

УДК 621.565.5

Автоматизация поиска параметров аккумуляторов холода

*Хромов Е.С., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Кафедра «Стартовые ракетные комплексы»*

*Научный руководитель: Матвеева О.П., д.т.н., профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана
hromow.evgenij@yandex.ru*

Потребность в теплоотводе от функционирующего наземного оборудования ракетно-космических систем и отдельных элементов оборудования значительна. К тепловыделяющему оборудованию относятся, например, системы управления технологическими процессами и бортовая аппаратура в период подготовки объектов к пуску, системы автономного электроснабжения, холодильные центры и другое оборудование. Разные температурные уровни и мощности тепловыделений, а также условия и периоды их отвода от источников приводят к необходимости разработки различных схем систем обеспечения температурных режимов. Так, при кратковременных режимах теплоотвода от оборудования или при небольших мощностях тепловыделений могут быть использованы аккумуляторы холода (АХ), в которых поглощение тепла осуществляется за счет внутренних эндотермических процессов плавления термоаккумулирующих материалов (ТАМ).

Основные известные типовые схемно-конструктивные решения АХ обобщены и приведены в работах [1,2]. Однако особенностью окончательного выбора схемно-конструктивного решения АХ является необходимость учета конкретных условий его применения и характеристик ТАМ. Это приводит, в свою очередь, к необходимости в проведении предварительного трудоемкого моделирования и расчета параметров АХ, в особенности при отсутствии аналитического решения теплообмена в АХ заданной конфигурации.

Между тем, при решении задач о поиске рациональных параметров АХ можно воспользоваться опытом применения систем автоматического проектирования (САПР). Работа большинства вычислительных комплексов основана на конечно-элементном представлении рассматриваемых конструкций. Рассмотрим возможность создания

компьютерной модели элементарного модуля АХ (в некоторой степени аналога конечного элемента конструкции), с помощью которого возможно дальнейшее проектирование теплоаккумулирующих систем, отвечающих заданным характеристикам.

Математическая модель элементарного модуля АХ

Рассмотрим цилиндр с высотой h и радиусом R , выполненный из ТАМ с теплотой фазового перехода $r_{\text{фп}}$, претерпевающего при температуре $T_{\text{фп}}$ фазовое превращение «твердое тело – жидкость» (рис. 1). Пусть верхний торец его разогрет до температуры T ($T > T_{\text{фп}}$).

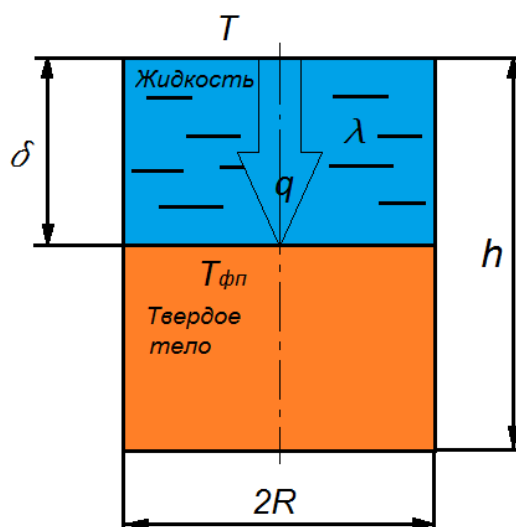


Рис. 1. Цилиндр, выполненный из термоаккумулирующего материала, с постоянной температурой T на верхнем торце

Введем некоторые допущения: теплофизические свойства ТАМ постоянны (в жидкой и твердой фазе, не изменяются с ростом температуры); теплоемкость ТАМ существенно меньше теплоты фазового перехода; тепловые потоки через боковые стенки считаем равными нулю вследствие отсутствия в этом направлении перепада температур. Рассмотрим тепловые потоки, возникающие в цилиндре в процессе оплавления материала. В соответствии с гипотезой Фурье имеем выражение для плотности теплового потока от верхней поверхности цилиндра до границы оплавления материала:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (T - T_{\text{фп}}), \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м·К; δ – толщина оплавленного слоя, м.

