

УДК 629.76

## **Новый тип тепловых аккумуляторов для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов.**

В.А. Алексеев, А.Е. Карабин

### **Аннотация**

Статья посвящена исследованию эффективности использования нового типа тепловых аккумуляторов, получивших название бескорпусных, в которых, в отличие от традиционных, рабочее тело не требует герметизации своего объема при фазовых превращениях из твердого в жидкое состояние и обратно.

### **Ключевые слова**

тепловой аккумулятор, формоустойчивый композиционный фазопереходный материал, плавкий наполнитель.

### **Введение**

Настоящая работа посвящена исследованию эффективности использования в космической технике нового типа тепловых аккумуляторов (ТА), получившего названия бескорпусного ТА. В бескорпусных ТА, в отличие от традиционных, рабочее тело – композиционный формоустойчивый фазопереходный теплоаккумулирующий материал (ФПМ), не требующий герметизации своего объема при фазовых превращениях из твердого в жидкое состояние и обратно, что делает его весьма перспективным для внедрения в системы охлаждения и термостатирования радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космических аппаратов (КА).

Поэтому проведение работ, направленных на создание и отработку бескорпусных ТА с формоустойчивым ФПМ, является весьма актуальной, так как позволяет снизить массу устройств с ФПМ в 1,5÷2 раза по сравнению с ТА, размещаемых в герметичных корпусах.

### Теплоаккумулирующий материал

Наиболее перспективными формоустойчивыми теплоаккумулирующими рабочими телами оказались материалы, состоящие из фазопереходного наполнителя и полимерного связующего, обеспечивающего сохранение формы композиционного материала. В качестве плавких наполнителей выбраны парафин и полиэтилен, а полимерным связующим, играющим роль загустителя плавкого наполнителя, стали эластомеры. Эластомеры имеют длинные спиралеобразно скрученные молекулярные цепи. Наличие активных групп по длине цепи позволяет проводить пространственную сшивку молекул, создавая эластичную пространственную сеть, в ячейках которой располагается плавкий наполнитель [1].

При работе теплоаккумулирующих ФПМ реализуются два основных механизма поглощения тепла: затраты тепла на фазовый переход плавление – затвердевание и на процесс нагревания – охлаждения материала, т.е. теплоемкостный.

В качестве рабочего тела для обеспечения теплового режима РЭА здесь опробован композиционный теплоаккумулирующий материал на основе парафина марки П-2: В-ТАМ-50 ТУ 1-595-53-592, разработанный ФГУП ВИАМ. В качестве полимерной основы использован этиленпропиленовый каучук с вулканизирующей группой. Роль плавящегося вещества играет парафин.

Теплофизические свойства В-ТАМ-50:

- скрытая теплота фазового перехода,  $r = 117$  КДж/кг;
- температура фазового перехода,  $T_{кр} = 53$  °С;
- плотность,  $\rho = 900$  кг/м<sup>3</sup>;
- удельная теплоемкость и теплопроводность в зависимости от температуры представлены в таблице 1

Таблица 1. Удельная теплоемкость и теплопроводность материала в зависимости от температуры

T, °С	-60	0	25	50	100
$\lambda$ , Вт/м·К	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3
$C_p$ , КДж/кг·К	0,5	1,4	1,7	2,1	3,6

## Результаты теоретических и экспериментальных исследований бескорпусных ТА

Эффективность применения ТА с формоустойчивым ФПМ покажем на конкретном примере.

На рис.1 изображен общий вид мощного ИЭ, установленного на ТА. Тепловой контакт между ИЭ и ТА осуществляется с помощью теплопроводного компаунда 137-182 ТУ6-02-1-405-86.

