

УДК 621.354.341

## РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПОДДЕРЖАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА РАБОТЫ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

К. М. Буровский, к.т.н., доцент кафедры ОС и ВТС, РВВДКУ; kburovsky@mail.ru

Е. И. Лагутина, адъюнкт кафедры РРТС и ПС, РВВДКУ; below8585@mail.ru

Д. Н. Стрелков, к.т.н., преподаватель кафедры АТ, РВВДКУ; cobalt4@yandex.ru

*Рассматривается задача обеспечения эксплуатационных характеристик источников питания носимых средств связи в условиях низких температур способом термостатирования.*

**Цели работы.** 1. Обосновать принцип работы устройства для компенсации теплопотерь аккумуляторных батарей в условиях низких температур методом термостатирования с использованием разнородных нагревательных элементов. 2. Разработать математические модели, описывающие процесс поддержания оптимального теплового режима работы аккумуляторной батареи за счет использования химического и электрического нагревательных элементов. 3. Разработать основные представления и допущения к математическим моделям. В качестве химического нагревательного элемента используется перенасыщенный ацетат натрия трехводного  $\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . Электрический нагревательный элемент выполнен на базе позисторов.

**Ключевые слова:** аккумуляторная батарея, термостатирование, электрический нагревательный элемент, теплоаккумулирующий материал, тепловой аккумулятор фазового перехода.

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-56-2-155-162

### Введение

С учетом постоянного развития систем вооружения, все больше увеличивающихся темпов ведения боевых действий, увеличения расстояний между элементами боевого порядка и активного использования диверсионных групп, действующих отдельно от основных сил, сложно себе представить успешное ведение боевых действий без отлаженно функционирующей системы связи и управления, позволяющей оперативно реагировать на изменения тактической обстановки. В данном ключе именно на нее ложатся функции по формированию единой картины «поля боя» на основе информации, получаемой от различных источников, ведение единообразного и непрерывного обмена информацией между субъектами в системе связи, обеспечение планирования боевого применения войск (сил) и оружия в близком к реальному времени. Такие высокие требования к функциональным возможностям системы связи предъявляют дополнительные требования к возможностям и надежности элементов системы связи, которыми являются непосредственно средства связи.

В тактическом звене основу системы связи

составляют радиосредства. И если функциональные возможности средств связи в основном соответствуют предъявляемым к ним требованиям, то надежная работа источников питания радиосредств – аккумуляторной батареи – часто оставляет желать лучшего. Увеличивающаяся функциональность средств связи (например, передача навигационной информации в автоматическом режиме, определение текущих координат и расстояния до цели и т.д.), увеличение расстояния между боевыми порядками и, как следствие, увеличение мощности работы радиосредств на передачу значительно сокращают время работы радиостанции от одного комплекта аккумуляторных батарей. Также немаловажным фактором, влияющим на продолжительность и надежность работы аккумуляторной батареи, является температура окружающей среды. Согласно технической документации, емкость различных аккумуляторных батарей при температуре минус 20 °С составляет всего 30 – 50 % от номинальной (в зависимости от электрохимической системы). Например, свежезаряженная аккумуляторная батарея 10НКГЦ-1Д при вышеуказанной температуре обеспечивает емкость всего 0,5 А·ч [1]. Исходя из этого и с учетом физико-географической характеристики террито-

рии Российской Федерации (большие перепады температур в дневное и ночное время и достаточно низкие температуры на большей части территории; наличие стратегических направлений, ведение боевых действий на которых предпочтительнее в зимнее время вследствие сложного рельефа местности) вопрос снижения негативного температурного влияния на работоспособность источников питания был актуален всегда. Но особенно актуален он стал сейчас, вследствие создания постоянного военного присутствия в Арктическом регионе Российской Федерации.

**Цель работы** – разработка устройства компенсации тепловых потерь аккумуляторных батарей в условиях низких температур, позволяющего обеспечить заданные производителем энергетические характеристики источников питания, с использованием результатов математического моделирования процессов поддержания оптимального теплового режима.

### Теоретические исследования

Одним из основных способов сохранения емкости аккумуляторной батареи в условиях низких температур окружающего воздуха является поддержание оптимального теплового режима работы за счет подогрева. Недостатками традиционных средств подогрева являются большое энергопотребление и необходимость использования системы управления, требующей участия человека.

В предлагаемом устройстве для компенсации тепловых потерь аккумуляторных батарей методом термостатирования с использованием разнородных нагревательных элементов (рисунок 1) эти недостатки сведены к минимуму путем введения химического нагревательного элемента и электрического нагревательного элемента на базе позисторов.

