

Ісмаїлов Т.А., Євдулов О.В., Євдулов Д.В.

ФГБОУ В Дагестанський державний технічний університет, Росія,
м. Махачкала, ім. імама Шаміля, буд.70, 367015.

РЕЗУЛЬТАТИ ТЕОРЕТИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ РЕА, ЩО ПРАЦЮЮТЬ У РЕЖИМІ ПОВТОРНО- КОРОТКОЧАСНИХ ТЕПЛОВИДІЛЕНЬ

У роботі розглянуто систему охолодження елементів РЕА з повторно-короткочасним тепловиділенням, виконано на основі робочих речовин, що плавляться з додатковим тепловідводом, реалізованим за допомогою термоелектричної батареї. Наведено основні розрахункові співвідношення для її теоретичного дослідження. Показано залежності тривалості стабільної роботи елемента РЕА, а також його температурні характеристики при забезпеченні його теплового режиму роботи досліджуваною системою.

Ключові слова: система охолодження, елемент РЕА, теплообмін, робоча речовина, що плавиться, плавлення, затвердіння, термоелектрична батарея, моделювання.

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.

Вступ

При проектуванні радіоелектронної апаратури (РЕА), призначеної для роботи в широкому діапазоні теплових навантажень, доводиться враховувати вплив температури на її характеристики та параметри. Якщо останні виходять за межі, допустимі для її нормального функціонування, вдаються до тих або інших методів охолодження та температурної стабілізації.

Нині в практиці проектування РЕА використовують різні методи забезпечення її теплових режимів, серед яких слід виділити повітряні, рідинні, кондуктивні, випарні, термоелектричні й деякі спеціальні [1 – 3]. Кожний з перелічених методів має свої переваги та недоліки. Зокрема охолодження РЕА на основі повітряного й кондуктивного методів є малоефективним внаслідок низької інтенсивності тепловідведення й точності підтримування температури на необхідному рівні. Рідинна й випарна системи термостабілізації складні для реалізації, вимагають громіздкого і складного, в конструктивному виконанні, устаткування. Крім того, у цьому випадку необхідна наявність джерела електричної енергії для живлення охолоджувальних систем.

Перспективним для охолодження РЕА, що працює в режимі повторно-короткочасних тепловиділень, є спосіб, заснований на використанні робочих речовин, що плавляться, зі стабільною температурою плавлення [4]. Конструктивно пристрої, що реалізують цей метод, виконуються у

вигляді контейнера, заповненого робочою речовиною, що плавиться, у безпосередній контакт із яким приводиться елемент РЕА, причому останній може розміщатися як усередині контейнера, так і на його поверхні [5]. Під час роботи основна частина теплоти, що розсіюється елементом або блоком апаратури, поглинається за рахунок прихованої теплоти плавлення речовини. Після закінчення роботи апаратури відбувається остигання речовини і її затвердіння внаслідок теплообміну з навколишнім середовищем.

Головним недоліком таких систем, що обмежують їхнє застосування для охолодження елементів РЕА з високими густинами теплового потоку, є необхідність підтримування робочої речовини в стані фазового переходу впродовж усього циклу роботи електронного приладу. Оскільки елемент упродовж часу свого функціонування виділяє значні потужності, то в багатьох випадках теплоакumuлююча здатність робочої речовини виявляється недостатньою для забезпечення необхідного температурного режиму впродовж усього циклу його роботи (робоча речовина повністю розплавиться до кінця циклу роботи елемента).

У зв'язку з цим під час охолодження потужних радіоелектронних пристроїв із застосуванням робочих речовин, що плавляться, доцільним є використання деякої додаткової охолоджувальної системи для відводу надлишку тепла від робочої речовини. У відношенні енергетичних і масогабаритних показників ефективним є використання як такої, додаткової системи охолодження термоелектричної батареї (ТЕБ). Подібного роду систему розглянуто у [6], де подано різні конструктивні варіанти її реалізації, що відрізняються різними способами орієнтації контейнера з робочою речовиною, що плавиться, і ТЕБ, а також режимами функціонування.

Мета статті – розробка математичної моделі та теоретичні дослідження описаної в нашій роботі системи відводу теплоти від елементів РЕА, що працюють у режимі повторно-короткочасних тепловиділень, заснованої на спільному застосуванні робочих речовин, що плавляться в заданому температурному діапазоні, і термоелектричного методу охолодження.

Конструкція системи охолодження елементів РЕА, що працюють у режимі повторно-короткочасних тепловиділень

На рис.1 показано структурну схему розглянутої системи, а на рис. 2 її зовнішній вигляд. Тут ТЕБ 1 доведено до теплового контакту із торцевою поверхнею тонкостінного металевого контейнера 2, заповненого робочою речовиною 3, на іншу поверхню якого встановлюється елемент РЕА 4. ТЕБ працює в перерві функціонування елемента тепловиділення.

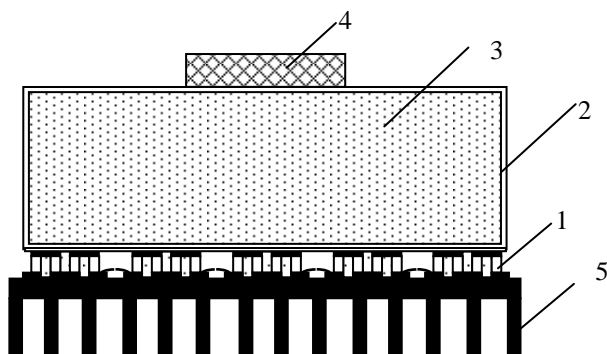


Рис.1. Структурна схема системи для охолодження елементів РЕА, що працюють в режимі повторно-короткочасних тепловиділень.



Рис.2. Зовнішній вигляд системи для охолодження елементів РЕА, що працюють в режимі повторно-короткочасних тепловиділень.