Величина оплавленного слоя является функцией времени $\delta = \delta(t)$, поэтому для математического описания оплавления ТАМ в динамике рассмотрим уравнение теплового баланса элементарного объема материала, претерпевающего оплавление (рис. 2):

$$q \cdot dx \cdot dy \cdot dt = \rho \cdot dx \cdot dy \cdot d\delta \cdot r_{\text{фп}}, \quad (2)$$

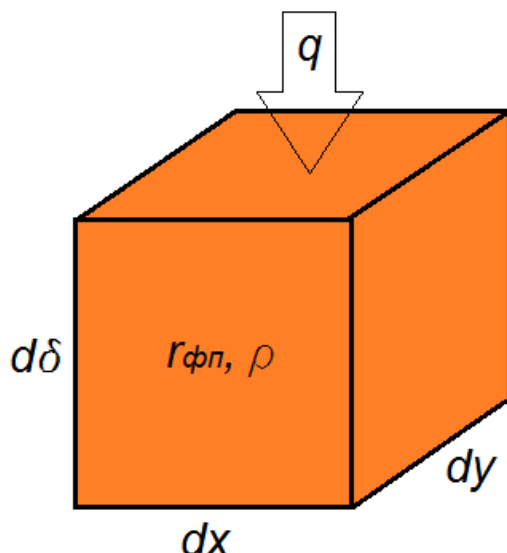


Рис. 2. Элементарный объем материала на границе оплавления

После элементарных преобразований уравнения (2) и подстановки выражения (1) в (2) получим соотношение:

$$\delta d\delta = \frac{\lambda(T - T_{\text{фп}})}{\rho \cdot r_{\text{фп}}} \cdot dt, \quad (3)$$

Интегрируя выражение (3) с начальным условием $\delta(0) = 0$, получим конечное соотношение для толщины оплавившегося слоя:

$$\delta(t) = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda(T - T_{\text{фп}})}{\rho \cdot r_{\text{фп}}} \cdot t}, \quad (4)$$

Подстановка соотношения (4) в уравнение (1) позволяет определить плотность теплового потока в рассматриваемой модели в любой момент времени.

Построенная модель имеет аналитическое решение и дает возможность определить мощность теплопоглощения элементарного модуля АХ. Если ТАМ имеет низкую теплопроводность, то для снижения влияния этого недостатка ТАМ на эффективность АХ может быть увеличена эффективная теплопроводность материала за счет, например, размещения в его слое элементов с высокой теплопроводностью. Такие включения при определенном исполнении могут одновременно выполнять и силовые функции.

Так, например, в качестве высокотеплопроводного включения внутри предыдущего элементарного модуля можно concentрично установить металлическую трубку (рис. 3). Для такого решения рассмотрим еще одну математическую модель – модель элементарного модуля АХ с включением.

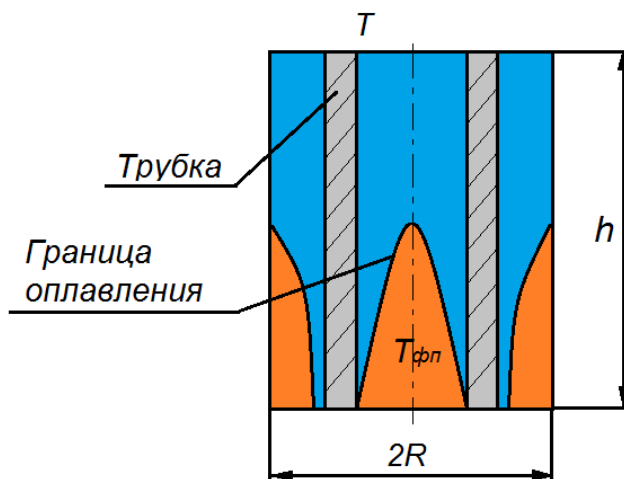


Рис. 3. Модель элементарного модуля АХ с металлической трубкой

Полученный модуль способен воспринимать осевые силовые нагрузки, а высокая теплопроводность материала трубки позволит теплоте более интенсивно распространяться вглубь материала. Аналитическое решение в данном случае не представляется возможным. Решение проведем численными методами в среде программирования Delphi 7 с теми же допущениями, что и в предыдущем случае. На рис. 4 представлена упрощенная блок-схема процесса оплавления ТАМ, а на рис. 5 – блок-схема шага оплавления материала за время dt .

