на другую поверхность которого устанавливается элемент РЭА 4. ТЭБ работает в перерыве функционирования элемента тепловыделения.

Работа устройства осуществляется следующим образом. Тепло, поступающее от элемента РЭА 4, передается металлическому контейнеру 2 и через поверхность соприкосновения рабочему веществу 3. Далее одновременно происходит прогрев рабочего вещества 3 до температуры плавления и процесс плавления, сопровождающийся поглощением теплоты, выделяемой РЭА. После окончания цикла работы элемента РЭА 4 происходит остывание рабочего вещества 3 и его затвердевание за счет отвода теплоты ТЭБ 1, работающей в режиме охлаждения. Уменьшение времени затвердевания рабочего вещества 3 в этом случае достигается за счет увеличения интенсивности теплоотвода.

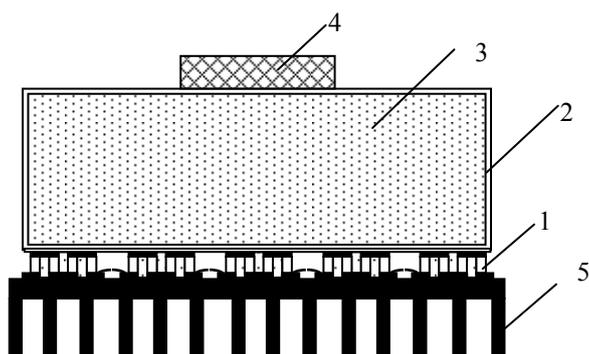


Рис. 1. Структурная схема системы для охлаждения элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений.



Рис. 2. Внешний вид системы для охлаждения элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений.

Математическая модель системы охлаждения элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений.

Математическое моделирование рассмотренной системы охлаждения включает в себя исследование теплофизических процессов при плавлении и затвердевании рабочего агента, а также расчет соответствующей ТЭБ.

Моделирование процессов, связанных с изменением агрегатного состояния рабочего вещества, осуществлено путем решения задачи Стефана с использованием метода Л.С. Лейбензона [7]. 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, 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 [4]:

В результате получены следующие системы уравнений для исследования процессов плавления и затвердевания рабочего агента при наличии и отсутствии конвективных потоков в жидкой фазе вещества:

1. Для случая плавления рабочего вещества при отсутствии развитой конвекции в жидкой фазе теплового аккумулятора

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

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

2. Для случая плавления рабочего вещества при наличии развитой конвекции в жидкой фазе теплового аккумулятора

$$(c\rho\delta)_{об} \frac{dT_{об}}{d\tau} = q_{РЭА} + \alpha_{cp} (T_{cp} - T_{об}) + \alpha_{кр} (T_1 - T_{об}), \quad (3)$$

$$c_1 \rho_1 \xi \frac{dT_1}{d\tau} = \alpha_{об} (T_1 - T_{об}) + \alpha_{кр} (T_{кр} - T_1), \quad (4)$$

$$\frac{d\xi}{d\tau} \left[c_2 \rho_2 \left(\frac{-2 \cdot n (T_{кр} \cdot R - T_{2R0} \cdot R) + \xi (T_{2R0} - T_{кр})}{(n+1)(\xi_0 - R)} \right) + r \rho_2 \right] = \alpha_{кр} (T_1 - T_{кр}). \quad (5)$$

3. Для случая затвердевания рабочего вещества при отсутствии развитой конвекции в жидкой фазе теплового аккумулятора

$$\frac{dT_{об}}{d\tau} = \frac{1}{(c\rho\delta)_{об}} \left[\alpha_{кр} (T_{кр} - T_{об}) + \frac{\lambda_2 (T_{кр} - T_{об})}{\xi} \right], \quad (6)$$

$$\frac{d\xi}{d\tau} = \frac{\lambda_2 (T_{кр} - T_{об}) - q_{ТЭБ} (R - \xi)}{\rho_1 r - \frac{1}{2} c_2 \rho_2 (T_{об} - T_{кр}) - c_1 \rho_1 (T_{1R0} - T_{кр}) \frac{R - \xi}{\xi_0 - R}}. \quad (7)$$

4. Для случая затвердевания рабочего вещества при наличии развитой конвекции в жидкой фазе теплового аккумулятора

$$(c\rho\delta)_{об} \frac{dT_{об}}{d\tau} = \alpha_{кр} (T_{кр} - T_{об}) + \alpha_{об} (T_1 - T_{об}), \quad (8)$$

$$c_1 \rho_1 \xi \frac{dT_1}{d\tau} = \alpha_{об} (T_1 - T_{об}) + \alpha_{кр} (T_{кр} - T_1), \quad (9)$$

$$\frac{d\xi}{d\tau} \left[c_2 \rho_2 \left(\frac{-2 \cdot n (T_{кр} \cdot R - T_{2R0} \cdot R) + \xi (T_{2R0} - T_{кр})}{(n+1)(\xi_0 - R)} \right) + r \rho_1 \right] = \alpha_{кр} (T_1 - T_{кр}) - q_{ТЭБ}. \quad (10)$$

В соотношениях (1)-(10) c_i , ρ_i , λ_i – теплоемкость, плотность и теплопроводность жидкой и твердой фазы рабочего агента, где индекс 1 соответствует жидкой фазе, а индекс 2 – твердой фазе рабочего вещества; τ – время; $q_{РЭА}$ – количество теплоты, выделяемое элементом РЭА в единицу времени и приходящееся на единицу площади торцевой грани емкости с тепловым аккумулятором; $\alpha_{кр}$ – коэффициент теплоотдачи в окружающую среду $T_{об}$ – среднemasсовая температура металлической оболочки устройства (теплом, идущим на нагрев или охлаждение элемента РЭА, вследствие его малой величины по сравнению с теплом, аккумулируемым рабочим веществом, пренебрегаем или учитываем в суммарной теплоемкости металлической оболочки; данное допущение позволяет принять за температуру элемента РЭА значение $T_{об}$); $T_{кр}$ – температура окружающей среды; r – теплота плавления рабочего вещества; R – толщина слоя рабочего вещества; ξ – граница раздела фаз; $\alpha_{об}$, $\alpha_{кр}$ – 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; T_{2R} , T_{2R0} – соответственно температуры при $x = R$ в любой момент времени τ и при $\tau = \tau_0$, ξ_0 – толщина расплава при $\tau = \tau_0$; τ_0 – время, при котором начинает наблюдаться линейное изменение температуры T_{2R} от времени; n – параметр, определяемые экспериментально [4]; $q_{ТЭБ}$ – количество теплоты, отводимое в единицу времени ТЭБ и приходящееся на единицу площади торцевой грани емкости с тепловым аккумулятором.