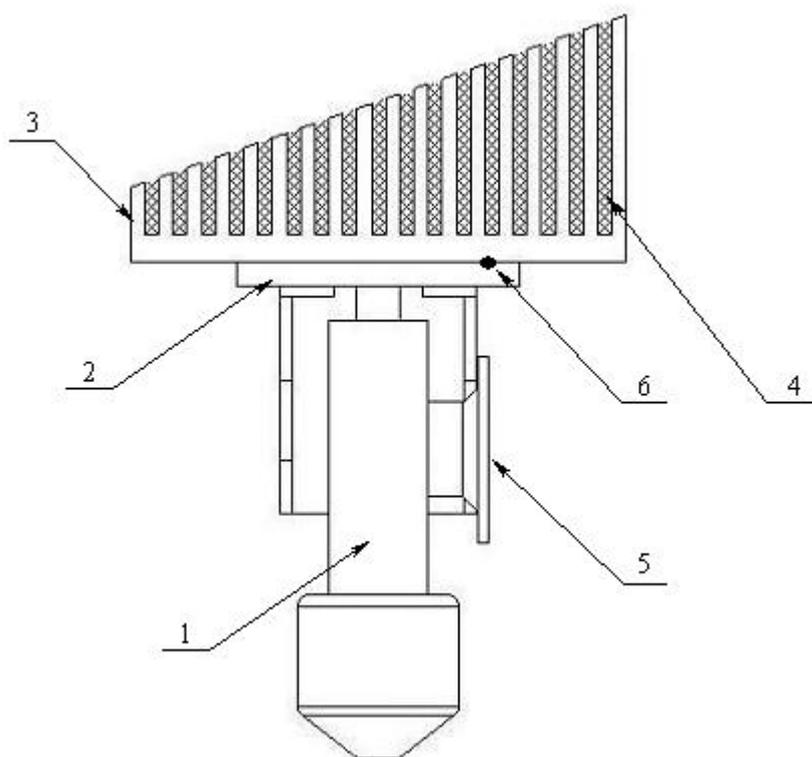


Рис.1 Общий вид источника энергии (ИЭ), установленного на ТА с ФПМ:

1 – ИЭ, 2 – теплоотвод ИЭ, 3 – ТА, 4 – ФПМ, 5 – фланец крепления ИЭ к РЭА, 6 – плоскость контакта ТА с теплоотводом ИЭ, на котором рассеивается мощность.

Мощность ИЭ составляет до 400 Вт. ТА представляет собой оребренный радиатор из алюминиевого сплава для увеличения поверхности теплообмена между ФПМ и металлической частью конструкции, полости между ребрами заполнены теплоаккумулирующим материалом В-ТАМ-50 ТУ1-595-53-592-200 с температурой плавления  $(52 \div 55) ^\circ\text{C}$ . ИЭ работает сеансами до  $(10 \div 12)$  минут с последующей длительной

паузой. Температура на охлаждаемом теплоотводе ИЭ не должна превышать 90 °С. Обычно для такого типа ИЭ используют активные воздушные или жидкостные системы охлаждения (здесь плотность теплового потока достигает  $q = 5 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ ). В данном случае из-за конструктивных соображений было выгодно применить пассивную теплоаккумулирующую систему с использованием скрытой теплоты фазового перехода, теплоемкости ФПМ и массы конструкции радиатора. В общем виде ТА с формоустойчивым ФПМ, не требующие герметизации объема плавящегося или затвердевающего рабочего тела, описаны в изобретении [2].

На рис.2 представлены результаты тепловых испытаний такого ИЭ с оребренным радиатором, в полостях между ребрами которого удалось разместить 0,19 кг формоустойчивого ФПМ.