Робота пристрою здійснюється в такий спосіб. Тепло, що надходить від елемента РЕА 4, передається металевому контейнеру 2 і через поверхню дотикання робочій речовині 3. Далі одночасно відбувається прогрівання робочої речовини 3 до температури плавлення та процес плавлення, що супроводжується поглинанням теплоти, яка виділяється РЕА. Після закінчення циклу роботи елемента РЕА 4 відбувається остигання робочої речовини 3 і його затвердіння за рахунок відводу теплоти ТЕБ 1, що працює в режимі охолодження. Зменшення часу затвердіння робочої речовини 3 у цьому випадку досягається за рахунок збільшення інтенсивності тепловідведення.

Математична модель системи охолодження елементів РЕА, що працюють у режимі повторно-короткочасних тепловиділень

Математичне моделювання розглянутої системи охолодження включає в себе дослідження теплофізичних процесів в процесі плавлення та затвердіння робочого агента, а також розрахунки відповідної ТЕБ.

Моделювання процесів, пов'язаних зі зміною агрегатного стану робочої речовини, здійснене шляхом розв'язку завдання Стефана з використанням методу Л.С. Лейбензона [7]. Метод наближеного розв'язку полягає в тому, що функції зміни температури в рідкій і твердій фазах речовини підбираються таким чином, щоб вони задовольняли необхідним початковим і граничним умовам. Підібрані в такий спосіб функції підставляються в умову спряження на границі розділу фаз, отримане диференціальне рівняння вирішується відносно до координати границі розділу фаз. Для розглянутого випадку профілі температур у твердій і рідкій фазах показано у вигляді поліноміальної залежності відповідно до рекомендацій [4]:

У результаті отримано наступні системи рівнянь для дослідження процесів плавлення й затвердіння робочого агента за наявності й відсутності конвективних потоків у рідкій фазі речовини

1. Для випадку плавлення робочої речовини за відсутності розвинутої конвекції в рідкій фазі теплового акумулятора

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

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

2. Для випадку плавлення робочої речовини за наявності розвинутої конвекції в рідкій фазі теплового акумулятора

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

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

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

3. Для випадку затвердіння робочої речовини за відсутності розвинутої конвекції в рідкій фазі теплового акумулятора

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

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

4. Для випадку затвердіння робочої речовини при наявності розвинутої конвекції в рідкій фазі теплового акумулятора

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

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

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

У співвідношеннях (1)–(10) c_i, ρ_i, λ_i теплоємність, щільність і теплопровідність рідкої й твердої фаз робочого агента, де індекс 1 відповідає рідкій фазі, а індекс 2 – твердої фазі робочої речовини; τ – час; $q_{РЕА}$ – кількість теплоти, що виділяється елементом РЕА в одиницю часу та припадає на одиницю площі торцевої грані ємності з тепловим акумулятором; α_{cp} – коефіцієнт тепловіддачі в навколишнє середовище $T_{об}$ – середньомасова температура металеві оболонки пристрою (теплом, що йде на нагрівання або охолодження елемента РЕА, внаслідок його малої величини в порівнянні з теплом, що акумулюється робочою речовиною, нехтуємо або враховуємо в сумарній теплоємності металеві оболонки; таке припущення дає можливість прийняти за температуру елемента РЕА значення $T_{об}$); T_{cp} – температура навколишнього середовища; r – теплота плавлення робочої речовини; R – товщина шару робочої речовини; ξ – границя розділу фаз; $\alpha_{об}, \alpha_{кр}$ – коефіцієнти тепловіддачі від оболонки до рідини та від поверхні розділу фаз до рідини, відповідно; T_1 – середня температура рідкої фази; τ_0, ξ_0 – час і товщина розплаву, за яких починається інтенсивний рух конвективних струмів і поле температур по рідкій фазі практично зникає; T_{2R}, T_{2R0} – температури в будь-який момент часу τ та за $\tau = \tau_0$ відповідно, ξ_0 – товщина розплаву за $\tau = \tau_0$; τ_0 – час, за який починає спостерігатися лінійна зміна температури T_{2R} від часу; n – параметр, що визначається експериментально [4]; $q_{ТЕБ}$ – кількість теплоти, що виділяється в одиницю часу ТЕБ та приходить на одиницю площі торцевої грані ємності з тепловим акумулятором.

Розрахунки ТЕБ здійснено на основі стандартної методики з використанням пакета прикладних програм Thermoelectric system calculation (виробник ВАТ «Кріотерм», м. Санкт-Петербург) [8]. На основі аналізу значень $q_{ТЕБ}$, еквівалентних величині холодопродуктивності ТЕБ визначено геометричні розміри термоелементів, які входять до складу ТЕБ, величина електричного струму живлення, споживана електрична енергія.

Результати чисельного експерименту системи охолодження елементів РЕА, що працюють у режимі повторно-короткочасних тепловиділень.

Результати чисельного експерименту за розробленого моделлю охолоджувального пристрою наведено на рис.3 – 10. Розглянуто залежності зміни температури оболонки від часу

при плавленні речовини, а також координати границі розділу фаз від часу за різних потужностей розсіювання елемента РЕА (рис.3 – 4), різних наповнювачів (рис.6 – 7), тривалості повного плавлення робочої речовини від потужності тепловиділень елемента РЕА (рис. 8). На рис 5 наведено для порівняння зміну в часі температури оболонки за використання речовини, що плавиться, і застосування природнього повітряного охолодження. Аналогічні дані для режиму охолодження наведено на рис.11 – 16.