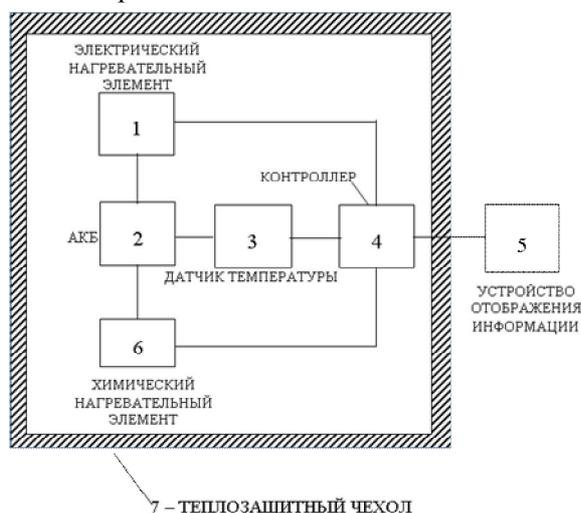


Рисунок 1 – Структурная схема устройства для компенсации тепловых потерь

Аккумуляторная батарея 2 установлена в теплозащитном чехле из маслобензостойких материалов 7. Для компенсации тепловых потерь внутри чехла устанавливается химический 6 и электрический 1 нагревательные элементы соответствующего объема и производительности. Датчик температуры 3 и контроллер 4 установлены на корпусе аккумуляторной батареи. Устройство отображения информации 5 содержит два сигнальных диода: зеленого (индикация режима работы электрического нагревательного элемента) и красного цвета (индикация режима работы химического нагревательного элемента) и находится в удобном для контроля оператором месте. Контроллер связан с химическим 6 и электрическим 1 нагревательными элементами и обеспечивает вступление их в работу, а также с датчиком температуры 3 для выработки алгоритма выбора включения того или иного нагревательного элемента.

При снижении температуры окружающего воздуха, которое вызывает снижение температуры внутри теплозащитного чехла 7 с аккумуляторной батареей 2 до  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , срабатывает датчик температуры 3 и выдает сигнал на контроллер 4, который, в свою очередь, выдает сигнал на химический нагревательный элемент 6 и включает его в работу. Тем самым обеспечивается поддержание температуры внутри теплозащитного чехла 7 выше  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Также контроллер подает сигнал на устройство отображения информации, на котором периодически (1 раз в 5 секунд) начинает загораться зеленый сигнальный светодиод, свидетельствующий о работе химического нагревательного элемента. При прекращении работы химического нагревательного элемента и повторном снижении температуры внутри теплозащитного чехла 7 вновь срабатывает датчик температуры 3 и выдает сигнал на контроллер 4, который на этот раз включает в работу электрический нагревательный элемент 1, обеспечивая поддержание оптимального теплового состояния аккумуляторной батареи. Зеленый сигнальный диод на устройстве отображения информации 5 гаснет, периодически включается красный сигнальный диод (1 раз в 5 секунд), свидетельствуя о работе электрического нагревательного элемента.

Как видно из описания принципа работы устройства, в первую очередь в условиях низких температур окружающего воздуха для поддержания оптимального теплового режима работы аккумулятора в целях сохранения его заряда вводится в работу химический нагревательный элемент. Его децентрализованное расположение через равные промежутки на корпусе позволяет

снизить до минимума неравномерный нагрев корпуса аккумулятора, а, следовательно, и электролита. В предлагаемом устройстве в качестве химического нагревательного элемента используется перенасыщенный ацетат натрия трехводного  $\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  [2] с равновесной температурой фазового перехода  $T_\phi = 331$  К и скрытой теплотой фазового перехода  $r_\tau = 260$  кДж/кг, который стабилен в условиях переохлаждения при введении небольших добавок и может переохлаждаться, по данным [3], до  $T = 263$  К.

Проведенный патентный поиск [4] показал наличие очень небольшого количества патентов с описанием тепловых аккумуляторов фазового перехода (ТАФП), использующих в качестве теплоаккумулирующих материалов (ТАМ) переохлажденные жидкости. Это говорит об отсутствии в данной области апробированных на практике технических решений, позволяющих реализовать управляемый процесс отдачи ранее накопленной теплоты. Отсюда возникает необходимость провести самостоятельное расчетное исследование данного вещества с целью выявления его практической применимости.

За основу для построения математической модели ТАФП взята задача Стефана, представляющая собой задачу о распределении температуры в теле при наличии фазового перехода, а также о местонахождении фаз и скорости движения границы их раздела [5]. Для простоты мы рассмотрим плоскую задачу (когда поверхностью фазового перехода является плоскость). С классической точки зрения она является задачей математической физики и сводится к решению следующих уравнений:

$$\frac{dT_1}{d\tau} = a_1^2 \cdot \frac{d^2 T_1}{dx^2} \quad \text{для } 0 < x < \xi, \quad (1)$$

$$\frac{dT_2}{d\tau} = a_2^2 \cdot \frac{d^2 T_2}{dx^2} \quad \text{для } \xi < x < \infty, \quad (2)$$