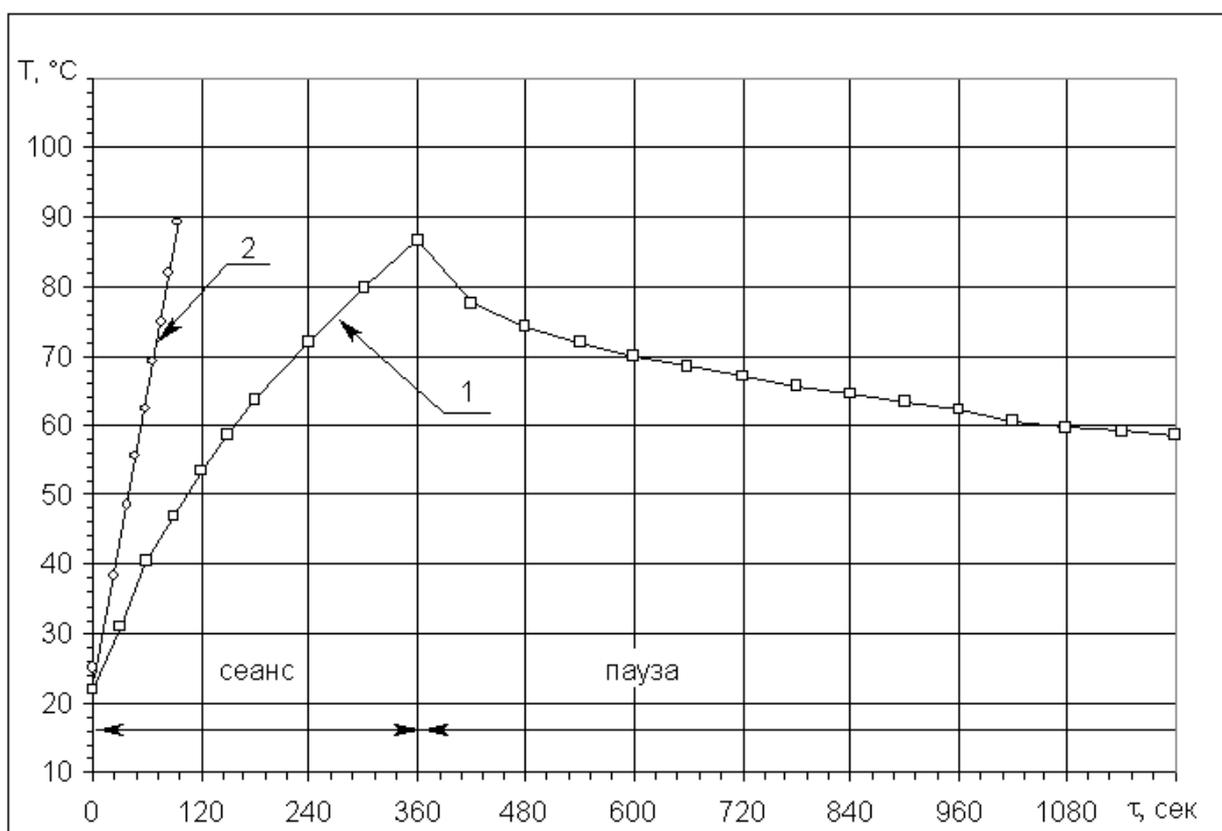


Рис.1 Эффективность использования ТА с формоустойчивым ФПМ по сравнению с типовым оребренным радиатором: 1 – ТА; 2 – радиатор без ФПМ.

Как видно из рис.2, температура ИЭ достигла допустимой через 6 минут. Это показало, что эффект от использования такого ТА очевиден, но количество массы ФПМ следует увеличить. Возникла задача по определению потребной массы ФПМ, размеров

полостей между ребрами, температур ИЭ и ТА в зависимости от времени и других параметров, в том числе в составе РЭА, что и стало предметом настоящих исследований.

В книге [3] и других более поздних публикациях автора разработаны инженерные методы расчета теплового режима ТА, однако применимость их к расчетам теплового режима ТА с формоустойчивым ФПМ, не проверялась. Поэтому для простоты здесь делается попытка использования одного из методов расчета ТА – интегрального приближенного метода расчета процессов плавления и затвердевания с определением координаты подвижной границы раздела фаз [3] и другого более грубого исследованного в настоящей работе метода расчета, который условно можно назвать энтальпийным или теплоемкостным. В последнем учитывается суммарная массовая теплоемкость всего ТА, как единого изотермического тела, в котором масса ФПМ и конструкция металлической части ТА при определенных условиях может иметь практически одинаковую температуру.

Такое допущение для тепловой модели ТА вытекает из наших экспериментов и результатов исследований теплофизических свойств некоторых формоустойчивых ФПМ [4]. Они проводились на тонких пластинах (до 10 мм) методом скоростного измерения комплекса теплофизических свойств при монотонном нагреве образцов. Из-за низкой теплопроводности ФПМ и колебаний состава материалов образцов по их объему непосредственно из экспериментов трудно было определить значения теплоемкостей и скрытой теплоты фазового перехода. Их значения определяли пересчетом из полученных значений суммарного эндотермического эффекта пластины.

Учитывая эти явления и конструктивное построение ТА, у которых толщина слоя ФПМ между ближайшими металлическими поверхностями с высокой теплопроводностью (например, ребрами или сотами из алюминиевых сплавов) обычно не превышают (2 ÷ 4) мм, пришли к выводу, что расхождение в температурах по объему ТА можно пренебречь. Это допущение лучше выполняется при малых плотностях теплового потока от ИЭ, отнесенных к суммарной поверхности контакта соприкосновения объема ФПМ с металлической частью конструкции ТА (до 3000 ÷ 5000) Вт/м<sup>2</sup>.