Расчет ТЭБ произведен на основе стандартной методики с использованием пакета

прикладных программ Thermoelectric system calculation (производитель ОАО «Криотерм», г. Санкт-Петербург) [8]. На основе анализа значений $q_{ТЭБ}$, эквивалентных величине холодопроизводительности ТЭБ, определены геометрические размеры термоэлементов, входящих в состав ТЭБ, величина питающего электрического тока, потребляемая электрическая энергия.

Результаты численного эксперимента системы охлаждения элементов РЭА, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений.

Результаты численного эксперимента по разработанной модели охлаждающего устройства приведены на рис. 3-10. Рассмотрены зависимости изменения температуры оболочки от времени при плавлении вещества, а также координаты границы раздела фаз от времени при различных мощностях рассеяния элемента РЭА (рис. 3 – 4), различных наполнителях (рис. 6 – 7), длительности полного плавления рабочего вещества от мощности тепловыделений элемента РЭА (рис. 8). На рис. 5 приведено для сравнения изменение во времени температуры оболочки при использовании плавящегося вещества и применении естественного воздушного охлаждения. Аналогичные данные для режима охлаждения приведены на рис. 11 – 16.

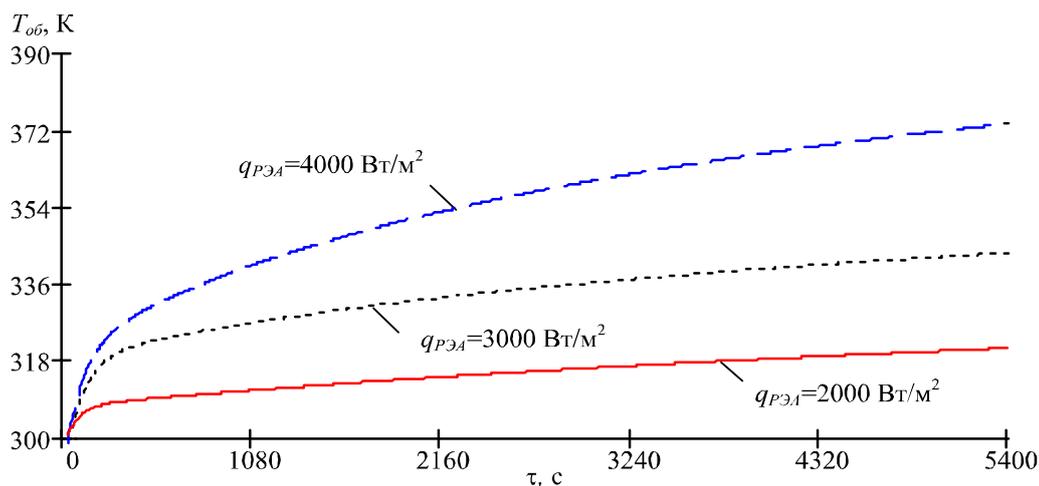


Рис. 3. Зависимость температуры оболочки от времени при плавлении вещества (вещество – парафин) без конвекции в жидкой фазе, $(\text{ср}\delta)_{об} = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $R = 0.03 \text{ м}$.

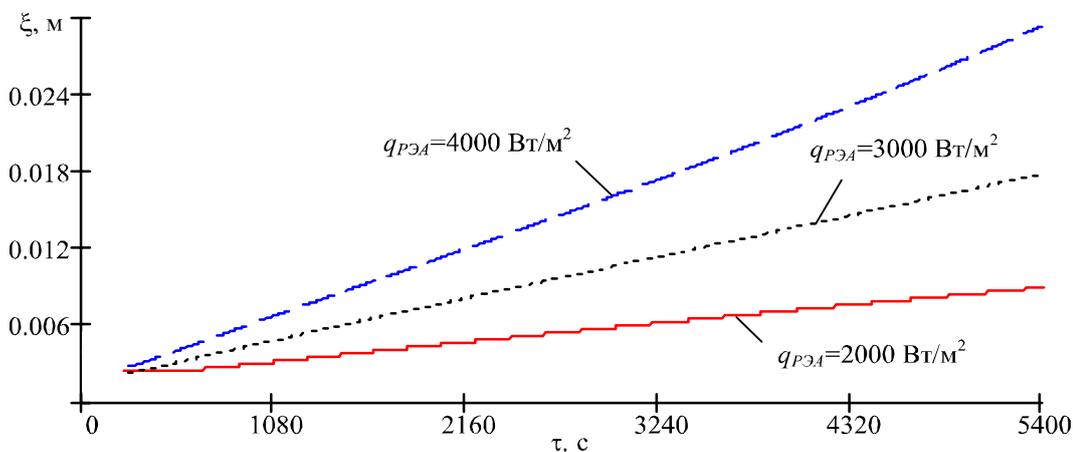


Рис. 4. Зависимость координаты раздела фаз от времени при плавлении вещества (вещество – парафин) без конвекции в жидкой фазе, $(\text{ср}\delta)_{об} = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $R = 0.03 \text{ м}$.