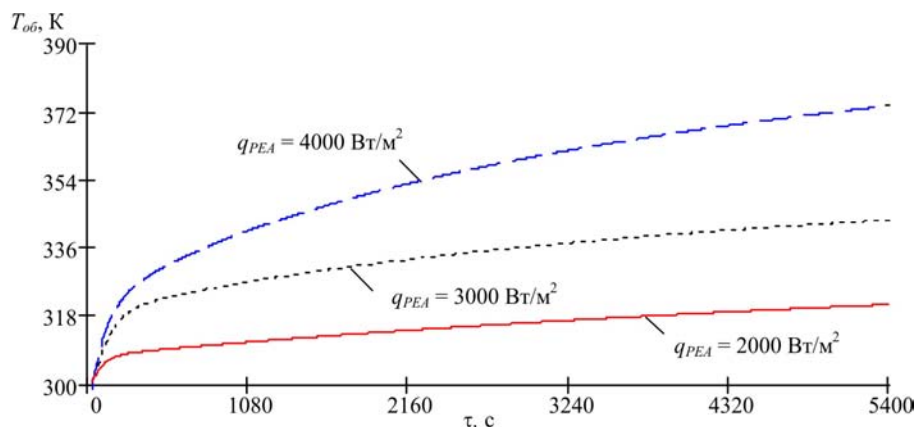


Рис.3. Залежність температури оболонки від часу під час плавлення речовини (речовина – парафін) без конвекції в рідкій фазі, $(c\rho\delta)_{об} = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ $R = 0.03 \text{ м}$.

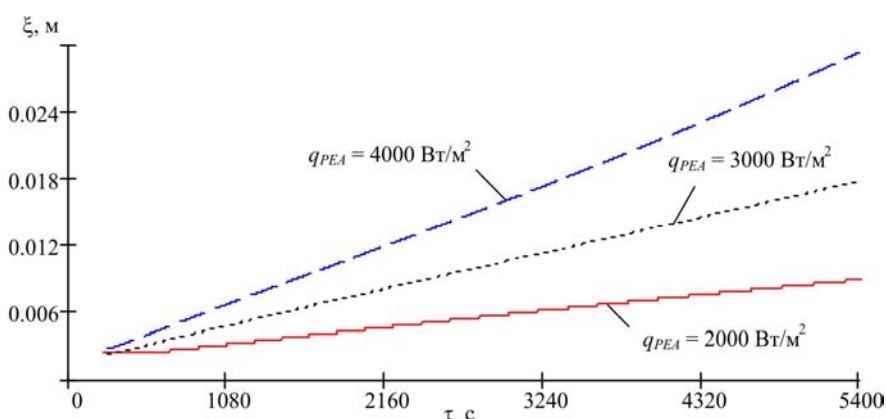


Рис.4. Залежність координати розділу фаз від часу під час плавлення речовини (речовина – парафін) без конвекції в рідкій фазі, $(c\rho\delta)_{об} = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $R = 0.03 \text{ м}$.

Розрахунки зроблено за таких вихідних даних: робочі речовини – парафін ($\rho_1 = 760 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\rho_2 = 780 \text{ кг}/\text{м}^3$, $c_1 = 2680 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$, $c_2 = 2350 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$, $\lambda = 0.27 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$, $r = 156 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг}$, $T_{кр} = 316 \text{ К}$), елаїдінова кислота ($\rho_1 = 850 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\rho_2 = 860 \text{ кг}/\text{м}^3$, $c_1 = 2180 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$, $c_2 = 1550 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$, $\lambda = 0.16 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$, $r = 214 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг}$, $T_{кр} = 318 \text{ К}$), азотнокислий нікель ($\rho_1 = 1980 \text{ кг}/\text{м}^3$, $\rho_2 = 2050 \text{ кг}/\text{м}^3$, $c_1 = 2140 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$, $c_2 = 1800 \text{ Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$, $\lambda = 0.56 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$, $r = 155 \cdot 10^3 \text{ Дж}/\text{кг}$, $T_{кр} = 329.7 \text{ К}$), $T_{ср} = 293 \text{ К}$, $\alpha_{порівн} = 10 \text{ Вт}/\text{К} \cdot \text{м}^2$ (за винятком випадків, коли значення $\alpha_{порівн}$ зазначене безпосередньо в підрисунковому написі на графіках), $\xi_0 = 0.001 \text{ м}$; $\tau_0 = 20 \text{ з}$, $\alpha_{про} = 20 \text{ Вт}/\text{К} \cdot \text{м}^2$, $\alpha_{рк} = 20 \text{ Вт}/\text{К} \cdot \text{м}^2$.

Розрахункові залежності показують, що температура оболонки та тривалість плавлення робочої речовини залежить від величини теплового навантаження на охолоджувальний

пристрій (значення q_{PEA}), типу робочої речовини, а також умов теплообміну з навколишнім середовищем. У випадку відсутності конвективних потоків у рідкій фазі процес теплообміну є нестационарним процесом теплопровідності і температура оболонки пристрою увесь час зростає. Швидкість її росту залежить від теплоти, що підводиться до неї (величини q_{PEA}), товщини шару та теплопровідності речовини.

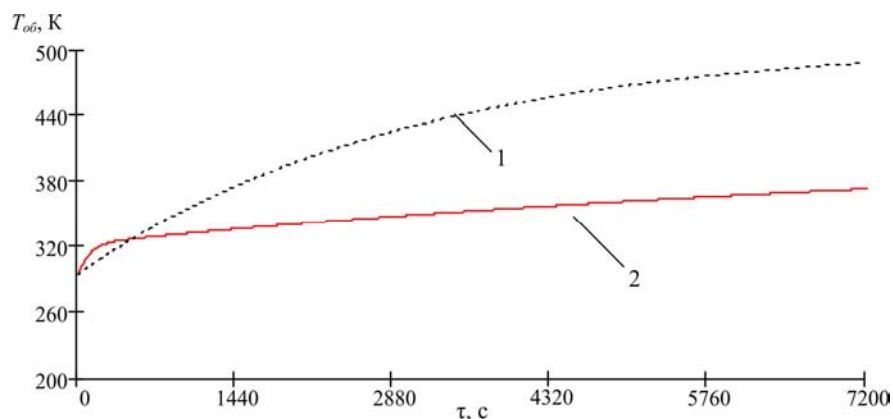


Рис.5. Залежність температури оболонки від часу під час плавлення речовини (речовина – парафін) без конвекції в рідкій фазі $(c\rho\delta)_{об} = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $R = 0.03 \text{ м}$, $q_{PEA} = 2000 \text{ Вт}/\text{м}^2$, 1 – використано природне повітряне охолодження із $\alpha_{сп} = 5 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$, 2 – використано систему охолодження із робочою речовиною – азотнокислим нікелем.

