

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНОВЬ РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

В. Г. Самаркин, Д. В. Данилин

*Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков*

**Аннотация.** В статье рассматривается задача определения теплового поля в неизменном объеме термостатирующего устройства. Предложены физическая и тепловая модели устройства, позволяющие достичь допустимую точность результата расчетов. Получены зависимости, учитывающие явления фазового перехода и химической реакции при расчете передачи тепла. Предусмотрена возможность использования в расчетах экспериментальных данных, предварительно полученных и обработанных авторской программой.

**Ключевые слова:** ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИЙ МАТЕРИАЛ, ЭНДОТЕРМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ, АГРЕГАТНОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ ВЕЩЕСТВА, ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЙ ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ, ДЕРИВАТОГРАФ.

Для обеспечения работоспособности электронных плат при воздействии высокой температуры, устройство, кроме жаропрочного корпуса, содержит изоляционный слой [1]. Если слой активный, т. е. состоит из теплоаккумулирующего материала (ТАМ), то с ростом температуры в нем протекают эндотермические явления – фазовые и химические превращения материала ТАМ. Основная задача тепловой оценки состояния такого малогабаритного теплозащищенного модульного объекта (МТМО) заключается в определении температурного поля в слое ТАМ в зависимости от времени, а также в расчете времени достижения поверхностью электронной платы предельно-допустимой температуры.

Если зона фазового перехода имеет толщину  $\delta_\phi$ , то плотность теплового потока  $q_\phi$ , затрачиваемого на фазовое превращение, можно найти из соотношения

$$q_\phi = \frac{Q}{F\tau} = \frac{Q\delta_\phi}{V\tau} = \frac{Q\rho\delta_\phi}{m\tau} = \frac{Q}{m\rho} \frac{\delta_\phi}{\tau}. \quad (1)$$

Рассмотрим движение фронта превращения вещества с известными температурами  $T_\phi$  (температура фазового перехода ТАМ) и  $T_x$  (температура химической реакции ТАМ) в полуограниченной среде. В начальный момент времени имеется исходная фаза ТАМ с постоянной по объему температурой  $T_H$  ( $\tau = 0$ ; свободная поверхность  $Z = d_{КОРП}$ ). На свободной поверхности исходной фазы поддерживается постоянная температура  $T_{C2}$  (температура внутренней поверхности стенки МТМО). Причем,  $T_H < T_{C2}$ , кроме этого,  $T_H < T_\phi < T_x$ . Температура внутренней поверхности стенки МТМО  $T_{C2}$  зависит от окружающей температу-

ры  $T_0$ , условий теплоотдачи корпуса МТМО, излучения газа и внешней поверхности корпуса МТМО.

Тепловой поток, направленный от свободной поверхности к исходной фазе, приводит к ее нагреву. По мере нагрева исходной фазы от температуры  $T_{C2}$  до температуры  $T_\phi$  фазового перехода происходит процесс ее превращения и появляется новая фаза (индекс «н»). С течением времени процесс образования новой фазы захватывает все больший объем исходной фазы, толщина новой фазы увеличивается, граница раздела фаз продвигается в объем исходной фазы. При этом процесс нагрева исходной фазы сопровождается увеличением ее температуры.

Процесс агрегатного превращения исходной фазы в новую фазу схематически показан на рисунке, где:  $T_0$  – температура окружающей среды;  $T_{C1}$  – температура наружной стенки корпуса МТМО;  $T_{C2}$  – температура внутренней стенки корпуса МТМО, она же – температура свободной поверхности исходной фазы;  $T_{II}$  – температура поверхности электронной платы;  $T_\phi$  – температура фазового превращения ТАМ;  $T_X$  – температура химической реакции;  $q_0$  – плотность теплового потока из окружающей среды;  $q_I$  – плотность теплового потока, проходящего через стенку корпуса МТМО;  $q_{II}$  – плотность теплового потока, проходящего через исходную фазу ТАМ;  $q_H$  – плотность теплового потока, проходящего через новую фазу ТАМ;  $q_K$  – плотность теплового потока, проходящего через конечную фазу ТАМ;  $q_\phi$  – плотность теплового потока фазового превращения (образования новой фазы) во фронте ТАМ;  $q_X$  – плотность теплового потока химической реакции во фронте ТАМ.