Расчеты произведены при следующих исходных данных: рабочие вещества – парафин ($\rho_1 = 760 \text{ кг/м}^3$, $\rho_2 = 780 \text{ кг/м}^3$, $c_1 = 2680 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, $c_2 = 2350 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, $\lambda = 0.27 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, $r = 156 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$, $T_{кр} = 316 \text{ К}$), элаидиновая кислота ($\rho_1 = 850 \text{ кг/м}^3$, $\rho_2 = 860 \text{ кг/м}^3$, $c_1 = 2180 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, $c_2 = 1550 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, $\lambda = 0.16 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, $r = 214 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$, $T_{кр} = 318 \text{ К}$), азотнокислый никель ($\rho_1 = 1980 \text{ кг/м}^3$, $\rho_2 = 2050 \text{ кг/м}^3$, $c_1 = 2140 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, $c_2 = 1800 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$, $\lambda = 0.56 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, $r = 155 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$, $T_{кр} = 329.7 \text{ К}$), $T_{ср} = 293 \text{ К}$, $\alpha_{ср} = 10 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}^2$ (за исключением случаев, когда значение $\alpha_{ср}$ указано непосредственно в подрисуночной надписи на графиках), $\xi_0 = 0.001 \text{ м}$; $\tau_0 = 20 \text{ с}$, $\alpha_{об} = 20 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}^2$, $\alpha_{рк} = 20 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}^2$.

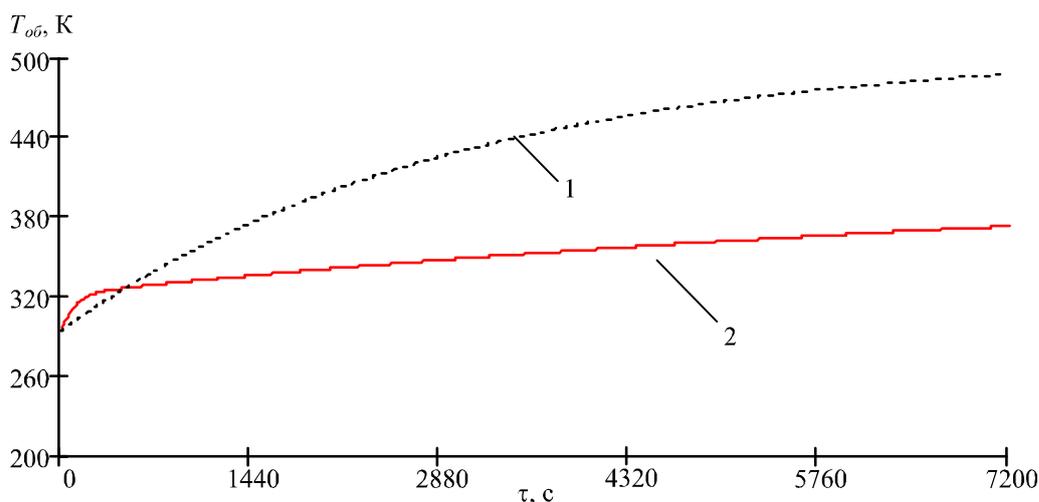


Рис. 5. Зависимость температуры оболочки от времени при плавлении вещества (вещество – парафин) без конвекции в жидкой фазе ($(ср\delta)_{об} = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $R = 0.03 \text{ м}$, $q_{РЭА} = 2000 \text{ Вт/м}^2$.

1 – использование естественного воздушного охлаждения с $\alpha_{ср} = 5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$,
 2 – использование системы охлаждения с рабочим веществом – азотнокислым никелем.

Расчетные зависимости определяют, что температура оболочки и длительность плавления рабочего вещества зависит от величины тепловой нагрузки на охлаждающее устройство (значения $q_{РЭА}$), типа рабочего вещества, а также условий теплообмена с окружающей средой. В случае отсутствия конвективных потоков в жидкой фазе процесс теплообмена является нестационарным процессом теплопроводности и температура оболочки устройства все время возрастает. Скорость ее роста зависит от подводимой к ней теплоты (величины $q_{РЭА}$), толщины слоя и теплопроводности вещества.

Согласно графикам, изображенным на рис. 3 – 4, увеличение значения $q_{РЭА}$ значительно повышает температуру оболочки и элемента РЭА, а также скорость плавления вещества (например после 1.5 часа работы элемента РЭА при изменении его мощности рассеяния с 2000 до 4000 Вт/м² температура оболочки повышается с 320 до 372 К, а скорость плавления увеличивается с $1.48 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$ до $5.5 \cdot 10^{-6} \text{ м/с}$). Повышение температуры оболочки устройства связано, в том числе, с увеличением теплового сопротивления жидкой фазы рабочего вещества, которое растет с увеличением расплавленного слоя. Это подтверждает необходимость принятия мер по уменьшению слоя жидкой фазы вещества между элементом РЭА и границей раздела фаз.

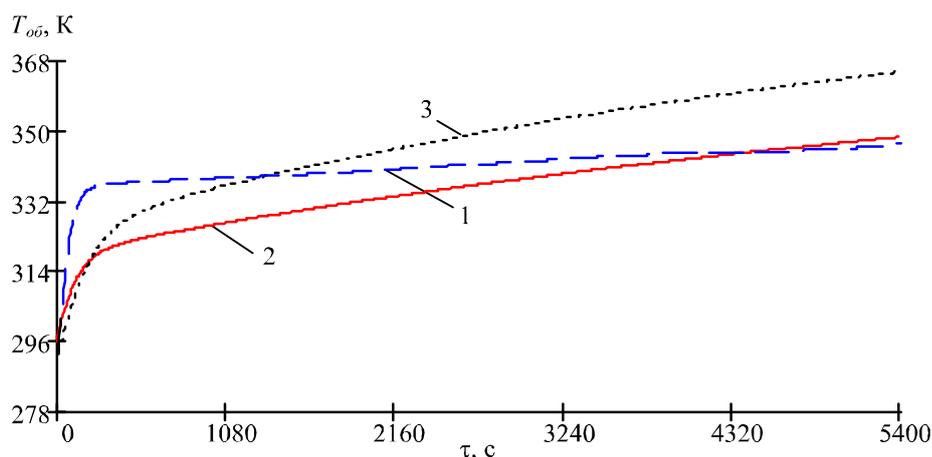


Рис. 6. Зависимость температуры оболочки от времени при плавлении различных тепловых аккумуляторов без конвекции в жидкой фазе, $(\text{ср}\delta)_{об} = 2.5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $R = 0.03 \text{ м}$, $q_{РЭА} = 3500 \text{ Вт}/\text{м}^2$. 1 – азотнокислый никель, 2 – парафин, 3 – элаидиновая кислота.