Згідно із графіками, зображеними на рис. 3 – 4, збільшення значення q_{PEA} значно підвищує температуру оболонки і елемента РЕА, а також швидкість плавлення речовини (наприклад, після 1.5 години роботи елемента РЕА зі зміною його потужності розсіювання з 2000 до 4000 Вт/м² температура оболонки підвищується з 320 до 372 К, а швидкість плавлення збільшується з $1.48 \cdot 10^{-6}$ м/с до $5.5 \cdot 10^{-6}$ м/с). Підвищення температури оболонки пристрою пов'язане, у тому числі, із збільшенням теплового опору рідкої фази робочої речовини, який зростає зі збільшенням розплавленого шару. Це підтверджує необхідність вживання заходів по зменшенню шару рідкої фази речовини між елементом РЕА та границею розділу фаз.

Також на температуру елемента РЕА в процесі його функціонування буде впливати вибір відповідного робочого наповнювача. Було зроблено розрахунки для випадку використання як такого азотнокислого нікелю, парафіну та елаїдинової кислоти (рис. 6 – 7).

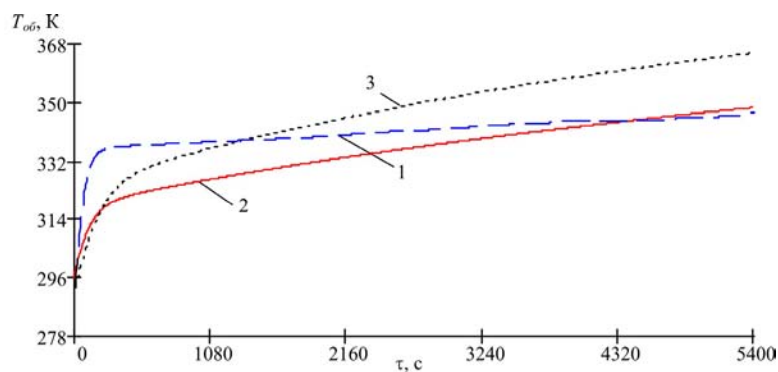


Рис.6. Залежність температури оболонки від часу під час плавлення різних теплових акумуляторів без конвекції в рідкій фазі, $(c\rho\delta)_{об} = 2.5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $R = 0.03 \text{ м}$, $q_{PEA} = 3500 \text{ Вт}/\text{м}^2$. 1 – азотнокислий нікель, 2 – парафін, 3 – елаїдинова кислота.

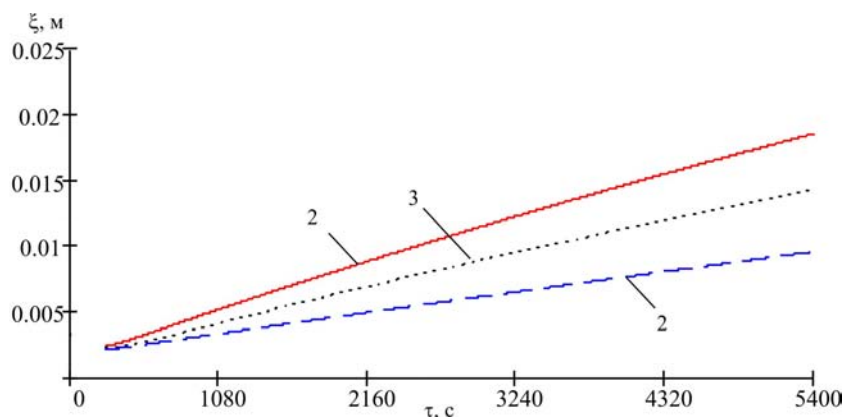


Рис.7. Залежність координати розділу фаз від часу під час плавлення різних теплових акумуляторів без конвекції в рідкій фазі, $(c\rho\delta)_{об} = 2.5 \cdot 10^3$ Дж/(м²·К), $R = 0.03$ м, $q_{РЕА} = 3500$ Вт/м². 1 – азотнокислий нікель, 2 – парафін, 3 – елаїдінова кислота.

Як показали результати досліджень, для даних умов кращі результати отримано за використання як наповнювача азотнокислого нікелю. Згідно із залежностями, зображеними на рис.б, для випадку застосування як робочої речовини азотнокислого нікелю температура оболонки пристрою є найбільш стабільною, а швидкість плавлення найменшою. Це пов'язано насамперед з його більш високою теплопровідністю, яка майже вдвічі більша, ніж у парафіну та втричі більша, ніж в елаїдіновій кислоті. Таким чином, зниження швидкості зростання температури (тобто її стабілізації) можна досягти за рахунок збільшення ефективної теплопровідності речовини. Одним з методів збільшення ефективної теплопровідності речовини є застосування різних наповнювачів. Наприклад, можуть бути використані металева крихта, різного роду оребрення, стільникові конструкції, або пористі структури.

На рис. 8 наведено графіки залежності тривалості повного плавлення різних наповнювачів від величини потужності розсіювання елементу РЕА, що відповідає тривалості його стабільної роботи. Тут найбільшу тривалість плавлення в діапазоні потужностей від 1000 до 5000 Вт/м² має азотнокислий нікель, що пояснюється його більш високою температурою й тепловою плавлення, а також величиною коефіцієнта теплопровідності.