Тогда уравнение сохранения энергии для ТА, как единого изотермического тела, представляется в виде:

$$[\tilde{N}_Y(\dot{O}_{\text{ФПМ}}) \dot{I}_{\text{ФПМ}} + \tilde{N}_E \dot{I}_E] \frac{d\dot{O}_{\text{ТА}}}{d\tau} = \dot{E}_{\text{ТА}} - \sigma_{\text{ТА-Н}}(\dot{O}_{\text{ТА}} - \dot{O}_{\text{Н}}), \quad (1)$$

где:  $C_{\text{Э}}(T_{\text{ФПМ}})$  - удельная массовая теплоемкость ФПМ в объеме ТА, полученная из суммарного эндотермического эффекта в выбранном диапазоне температур, Дж/кг·К;

$T_{\text{ФПМ}}$  - средняя массовая температура ФПМ, К(°С);

$M_{\text{ФПМ}}$  - масса ФПМ, кг;

$C_K M_K$  - удельная теплоемкость и масса металлической части конструкции ТА, соприкасающаяся с ФПМ, Дж/кг·К, кг;

$T_{\text{ТА}}$  - средняя массовая температура ТА;

$T_C$  - температура окружающей среды, К(°С);

$\tau$  - время, с;

$P_{\text{ТА}}$  - количество теплоты, подводимое ИЭ непосредственно к ТА, Вт;

$\sigma_{\text{ОА-Н}}$  - суммарная тепловая проводимость между ТА и окружающей средой, Вт/К;

Если известны величины скрытой теплоты фазового перехода и удельных теплоемкостей твердой и жидкой фаз, тогда в том же уравнении (1) вместо приведенного выражения в скобках используется:

$$[(\tilde{N}_{\text{O}} + \frac{r}{\Delta\text{O}_{\text{ED}}} + \tilde{N}_{\text{E}}) \dot{\text{O}}_{\text{O}} + \tilde{N}_{\text{E}} \dot{\text{O}}_{\text{E}}], \quad (2)$$

где:  $C_T, C_J$  - удельные теплоемкости твердой и жидкой фаз;

$r$  - скрытая теплота плавления, Дж/кг;

$\Delta\text{O}_{\text{ED}}$  - заданная величина перепада температур в слое ФПМ в окрестности температур фазового перехода.

Для расчета теплового режима РЭА, в состав которой входит ТА с формоустойчивым ФПМ, использовалась типовая математическая модель в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. В этой системе использованы уравнения теплового баланса изотермических тел для составных частей конструкции РЭА, в том числе и ИЭ с ТА, записываемых в виде (1) или (2). Система тел, не содержащая ТА, представлена в виде:

$$\tilde{N}_i \dot{\text{O}}_i \frac{d\text{O}_i}{d\tau} = \text{D}_i + \alpha_{in} (\text{O}_n - \text{O}_i) + \sum_{n=1, n \neq i}^n \alpha_{ij} (\text{O}_j - \text{O}_i), \quad (3)$$

где:  $C_i M_i$  - удельная теплоемкость и масса изотермических тел;

$i$  - номер тела;

$n$  - количество тел;

$\sigma_{ic}$  – тепловая проводимость между телом  $i$  и окружающей средой;

$\sigma_{ij}$  – полные тепловые проводимости между телами  $i$  и  $j$ .

При этом уравнение теплового баланса для ТА может быть представлено в виде (1) или (2), в баланс которого входит мощность, рассеиваемая ИЭ, или ИЭ представляется отдельным телом, взаимодействующим с ТА.

На рис.3 представлено сравнение результатов эксперимента и расчета теплового режима ИЭ и ТА с учетом их теплового взаимодействия с остальной частью РЭА. Во время сеанса ИЭ с ТА находились в климатической камере при температуре  $40^{\circ}\text{C}$ , в паузе – вне камеры при температуре окружающей среды  $22^{\circ}\text{C}$ .