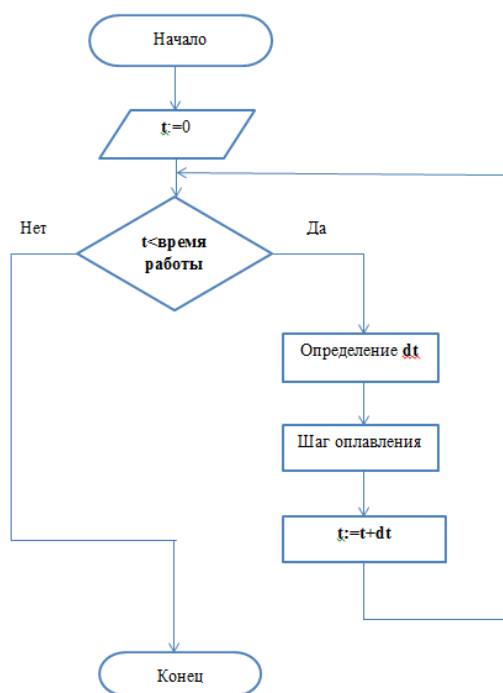


Рис. 4. Процесс оплавления материала

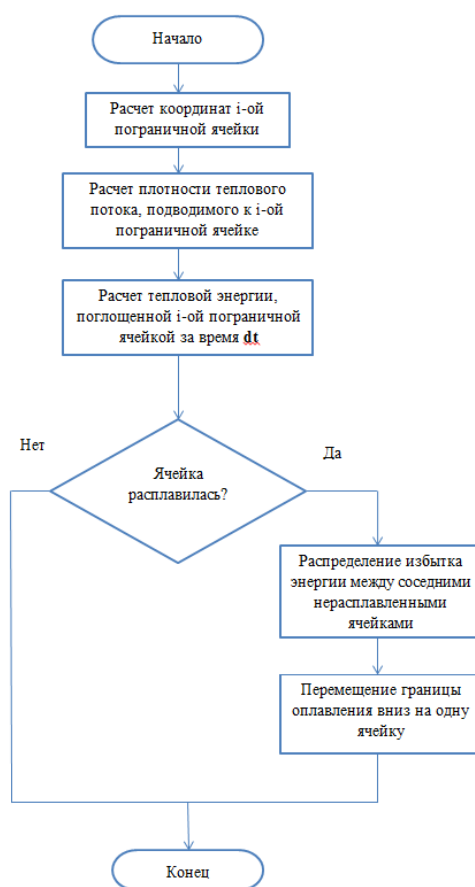


Рис. 5. Блок-схема шага оплавления материала

Особого внимания заслуживает выбор интервала dt . С этой целью на границе оплавления производится поиск элементарной ячейки ТАМ с максимальной подводимой плотностью теплового потока, энергоемкость данной ячейки материала делится на искусственно введенную величину - знаменатель квантования p . Полученное количество энергии расходуется на оплавление рассматриваемой ячейки материала за один шаг оплавления.

На рис. 6 представлен интерфейс программы и результат расчета. В качестве критерия работоспособности элементарного модуля АХ взята суммарная поглощенная энергия за время его работы. На схеме оплавления ТАМ показана правая половина рассматриваемой конструкции. Левая ее часть симметрична правой.

Исходные данные

Температура ХИТ, град С 60	Радиус наполнителя, м 0,1
Температура фазового перехода, град С 36,4	Наружный радиус цилиндра, м 0,06
Удельная теплота фазового перехода, Дж/кг 196000	Внутренний радиус цилиндра, м 0,04
Коэффициент теплопроводности наполнителя, Вт/м*К 0,15	Высота цилиндра, м 0,1
Плотность наполнителя, кг/м^3 760	Частота разбиения, ед 1000
Коэффициент теплопроводности цилиндра, Вт/м*К 16	Время процесса, с 10000
	Знаменатель квантования временного промежутка dt 4

Расчетные данные
Количество поглощенной энергии, Дж

Схема оплавления наполнителя

Внутренний слой Стенка трубки Наружный слой

Рис. 6. Интерфейс программы теплового расчета элементарного модуля АХ и полученные результаты

Таким образом, проблема расчета АХ со сложной конфигурацией поверхностей теплообмена представляется решаемой и может быть автоматизирована. Разработанная программа позволяет осуществить поиск рациональных параметров АХ, составленного из отдельных расчетных модулей. Наличие подобных экспериментально проверенных алгоритмов расчета позволит расширить область применения АХ для поглощения тепловыделений.

Список литературы

1. Сотникова О.А., Турбин В.С., Григорьев В.А. Аккумуляторы теплоты теплогенерирующих установок систем теплоснабжения // АВОК. Некоммерческое Партнерство "Инженеры по отоплению, вентиляции, кондиционированию воздуха, теплоснабжению и строительной теплофизике" (НП "АВОК"). 2003. № 5. Режим доступа: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2121 (дата обращения 27.02.2012).
2. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: справочник / под ред. Г.С. Найвельта. М.: Радио и связь. 1985. 576 с.
3. Вержбицкий В.М. Численные методы (математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения): учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2001. 382 с.:ил.