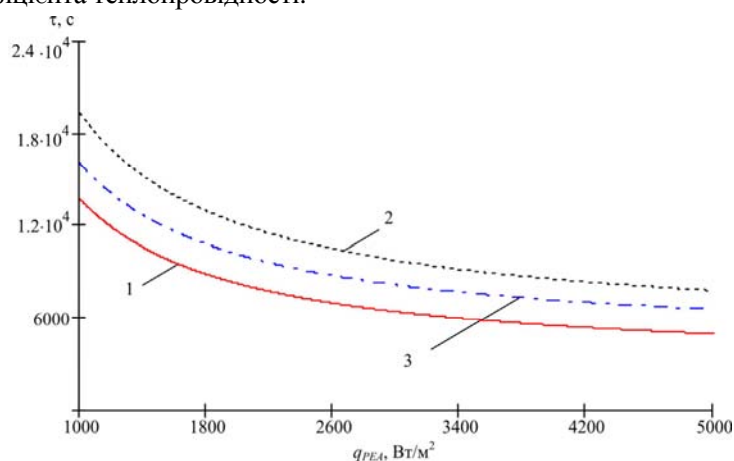


Рис.8. Залежність часу повного плавлення різних теплових акумуляторів від потужності тепловиділення елементу РЕА, що припадає на одиницю площі без конвекції в рідкій фазі, $(c\rho\delta)_{об} = 2.5 \cdot 10^3$ Дж/(м²·К); $R = 0.03$ м. 1 – парафін, 2 – азотнокислий нікель, 3 – елаїдінова кислота.

На процес плавлення речовини впливає наявність конвективних потоків у його рідкій

фазі. Цей випадок відповідає розміщенню елемента на нижній торцевій поверхні контейнера з робочою речовиною й підведенню теплоти знизу відносно теплового акумулятора. Згідно з рис. 9 – 10 для парафіну вплив конвективних потоків починає суттєво позначатися через 19 – 20 хв. після початку процесу плавлення, що відповідає товщині розплаву 0.009 – 0.01 м. Починаючи із зазначеного моменту, для розвитої конвекції в рідкій фазі речовини процес плавлення інтенсифікується. Відповідно збільшується швидкість переміщення границі розділу фаз, а ріст температури оболонки охолоджувального пристрою сповільнюється. Як впливає із даних графіків на рис. 9, через 1.5 г. після початку процесу плавлення температура оболонки пристрою за наявності конвекції в рідкій фазі теплового акумулятора буде на 12 К меншою, ніж у випадку відсутності конвективних потоків. Разом з тим, згідно із залежностями, показаними на рис. 10, тривалість повного проплавлення робочої речовини за наявності конвекції в рідкій фазі робочого агента трохи нижча, ніж за її відсутності. За зазначених умов тривалість повного проплавлення речовини в першому випадку становить 78 хв., а в другому – 90 хв. Вказану обставину слід враховувати при проектуванні системи тепловідведення в напрямку збільшення кількості теплового акумулятора в ємності при розміщенні елемента РЕА на її нижній торцевій поверхні.

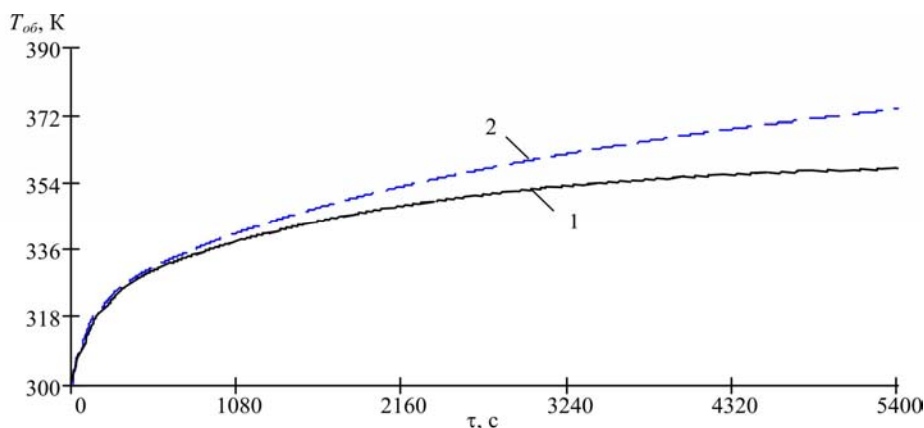


Рис. 9. Залежності температури оболонки від часу під час плавлення речовини (речовина – парафін) за наявності (1) та відсутності (2) конвекції в рідкій фазі, $(c\rho\delta)_{об} = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $R = 0.025 \text{ м}$, $q_{РЕА} = 4000 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

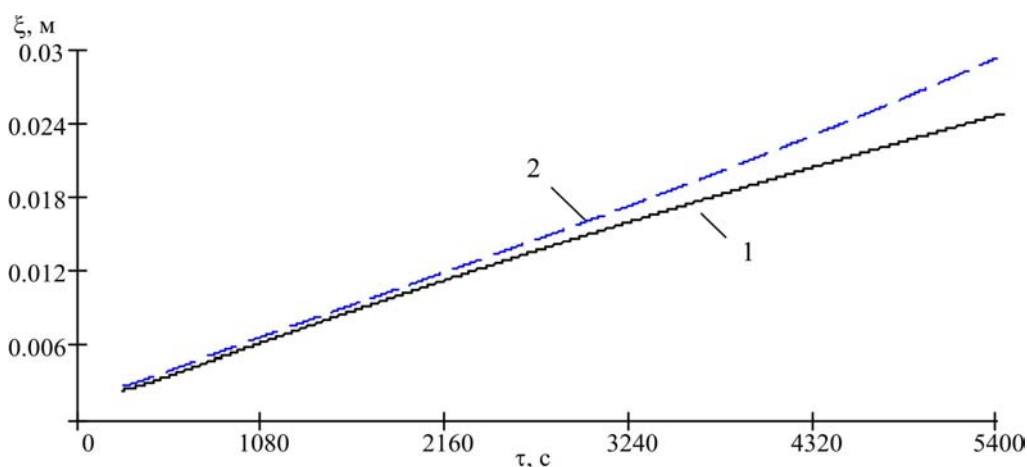


Рис.10. Залежність координати розділу фаз від часу під час плавлення речовини (речовина – парафін) за наявності (1) та відсутності (2) конвекції в рідкій фазі, $(c\rho\delta)_{об} = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $R = 0.025 \text{ м}$, $q_{РЕА} = 4000 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