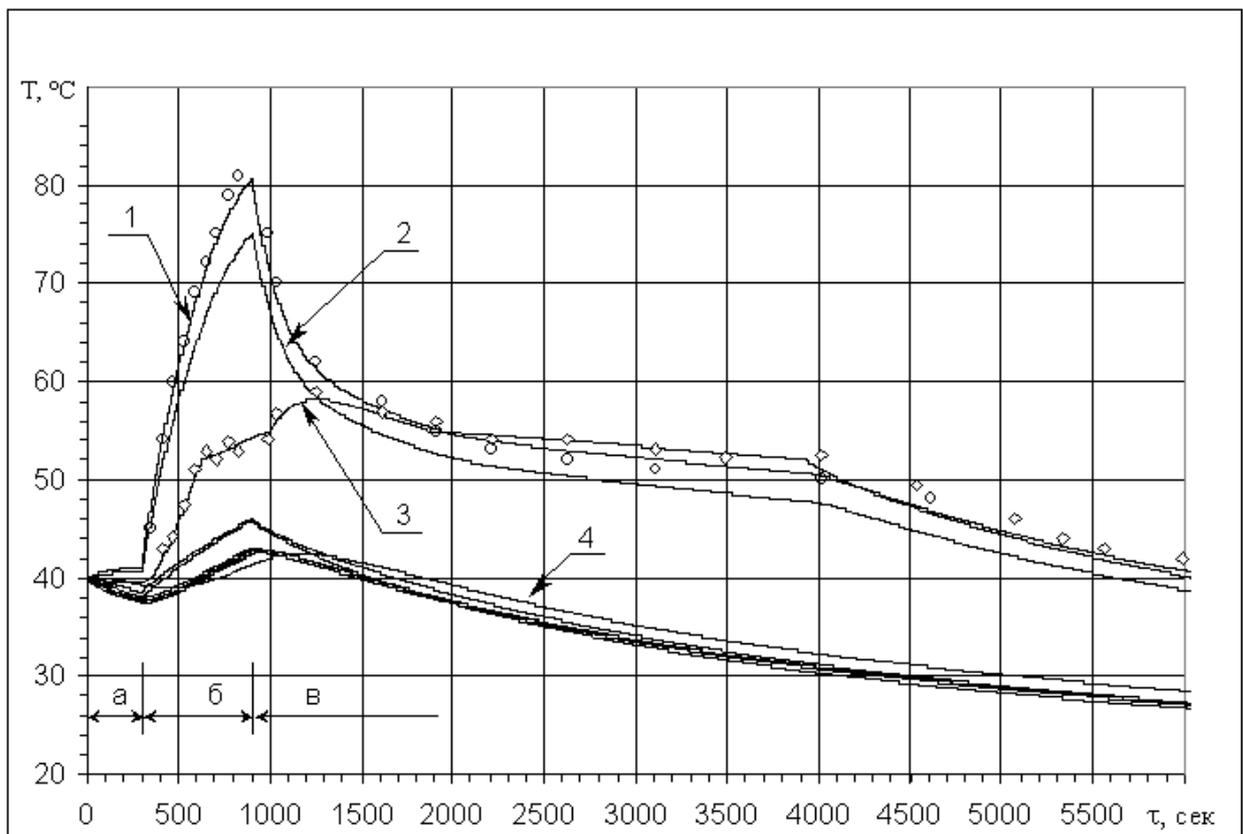


Рис.3 Сравнение результатов теплового режима ИЭ и ТА, работающего в сеансном режиме в составе контейнера РЭА:

○ – экспериментальные значения температуры ИЭ; ◇ – ТА;

1, 2, 3, 4 – расчетные температуры по теплоемкостному методу, соответственно ИЭ, кронштейна крепления ТА к контейнеру РЭА, корпуса ТА и остальных частей конструкции.

а – длительность разогрева ИЭ (при 20 Вт); б – сеанс 300 Вт на ИЭ, 400 Вт – на остальной части РЭА; в – пауза.

Здесь мощность, рассеиваемая ИЭ в сеансе, составляла 300 Вт, в перерыве между ними 20 Вт. Мощность остальной части РЭА в сеансе 400 Вт. Из рис.3 видно, что экспериментальные значения температур ИЭ и ТА, на котором было установлено 6 термопар по его объему с целью определения неравномерности температурного поля, совпадают с необходимой точностью для проведения инженерных расчетов. Здесь только следует обратить внимание, что заметная разница в температурах ИЭ и ТА обусловлена большим сопротивлением теплового контакта и высоким значением плотности теплового потока между ними. Однако поставленная задача была выполнена. При этом потребовалось увеличить массу ФПМ до 0,4 кг вместо располагаемой ранее 0,19 кг. И еще одна особенность, заключающаяся в том, что время затвердевания и охлаждения ТА в паузе между сеансами может быть значительным, что необходимо учитывать в инженерной практике.