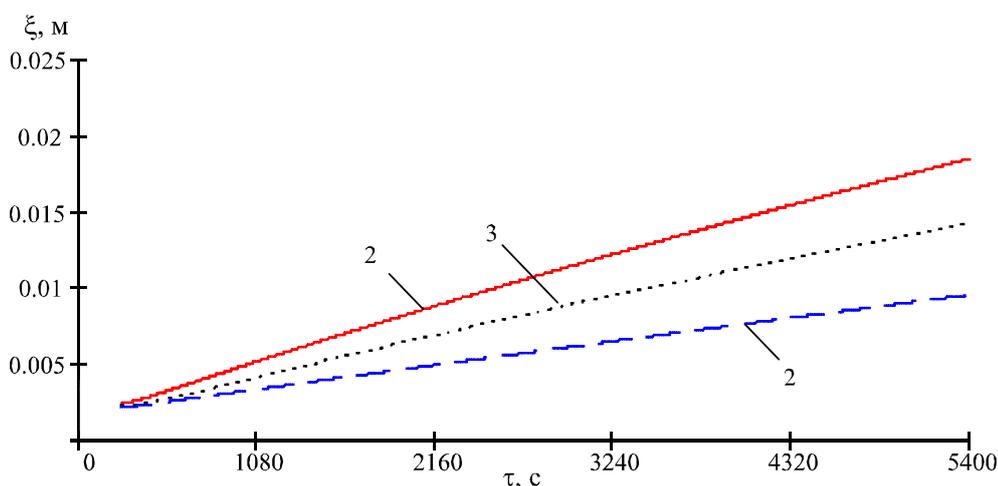


Рис. 7. Зависимость координаты раздела фаз от времени при плавлении различных тепловых аккумуляторов без конвекции в жидкой фазе, $(\text{ср}\delta)_{об} = 2.5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $R = 0.03 \text{ м}$, $q_{РЭА} = 3500 \text{ Вт}/\text{м}^2$. 1 – азотнокислый никель, 2 – парафин, 3 – элаидиновая кислота.

Также на температуру элемента РЭА в процессе его функционирования будет оказывать влияние подбор соответствующего рабочего наполнителя. Были произведены расчеты для случая использования в качестве такового азотнокислого никеля, парафина и элаидиновой кислоты (рис. 6 – 7). Как показали результаты исследований, для данных условий лучшие результаты получены при использовании в качестве наполнителя азотнокислого никеля. Согласно зависимостям, изображенным на рис. 6, для случая применения в качестве рабочего вещества азотнокислого никеля температура оболочки устройства наиболее стабильная, а скорость плавления наименьшая. Это связано, прежде всего, с его более высокой теплопроводностью, которая почти в 2 раза больше, чем у парафина и в 3 раза больше, чем у элаидиновой кислоты. Таким образом, снижение скорости роста температуры (т.е. ее стабилизации) можно достичь за счет увеличения эффективной теплопроводности вещества. Одним из методов увеличения эффективной теплопроводности вещества является применение различных наполнителей. Так, например, могут быть использованы металлическая крошка, различного рода оребрение, сотовые конструкции, либо пористые структуры.

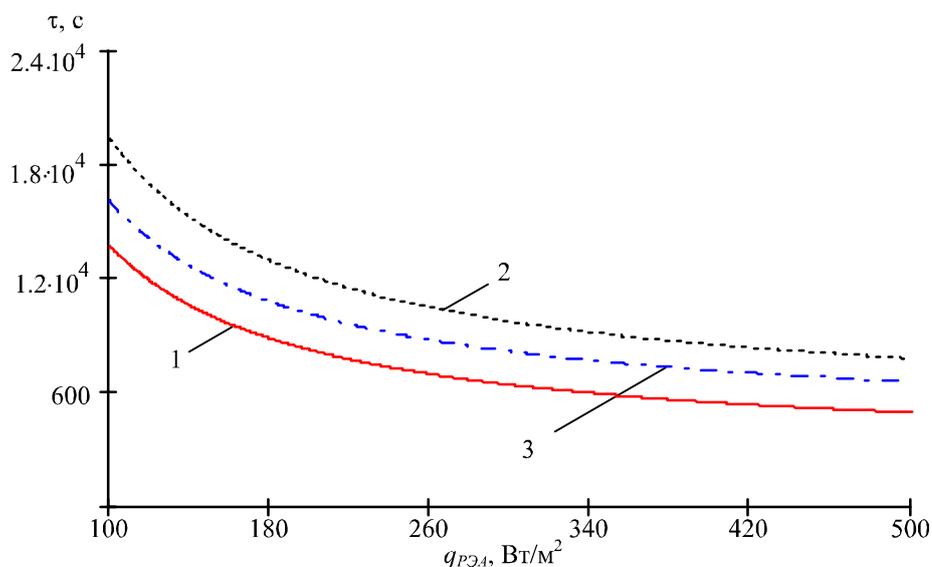


Рис. 8. Зависимость времени полного плавления различных тепловых аккумуляторов от мощности тепловыделений элемента РЭА, приходящихся на единицу площади без конвекции в жидкой фазе, $(\text{ср}\delta)_{\text{об}} = 2.5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $R = 0.03 \text{ м}$.
1 – парафин, 2 – азотнокислый никель, 3 – элаидиновая кислота.