На рис. 11 – 15 показані залежності температури оболонки зі сторони контакту з ТЕБ і границі розділу фаз із затвердінням наповнювача для різних величин холодопродуктивності ТЕБ, а також для умов, коли процес охолодження й затвердіння речовини відбувається за рахунок природнього теплообміну з навколишнім середовищем. Як видно із графіків, час остигання робочої речовини й оболонки пристрою при використанні ТЕБ у кілька разів менший від їх часу остигання при природньому теплообміні з навколишнім середовищем (для парафіну це відношення за $q_{ТЕБ} = 2000 \text{ Вт/м}^2$ і $\alpha_{порівн} = 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$ склало 2 рази). Звідси випливає, що існуючі обмеження відносно часу циклу роботи елемента РЕА та часу перерви між його включеннями, з використанням ТЕБ знижуються. Таким чином, якщо у випадку природнього теплообміну оболонки охолоджувального пристрою з навколишнім середовищем період роботи елемента РЕА повинен був би бути значно меншим «паузи», то з використанням ТЕБ час між двома послідовними циклами роботи РЕА може бути значною мірою зменшеним. При цьому швидше всього процес охолодження й затвердіння речовини відбувається з використанням як наповнювача парафіну та азотнокислого нікелю (з рис. 14 – 15, де дослідження робилися для парафіну, азотнокислого нікелю, пальмітинової та елаїдинової кислот). Першого – за рахунок найменшої температури й теплоти плавлення, другого – за рахунок більш високого коефіцієнта теплопровідності.

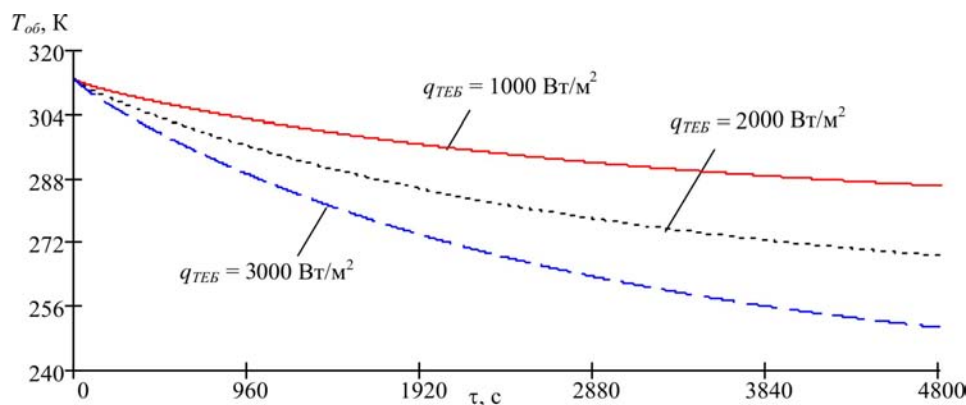


Рис.11. Залежність температури оболонки від часу із затвердінням речовини (речовина – парафін) $(ср\delta)_{об} = 6.5 \cdot 10^3 \text{ Дж/(м}^2 \cdot \text{К)}$; $R = 0.025 \text{ м}$.

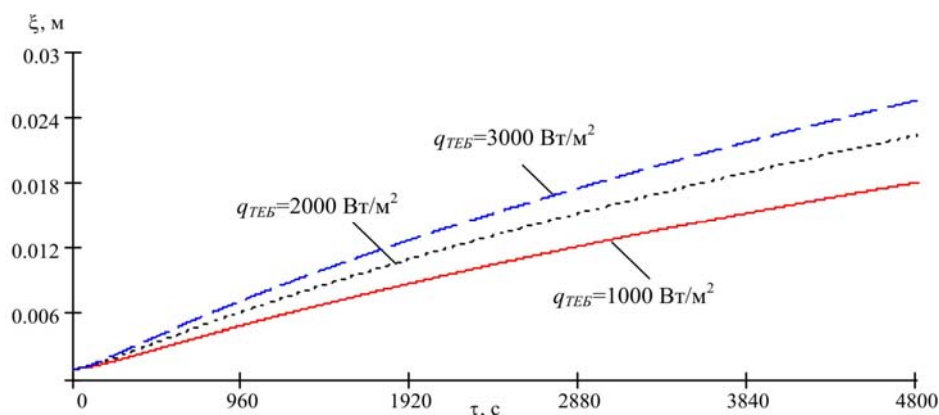


Рис.12. Залежність координати розділу фаз від часу із затвердінням речовини (речовина – парафін) $(ср\delta)_{об} = 6.5 \cdot 10^3 \text{ Дж/(м}^2 \cdot \text{К)}$; $R = 0.025 \text{ м}$.

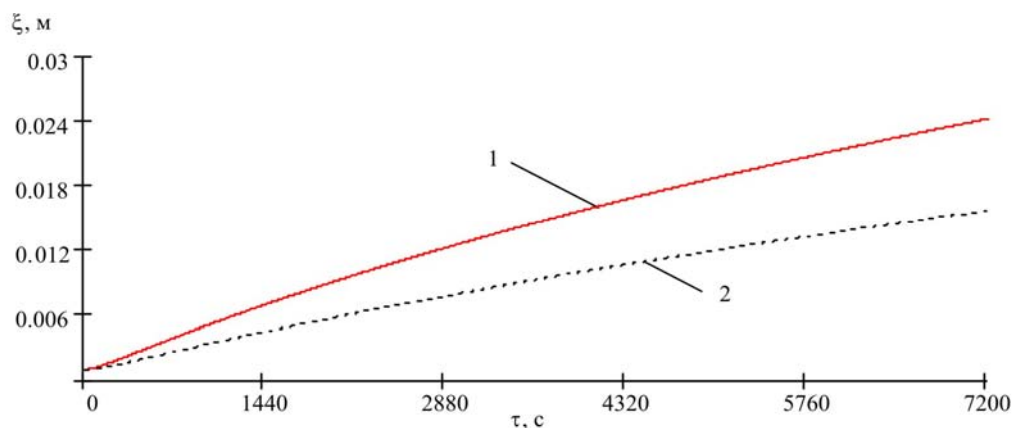


Рис.13. Залежність координати розділу фаз від часу із затвердінням речовини (речовина – парафін) $(c\rho\delta)_{об} = 6.5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $R = 0.025 \text{ м}$.
 1 – з використанням ТЕБ із $2000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ 2 – з використанням природного повітряного охолодження за рахунок теплообміну із оточуючим середовищем ($\alpha_{ср} = 10 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$).