Учитывая эти обстоятельства, были проведены дополнительные исследования ТА при плотностях подводимых тепловых потоков, характерных для этого способа аккумулирования энергии. По видимому, их значения следует ограничить величинами до  $(3 \div 5) 10^3 \text{ Вт/м}^2$ . Они проводились на ТА ребристого типа.

На рис.4 представлены результаты экспериментов и расчетов ТА для мощности 48 Вт, что соответствует плотности теплового потока около  $300 \text{ Вт/м}^2$ . Из него видно, что предпочтительнее проводить расчеты по интегральному методу [3], однако и теплоемкостный метод на этапе проектных расчетов вполне применим на практике, когда необходимо определять требуемое количество ФПМ и время перерыва между повторными сеансами.

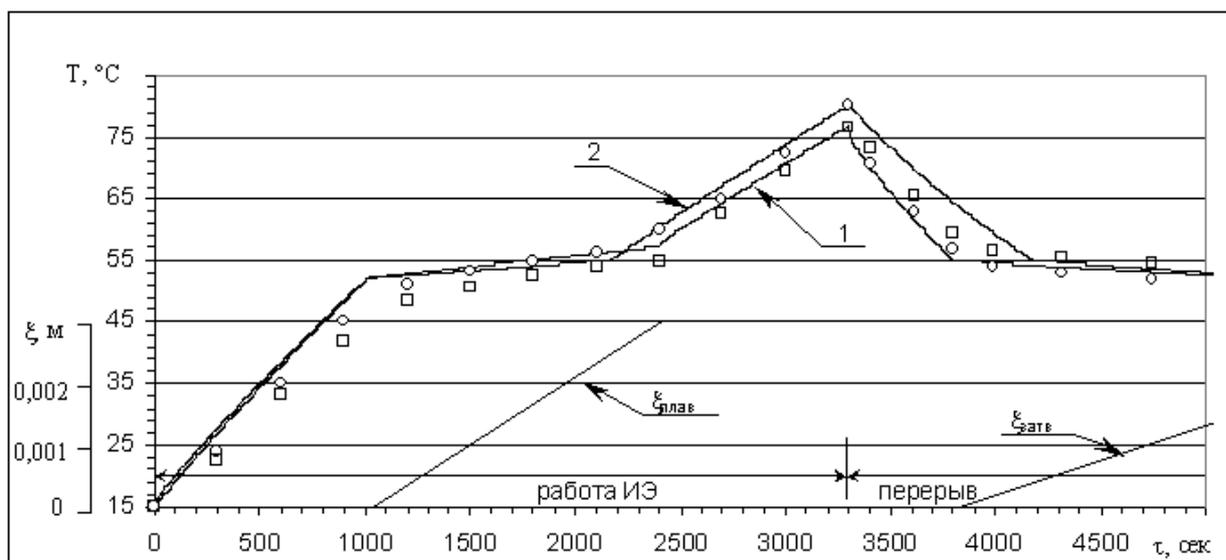


Рис. 4 Сравнение интегрального и энтальпийного методов расчета ТА ребристого типа  
( $P = 48 \text{ Вт}$ ):

1 – интегральный метод [3], 2 – теплоемкостный метод;

□, ○ – экспериментальные значения температур внутри ФПМ.

толщина полости между ребрами – 0,006 м; площадь контакта ФПМ с ребрами – 0,164 м<sup>2</sup>.

Сравнение результатов расчетов применительно к В-ТАМ-50 по интегральному и представленному здесь теплоемкостному методу расчета с приведенными эквивалентными параметрами показали хорошее совпадение между собой, что позволило получить расчетным путем основные характеристики, необходимые для конструирования ТА.

На рис.5 представлена зависимость допустимой толщины слоя ФПМ от величины тепловой нагрузки, равной отношению мощности, подводимой к ТА, к площади контакта между ФПМ и металлической частью конструкции ТА, для различных предельных температур на корпусе ТА.

Здесь  $R_{\text{доп}}$  - половина толщины слоя ФПМ, ограниченного двумя соседними ребрами (для сотовых конструкций – половина расстояния между противоположными стенками гофра).