На рис. 8 приведены графики зависимости продолжительности полного плавления различных наполнителей от величины мощности рассеяния элемента РЭА, что соответствует длительности его стабильной работы. Здесь наибольшую продолжительность плавления в диапазоне мощностей от 1000 до 5000 Вт/м² имеет азотнокислый никель, что объясняется его более высокой температурой и теплотой плавления, а также величиной коэффициента теплопроводности.

На процесс плавления вещества оказывает существенное влияние наличие конвективных потоков в его жидкой фазе. Этот случай соответствует размещению элемента на нижней торцевой поверхности контейнера с рабочим веществом и подводу теплоты снизу относительно теплового аккумулятора. Согласно рис. 9 – 10 для парафина влияние конвективных потоков начинает существенно сказываться через 19 – 20 мин. После начала процесса плавления, что соответствует толщине расплава 0.009 – 0.01 м. Начиная с указанного момента для развитой конвекции в жидкой фазе вещества процесс плавления интенсифицируется. Соответственно увеличивается скорость перемещения границы раздела фаз, а рост температуры оболочки охлаждающего устройства замедляется. Как следует из данных графиков на рис. 9 через 1.5 ч. После начала процесса плавления температура оболочки устройства при наличии конвекции в жидкой фазе теплового аккумулятора будет на 12 К меньше, чем в случае отсутствия конвективных потоков. Вместе с тем, согласно зависимостям, представленным на рис. 10, продолжительность полного проплавления рабочего вещества при наличии конвекции в жидкой фазе рабочего агента несколько ниже, чем при ее отсутствии. При указанных условиях продолжительность полного проплавления вещества в первом случае составляет 78 мин., а во втором – 90 мин. Указанное обстоятельство следует учитывать при проектировании системы теплоотвода в части увеличения количества теплового аккумулятора в емкости при размещении элемента РЭА на ее нижней торцевой поверхности.

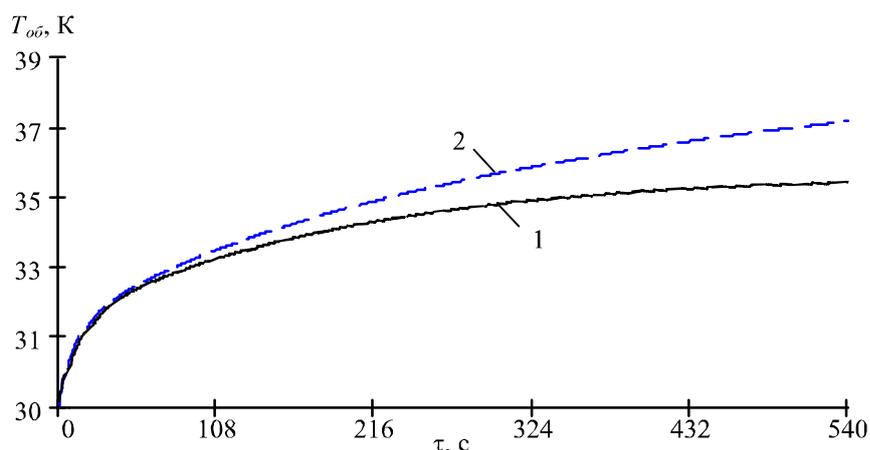


Рис. 9. Зависимость температуры оболочки от времени при плавлении вещества (вещество – парафин) при наличии (1) и отсутствии (2) конвекции в жидкой фазе, $(срд)_{об} = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $R = 0.025 \text{ м}$, $q_{РЭА} = 4000 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

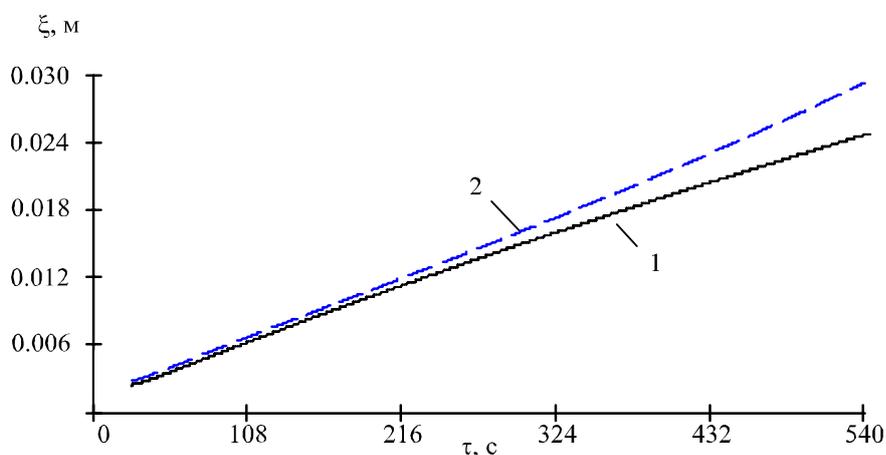


Рис. 10. Зависимость координаты раздела фаз от времени при плавлении вещества (вещество – парафин) при наличии (1) и отсутствии (2) конвекции в жидкой фазе, $(срд)_{об} = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $R = 0.025 \text{ м}$, $q_{РЭА} = 4000 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

На рис. 11 – 15 показаны зависимости температуры оболочки со стороны контакта с ТЭБ и границы раздела фаз при затвердевании наполнителя для различных величин холодопроизводительности ТЭБ, а также для условий, когда процесс охлаждения и затвердевания вещества осуществляется за счет естественного теплообмена с окружающей средой. Как видно из графиков, время остывания рабочего вещества и оболочки устройства при использовании ТЭБ в несколько раз меньше их времени остывания при естественном теплообмене с окружающей средой (для парафина это отношение при $q_{ТЭБ} = 2000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ и $\alpha_{ср} = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ составило 2 раза). Отсюда следует, что существующие ограничения в отношении времени цикла работы элемента РЭА и времени перерыва между его включениями, при использовании ТЭБ снижаются. Таким образом, если в случае естественного теплообмена оболочки охлаждающего устройства с окружающей средой период работы элемента РЭА должен был бы быть значительно меньше «паузы», то при использовании ТЭБ время между двумя последовательными циклами работы РЭА может быть в значительной мере уменьшено. При этом быстрее всего процесс охлаждения и затвердевания вещества проходит при использовании в качестве наполнителя парафина и азотнокислого никеля (из рис. 14 – 15, где исследования проводились для парафина, азотнокислого никеля, пальмитиновой и элаидиновой

кислот). Первого – за счет наименьшей температуры и теплоты плавления, второго – за счет более высокого коэффициента теплопроводности.