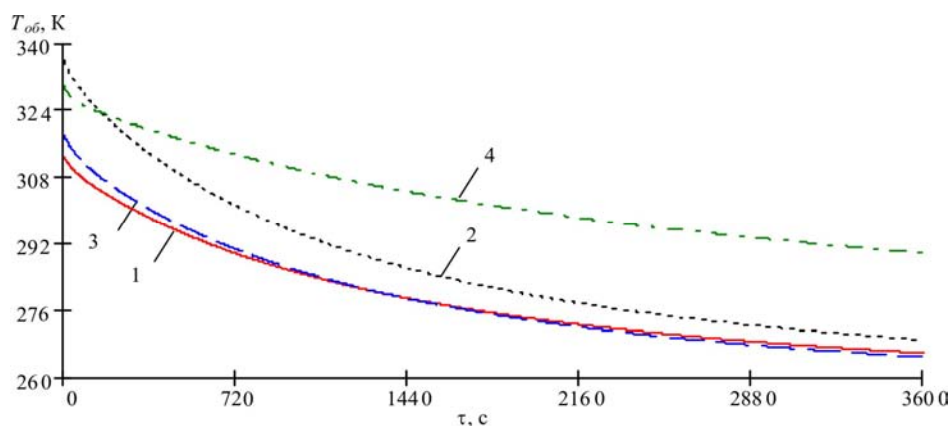


Рис.14. Залежність температури оболонки від часу із затвердінням різних наповнювачів $(c\rho\delta)_{об} = 2.1 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $R = 0.02 \text{ м}$, $q_{ТЕБ} = 1500 \text{ Вт}/\text{м}^2$. 1 – парафін, 2 – пальмітінова кислота, 3 – елаїдінова кислота, 4 – азотнокислий нікель.

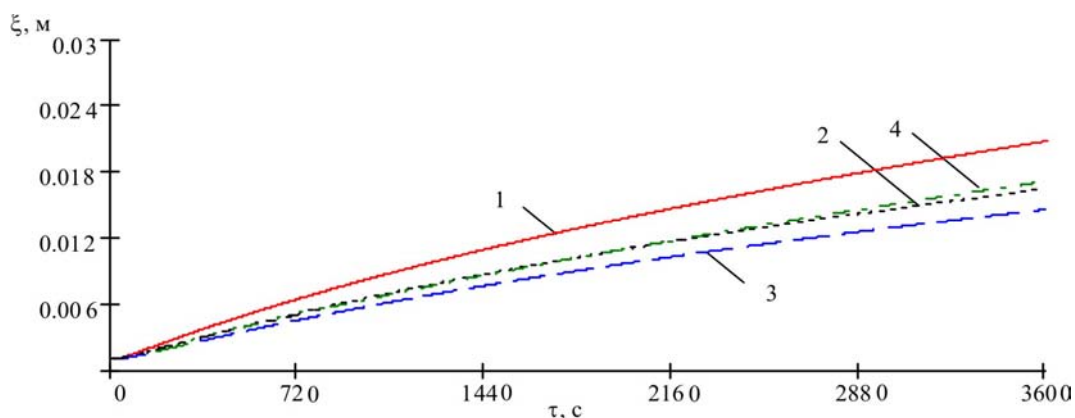


Рис.15. Залежності координати розділу фаз від часу із затвердінням різних наповнювачів $(c\rho\delta)_{об} = 2.1 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $R = 0.02 \text{ м}$, $q_{ТЕБ} = 1500 \text{ Вт}/\text{м}^2$. 1 – парафін, 2 – пальмітінова кислота, 3 – елаїдінова кислота, 4 – азотнокислий нікель.

Тривалість процесу затвердіння речовини може бути суттєво знижена за використання додаткового тепловідводу від бічної поверхні контейнера з речовиною. Згідно з розрахунковими даними (рис. 16) використання додаткового тепловідводу з $q_{TEB} = 6000 \text{ Вт/м}^2$ при основному $q_{TEB} = 1500 \text{ Вт/м}^2$ дасть можливість знизити час повного затвердіння, наприклад, для парафіну до 1200 с, азотнокислого нікелю до 2000 с, пальмітинової кислоти до 2400 с. При цьому у випадку додаткового тепловідводу від бічної поверхні, коли значення величин товщини, довжини і ширини відсіків із наповнювачами, що плавляться, співставні, безпосередні розрахунки за виразами (1) – (5) (6) – (10) не прийнятні. У цьому випадку використовується принцип додавання швидкостей, викладений, наприклад у [9].