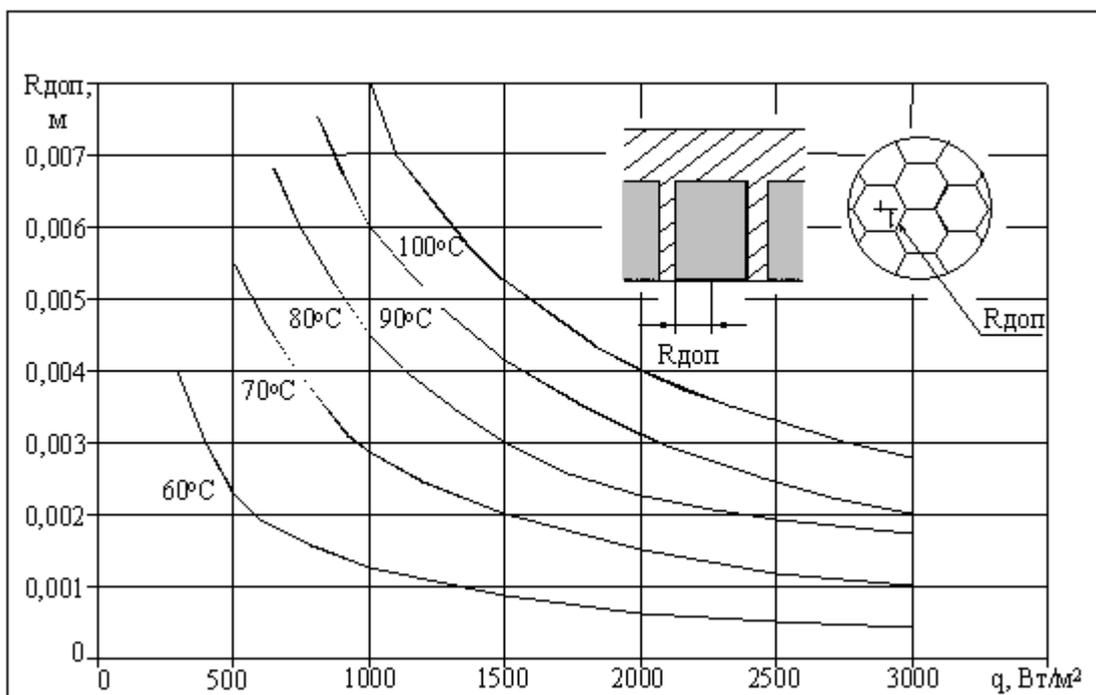


Рис. 5 Изменение толщины слоя ФПМ от величины тепловой нагрузки для различных допустимых температур (ФПМ-В-ТАМ-50).

Используя эту зависимость при заданной мощности, подводимой к ТА, можно определить шаг между ребрами и их высоту, а для сотовых конструкций – конфигурацию и высоту гофр, полости между которыми заполняются ФПМ.

Расчеты по представленной методике также показали, что весьма важную роль для обеспечения требуемого теплового режима играет надежный тепловой контакт между ИЭ и ТА. При этом необходимо следить, чтобы в перерывах между соседними циклами ТА успел сбросить запасенную тепловую энергию в окружающую среду.

### Выводы

Результаты представленных исследований показывают, что новый тип тепловых аккумуляторов, основанный на использовании композиционных формоустойчивых фазопереходных теплоаккумулирующих материалов, не требующих герметизации занимаемого объема, весьма эффективен и имеет широкие перспективы практического применения в космической технике.

### **Библиографический список**

1. А.А. Донской, М.А. Шашкина. Физико – химия органических фазопереходных материалов. Межотраслевой научно – технический сборник “Технология”, № 3-4, М., 1995 6-13с.
2. В.А. Алексеев, В.Ф. Чукин. Теплоаккумулирующее устройство, Патент РФ № 2306494 от 20.09.2007.
3. В.А. Алексеев. Охлаждение радиоэлектронной аппаратуры с использованием плавящихся веществ. М., Энергия, 1975, 88с.
4. В.А. Петрашев, И.И. Монахова. Экспериментальное исследование теплофизических свойств теплоаккумулирующих материалов типа ТАМ-ИГИ и аналитическое исследование вопросов их применения. Межотраслевой научно – технический сборник “Технология”, № 3-4, М., 1995, 60-66с.

### **Сведения об авторах**

Алексеев Владимир Антонович, начальник лаборатории ,заместитель главного конструктора ОАО “НИИ точных приборов”, профессор, д.т.н.,  
ул. Декабристов, владение 51, Москва, 127490; тел.: 8-499-202-95-27; e-mail.:  
Vladimir.Alekseev@niitp.ru

Карабин Александр Евгеньевич, ведущий инженер ОАО “НИИ точных приборов”, ул.  
Декабристов, владение 51, Москва, 127490; e-mail.: Aleks5000@mail.ru