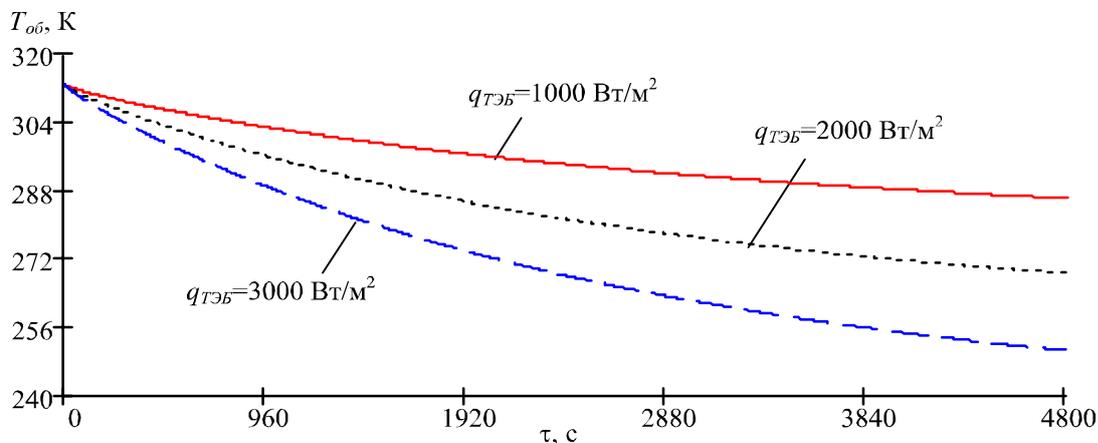


Рис. 11. Зависимость температуры оболочки от времени при затвердевании вещества (вещество – парафин) $(\text{ср}\delta)_{об} = 6.5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $R = 0.025 \text{ м}$.

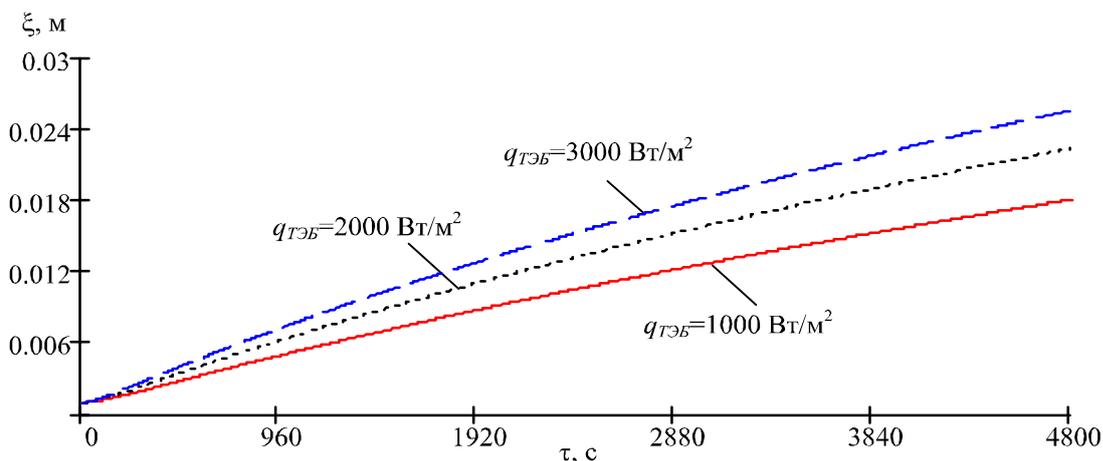


Рис. 12. Зависимость координаты раздела фаз от времени при затвердевании вещества (вещество – парафин) $(\text{ср}\delta)_{от} = 6.5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $R = 0.025 \text{ м}$.

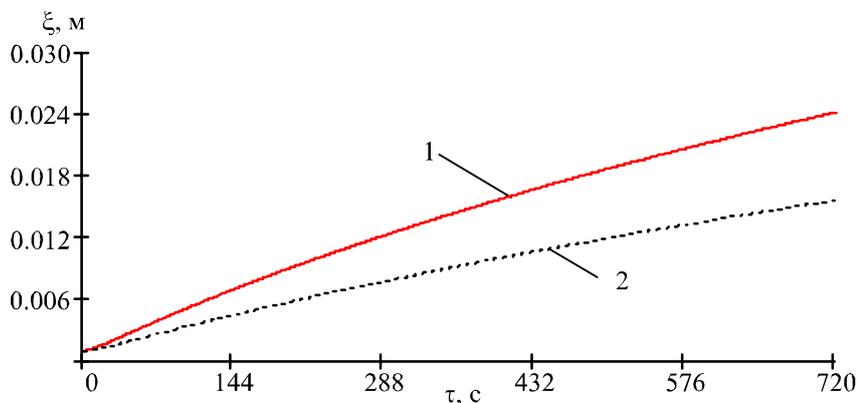


Рис. 13. Зависимость координаты раздела фаз от времени при затвердевании вещества (вещество – парафин) $(\text{ср}\delta)_{об} = 6.5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $R = 0.025 \text{ м}$. 1 – при использовании ТЭБ с $2000 \text{ Вт}/\text{м}^2$, 2 – при использовании естественного воздушного охлаждения за счет теплообмена с окружающей средой ($\alpha_{ср} = 10 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$).