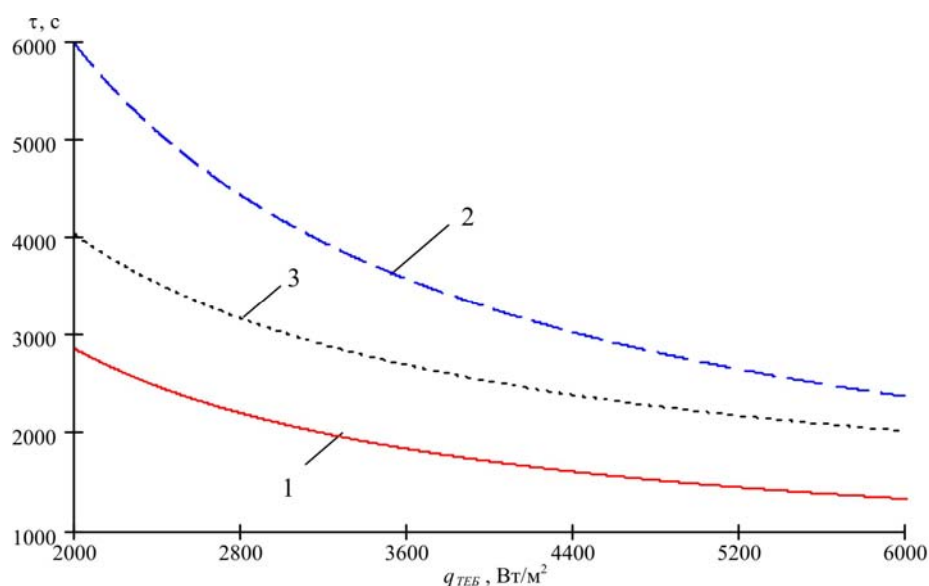


Рис.16. Залежність часу повного затвердіння робочої речовини з використанням додаткового тепловідводу від бокової поверхні ємності, від потужності ТЕБ, що припадає на одиницю площі $(срδ)_{об} = 2.5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $R = 0.02 \text{ м}$.

1 – парафін, 2 – пальмітинова кислота, 3 – азотнокислий нікель.

Згідно цього методу спочатку за допомогою одномірних розв'язків визначається товщина шару робочої речовини й температура оболонки в напрямку осей x , y , z за умови, що швидкості плавлення або затвердіння незалежні одна від одної. Потім розраховується тривалість швидкості плавлення або затвердіння всієї маси речовини в контейнері, виходячи зі співвідношення

$$\frac{1}{\tau_{п}} = \frac{1}{\tau_x} + \frac{1}{\tau_y} + \frac{1}{\tau_z}, \quad (11)$$

де $\tau_{п}$ – тривалість плавлення або затвердіння речовини в контейнері; τ_x, τ_y, τ_z тривалості плавлення або затвердіння в напрямку осей x , y , z за відсутності впливу плавлення або затвердіння відповідно в напрямках y, z ; x, z і x, y .

За відомою величиною $\tau_{п}$ визначається температура оболонки пристрою за допомогою одномірних розв'язків. Оскільки вплив розмірів контейнера на температуру його оболонки є меншим, ніж на товщину розплавленого шару, то отримане значення температури оболонки для одномірного завдання дасть можливість оцінити граничний температурний режим оболонки контейнера, а, отже, й охолоджуваного елемента РЕА.

Висновки.

У результаті проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Одним з ефективних методів відведення теплоти від елементів РЕА, що працюють у режимі з повторно-короткочасними тепловиділеннями, є метод, заснований на застосуванні робочих речовин, що плавляться. Головний недолік такого методу – обмеження, пов'язане з необхідністю забезпечення процесу плавлення протягом усього циклу роботи РЕА.
2. Запропоновано систему охолодження елементів РЕА, що дає можливість розширити тривалість їх циклу роботи за рахунок використання додаткового відводу теплоти від агентів, що плавляться, за допомогою ТЕБ.
3. Розроблено математичну модель системи охолодження, реалізовану шляхом розв'язку завдання Стефана з використанням наближеного методу Л.С. Лейбензона, суть якого полягає в доборі таких функцій зміни температури рідкої й твердої фази, які б задовольняли початковим і граничним умовам. Підібрані в такий спосіб функції підставляються в умови спряження фаз, отримане диференціальне рівняння розв'язується відносно координати розділу фаз.
4. У результаті розв'язку завдання плавлення (затвердіння) речовини отримано залежності зміни температури оболонки охолоджувальної системи, а також координати границі розділу фаз у часі. Зазначені залежності сильно залежать від величини розсіювання теплоти елемента РЕА, типів робочих наповнювачів, холодопродуктивності ТЕБ, умов навколишнього середовища.
5. Установлено, що після 1.5 години роботи елемента РЕА зі зміною його потужності розсіювання з 1000 до 3000 Вт/м² у випадку використання парафіну температура оболонки підвищується з 317 до 367 К, а швидкість плавлення збільшується з 10⁻⁶ м/с до 3.7·10⁻⁶ м/с.
6. На температуру елемента РЕА в процесі його функціонування впливає добір відповідного робочого наповнювача. Кращими речовинами для цього будуть ті, які за всіх інших умов (температура плавлення, теплота плавлення, теплоємність і т.п.) також мають високі значення коефіцієнта теплопровідності.
7. Одним із методів підвищення ефективного коефіцієнта теплопровідності може бути застосування в робочій речовині різних типів наповнювачів (металевої крихти, різних оребрень, пористих структур).
8. З розміщенням елемента РЕА на нижній торцевій поверхні контейнера з робочою речовиною на процес плавлення істотно впливати буде наявність конвективних потоків у його рідкій фазі. За таких умов температура елемента РЕА буде нижчою, однак разом з тим скоротиться і тривалість повного проплавлення робочої речовини, що необхідно враховувати при проектуванні охолоджувальної системи.
9. У результаті дослідження теплообміну із затвердінням робочих речовин установлено, що використання ТЕБ значно зменшує тривалість затвердіння робочої речовини. Для парафіну за $q_{\text{ТЕБ}} = 2000 \text{ Вт/м}^2$ його величина майже вдвічі менша, ніж у випадку використання природного теплообміну з навколишнім середовищем за $\alpha_{\text{порівн}} = 10 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.
10. Для інтенсифікації процесу охолодження й затвердіння робочих речовин доцільно тепловідведення здійснювати додатковими ТЕБ, розташованими по бічній поверхні контейнера з робочим агентом.
11. У випадку додаткового тепловідведення з бічної поверхні, коли значення величин товщини, довжини й ширини відскіків з наповнювачами, що плавляться, порівняння із

безпосередніми розрахунками за виразами (1) – (5), (6) – (10) не прийнятно. У цьому випадку використовується принцип додавання швидкостей відповідно до виразу (11).

Література

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.

Надійшла до редакції 10.07.2015.