Плотность теплового потока из фронта превращения  $q_\phi$  может быть выражена через энтальпию фазового перехода  $I$  и массовую скорость образования новой фазы,

$$q_\phi = I\rho \frac{\partial \delta_\phi}{\partial \tau} . \quad (2)$$

Плотность теплового потока из новой фазы через поверхность раздела фаз

$$q_I = q_H = -\lambda_H \frac{\partial T_H}{\partial z} . \quad (3)$$

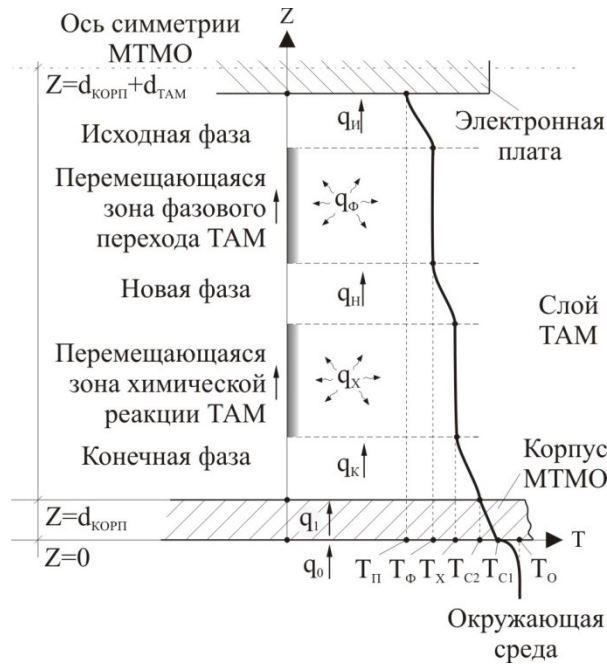


Схема тепловых потоков и температурное поле, характеризующее изменение агрегатного состояния ТАМ в МТМО.

Плотность теплового потока от поверхности раздела в исходную фазу

$$q_H = -\lambda_H \frac{\partial T_H}{\partial z}. \quad (4)$$

Тогда баланс теплоты на поверхности раздела фаз

$$-\lambda_H \frac{\partial T_H}{\partial z} = I\rho \frac{\partial \delta\Phi}{\partial \tau} + \left( -\lambda_H \frac{\partial T_H}{\partial z} \right). \quad (5)$$

Приближенно скорость продвижения поверхности раздела можно найти при некоторых допущениях:

$$\delta\Phi = \kappa_1 \sqrt{\tau}, \quad (6)$$

где коэффициент пропорциональности

$$\kappa_1 = \sqrt{\frac{2\lambda_H}{I\rho} (T_{C2} - T_{\Phi})}. \quad (7)$$

Плотность теплового потока фазового превращения во фронте можно найти из выражения (2), подставив в него зависимость (6)

$$q_{\Phi} = I\rho \frac{\partial}{\partial \tau} \left( \kappa_1 \tau^{\frac{1}{2}} \right) = \frac{I\rho\kappa_1}{2\sqrt{\tau}}. \quad (8)$$

Подставляя в (8) выражение (7), получим

$$q_{\Phi} = \frac{\kappa_2}{\sqrt{\tau}}. \quad (9)$$

где коэффициент пропорциональности

$$\kappa_2 = \sqrt{\frac{I\rho\lambda_H}{\tau} (T_{C2} - T_{\Phi})}. \quad (10)$$

Коэффициенты  $\kappa_1$  и  $\kappa_2$  получены в результате экспериментов при значениях входящих в комплексы (7) и (10) параметров, усредненных в диапазоне рабочих температур  $T = 20 \div 150^\circ\text{C}$  ( $293,15 \div 423,15 \text{ K}$ ), равных

$$I \approx 1.8 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}; \quad \lambda_H \approx 0.43 \frac{\text{Вт}}{\text{м К}}; \quad \rho \approx 1350 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

Баланс тепла

$$a_H \frac{\partial^2 T_H}{\partial z^2} = \frac{\partial T_H}{\partial \tau}, \text{ где} \quad (11)$$

$a_H$  – коэффициент температуропроводности исходной фазы ТАМ.

Решение уравнения (11) можно найти в виде [2]

$$T_H = T_{C2} + C1 * \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{a_H \tau}}\right); \quad (12)$$

$$T_H = T_{KH} + C2 * \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{z}{2\sqrt{a_H \tau}}\right)\right). \quad (13)$$

Используя зависимости (12), (13) в машинном счете, можно пошагово рассчитать температуру в зависимости от координаты и времени.

Наряду с аналитическим методом расчета теплоты химической реакции применим метод дифференциального термического анализа (ДТА) [3]. Для исследования ТАМ различных составов применялся прибор дериватограф Q-1500D. Дериватограмма, содержащая изменение температуры (Т), массы (ТГ), скорости изменения массы (ДТГ) и внутренней энергии (ДТА) обрабатывается авторской программой.

Предлагаемая тепловая модель способствует оптимизации геометрических параметров МТМО, она применима для исследования свойств существующих и разрабатываемых ТАМ, т. к. позволяет автоматизировать расчеты с использованием ЭВМ.

#### Литература

1. Наумов Г.А. Создание активной теплозащиты для ЗМП из титанового сплава. Сборник докладов на II научно-практической конференции «Проблемы и перспективы создания аварийных регистраторов», Курск, 2006.
2. Луканин В.Н. и др. Теплотехника. М.: Высш. шк., 2000. 671 с.
3. Данилин В.Н., Доценко С.П. Физическая химия. ч.2. Краснодар: КубГТУ, 2000. 89 с.