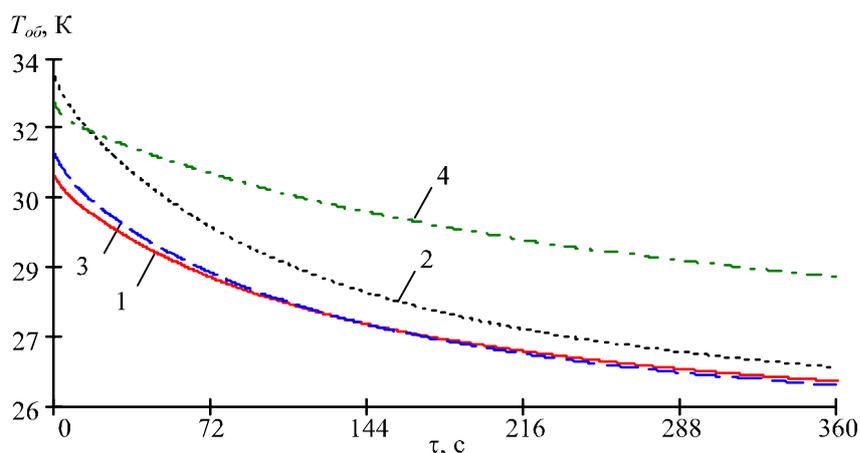


Рис. 14. Зависимость температуры оболочки от времени при затвердевании различных наполнителей $(\text{ср}\delta)_{\text{об}} = 2.1 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $R = 0.02 \text{ м}$, $q_{\text{ТЭБ}} = 1500 \text{ Вт}/\text{м}^2$. 1 – парафин, 2 – пальмитиновая кислота, 3 – элаидиновая кислота, 4 – азотнокислый никель.

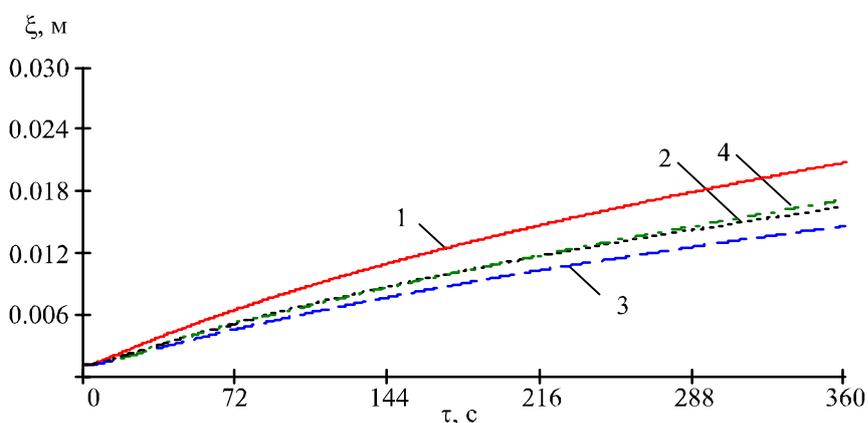


Рис. 15. Зависимость времени полного затвердевания рабочего вещества при использовании дополнительного теплоотвода с боковой поверхности емкости от мощности ТЭБ, приходящейся на единицу площади $(\text{ср}\delta)_{\text{об}} = 2.5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $R = 0.02 \text{ м}$. 1 – парафин, 2 – пальмитиновая кислота, 3 – азотнокислый никель.

Продолжительность процесса затвердевания вещества может быть существенно снижена при использовании дополнительного теплоотвода с боковой поверхности контейнера с веществом. Согласно расчетным данным (рис. 16) использование дополнительного теплоотвода с $q_{\text{ТЭБ}} = 6000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ при основном $q_{\text{ТЭБ}} = 1500 \text{ Вт}/\text{м}^2$ позволит снизить время полного затвердевания, например, для парафина до 1200 с, азотнокислого никеля до 2000 с, пальмитиновой кислоты до 2400 с. При этом в случае дополнительного теплоотвода с боковой поверхности, когда значение величин толщины, длины и ширины отсеков с плавящимися наполнителями сопоставимы, непосредственный расчет по выражениям (1) – (5), (6) – (10) не приемлем. В этом случае используется принцип сложения скоростей, изложенный, например, в [9].

Согласно этому методу сначала с помощью одномерных решений определяется толщина слоя рабочего вещества и температура оболочки в направлении осей x , y , z при условии, что скорости плавления или затвердевания независимы друг от друга. Затем рассчитывается продолжительность скорости плавления или затвердевания всей массы вещества в контейнере, исходя из соотношения

$$\frac{1}{\tau_n} = \frac{1}{\tau_x} + \frac{1}{\tau_y} + \frac{1}{\tau_z} \quad (11)$$

где τ_n – продолжительность плавления или затвердевания вещества в контейнере; τ_x, τ_y, τ_z – продолжительности плавления или затвердевания в направлении осей x, y, z при отсутствии влияния плавления или затвердевания соответственно в направлениях $y, z; x, z$ и x, y .

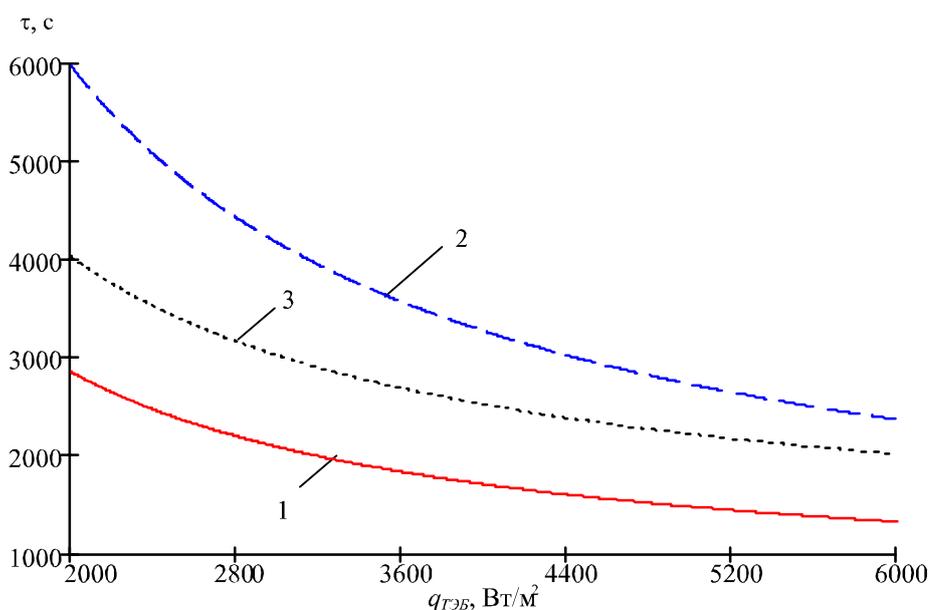


Рис. 16. Зависимость времени полного затвердевания рабочего вещества при использовании дополнительного теплоотвода с боковой поверхности емкости от мощности ТЭБ, приходящейся на единицу площади $(\text{срд})_{об} = 2.5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), R = 0.02 \text{ м}$.
1 – парафин, 2 – пальмитиновая кислота, 3 – азотнокислый никель.

По известной величине τ_n определяется температура оболочки устройства с помощью одномерных решений. Так как влияние размеров контейнера на температуру его оболочки меньше, чем на толщину расплавленного слоя, то полученное значение температуры оболочки для одномерной задачи позволит оценить предельный температурный режим оболочки контейнера, а, следовательно, и охлаждаемого элемента РЭА.

Выводы.

В результате проведенных исследований могут быть сделаны следующие выводы:

1. Одним из эффективных методов отвода теплоты от элементов РЭА, работающих в режиме с повторно-кратковременными тепловыделениями, является метод, основанный на применении плавящихся рабочих веществ. Главным недостатком данного метода является ограничение, связанное с необходимостью обеспечения процесса плавления на протяжении всего цикла работы РЭА.
2. Предложена система охлаждения элементов РЭА, дающая возможность расширить продолжительность их цикла работы за счет использования дополнительного отвода теплоты от плавящихся агентов посредством ТЭБ.
3. Разработана математическая модель системы охлаждения, реализованная путем решения

- задачи Стефана с использованием приближенного метода Л.С. Лейбензона, суть которого заключается в подборе таких функций изменения температуры жидкой и твердой фазы, которые бы удовлетворяли начальным и граничным условиям. Подобранные таким образом функции подставляются в условия сопряжения фаз, полученное дифференциальное уравнение решается относительно координаты раздела фаз.
4. В результате решения задачи плавления (затвердевания) вещества получены зависимости изменения температуры оболочки охлаждающей системы, а также координаты границы раздела фаз во времени. Указанные зависимости сильно зависят от величины рассеяния теплоты элемента РЭА, типов рабочих наполнителей, холодопроизводительности ТЭБ, условий окружающей среды.
 5. Установлено, что после 1.5 часа работы элемента РЭА при изменении его мощности рассеяния с 1000 до 3000 Вт/м² в случае использования парафина температура оболочки повышается с 317 до 367 К, а скорость плавления увеличивается с 10⁻⁶ м/с до 3.7·10⁻⁶ м/с.
 6. На температуру элемента РЭА в процессе его функционирования оказывает влияние подбор соответствующего рабочего наполнителя. Лучшими веществами в этом отношении будут те, которые при всех прочих условиях (температура плавления, теплота плавления, теплоемкость и т.п.) также имеют высокие значения коэффициента теплопроводности.
 7. Одним из методов повышения эффективного коэффициента теплопроводности может быть применение в рабочем веществе различных типов наполнителей (металлической крошки, различных оробрений, пористых структур).
 8. При размещении элемента РЭА на нижней торцевой поверхности контейнера с рабочим веществом на процесс плавления существенное влияние будет оказывать наличие конвективных потоков в его жидкой фазе. При данных условиях температура элемента РЭА будет ниже, однако вместе с тем сократится и длительность полного проплавления рабочего вещества, что необходимо учитывать при проектировании охлаждающей системы.
 9. В результате исследования теплообмена при затвердевании рабочих веществ установлено, что использование ТЭБ значительно уменьшает продолжительность затвердевания рабочего вещества. Для парафина при $q_{ТЭБ} = 2000$ Вт/м² его величина почти в 2 раза меньше, чем в случае использования естественного теплообмена с окружающей средой при $\alpha_{ср} = 10$ Вт/(м²·К).
 10. Для интенсификации процесса охлаждения и затвердевания рабочих веществ целесообразно теплосъем осуществлять дополнительными ТЭБ, размещаемыми по боковой поверхности контейнера с рабочим агентом.
 11. В случае дополнительного теплосъема с боковой поверхности, когда значение величин толщины, длины и ширины отсеков с плавящимися наполнителями сопоставимы, непосредственный расчет по выражениям (1) – (5), (6) – (10) не приемлем. В этом случае используется принцип сложения скоростей в соответствии с выражением (11).

Литература

1. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Термоэлектрические преобразователи энергии. – Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества. – 2003.
2. Дульнев Г.И. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высшая школа. – 1984.

3. Сушко В.Ю., Кораблев В.А., Шарков А.В. Метод выбора параметров многослойной защиты электронного устройства от мощного теплового воздействия // Изв. вузов. Приборостроение. – 2006. – Т. 49, № 3.
4. Алексеев В.А., Чукин В.Ф., Шишанов А.В. Прогнозирование теплового режима бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Системотехника. – 2004. – №2.
5. Алексеев В.А. Охлаждение радиоэлектронной аппаратуры с использованием плавящихся веществ. – М.: Энергия, 1975.
6. Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Махмудова М.М., Евдулов Д.В. Исследование системы охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры, работающих в режиме повторно-кратковременных тепловыделений // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2008. – №5.
7. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа. – 1967.
8. <http://kryothermtec.com>.
9. Гольдфарб Э.М. Теплотехника металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1967.

Поступила в редакцию 10.07.15.