с дополнительными условиями

$$T_1 = C_1 = \text{const} < T_\phi \quad \text{при } x = 0, \quad (3)$$

$$T_2 = C = \text{const} > T_\phi \quad \text{при } \tau = 0 \quad (4)$$

и условиями фазового перехода

$$T_1 = T_2 = T_\phi \quad \text{при } x = \xi \quad (5)$$

$$\left( \lambda_1 \frac{dT_1}{dx} \right)_{x=\xi} - \left( \lambda_2 \frac{dT_2}{dx} \right)_{x=\xi} = r_\tau \cdot \rho_1 \cdot \frac{d\xi}{d\tau}, \quad (6)$$

где  $T_1$  – температура твердой фазы, К;  $a_1$  – коэффициент температуропроводности твердой фазы,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $T_2$  – температура жидкой фазы, К;  $a_2$  – коэффициент температуропроводности жидкой

фазы,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $C, C_1$  – значения температур, К;  $\tau$  – время, с;  $T_\phi$  – температура фазового перехода, К;  $x = \xi$  – координата раздела границы фаз, м;  $\lambda_1$  – коэффициент теплопроводности твердой фазы,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $\lambda_2$  – коэффициент теплопроводности жидкой фазы,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;  $r_\tau$  – удельная теплота фазового перехода плавление-кристаллизация,  $\text{Дж}/\text{кг}$ ;  $\rho_1$  – плотность твердой среды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Решением задачи (1 – 6) являются функции

$$T_1 = A_1 + B_1 \cdot \Phi \cdot \frac{x}{2a_1 \sqrt{\tau}}, \quad (7)$$

$$T_2 = A_2 + B_2 \cdot \Phi \cdot \frac{x}{2a_2 \sqrt{\tau}}, \quad (8)$$

где  $A_1, A_2, B_1, B_2$  – постоянные, определяемые по условиям (1 – 4);  $\Phi$  – интеграл ошибок (функция ошибок Гаусса), вычисляемый по формуле

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi. \quad (9)$$

К основным проблемам при решении подобной задачи с указанными краевыми условиями относится то, что границы раздела фаз подвижны и они формируют области для вычисления значений температуры, которые являются переменными, а также то, что положение межфазных границ неизвестно и его необходимо определять в ходе решения задачи. Таким образом, несмотря на достаточно простые краевые условия, точное решение рассмотренной задачи оказалось достаточно сложным.

Количество теплоты, которое аккумулирует ТАФП в результате реакции фазового перехода, определяется выражением

$$q_{\text{акк}}(\tau) = \sum_{j=1}^{j=N} q_{\text{акк}j}(\tau) = U_{\text{акк}}(\tau) \sum_{j=1}^{j=N} f_{\text{ц}j} = U_{\text{акк}}(\tau) \cdot F_{\text{ц}}, \quad (10)$$

где  $q_{\text{акк}}(\tau)$  – количество теплоты, которое аккумулирует  $j$ -я капсула в единицу времени, Вт;  $U_{\text{акк}}(\tau)$  – плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;  $f_{\text{ц}}$  – площадь боковой цилиндрической поверхности  $j$ -й капсулы,  $\text{м}^2$ ;  $F_{\text{ц}}$  – сумма площадей боковых цилиндрических поверхностей всех капсул,  $\text{м}^2$ .

Рассмотрим процесс кристаллизации теплоаккумулирующего материала с учетом уравнения (10) и принятых основных модельных представлений и допущений, а именно:

1) в исходный момент времени  $\tau=0$ , на протяжении периода разряда, теплоаккумулирующий материал ТАФП находится в жидком состоянии, при всем этом его температурные показатели одинаковы по всему объему и численно равны температуре фазового перехода  $T_\phi$ ;

2) в реверсируемых процессах фазового перехода ТАМ плавление-кристаллизация при  $\tau=0$  границы раздела фаз сформированы, темпера-

турное поле ТАМ в возрастающей фазе линейно, а температура исчезающей фазы приравнивается к температуре фазового перехода;

3) теплопроводность ТАМ в продольной направленности считается ничтожно малой и в расчет не принимается;

4) процесс фазового превращения ТАМ считается одномерным. При этом границы раздела фаз неизменны по форме и на каждом временном отрезке представляют собою цилиндрические плоскости, помещенные концентрично относительно стенок корпуса химического нагревательного элемента;

5) потери тепловой энергии от ТАФП в окружающую среду в процессе его разрядки и на нагрев примыкающих к корпусу аккумулятора элементов радиостанции не учитываются;

6) коэффициенты теплоотдачи, теплопередачи, теплопроводности, а также удельные теплотемкости являются постоянными величинами и не зависят от температуры;

7) отклонение расчетов по представленной математической модели от проведенных экспериментальных исследований составляет не более 5 %.

Процесс конвективного теплообмена ТАМ со стенками корпуса химического нагревательного элемента описывается уравнением

$$q_{\text{раз}}(\tau) = a_{\text{к}} \cdot F_{\text{к}} (T_{\text{там}}(\tau) - T_{\text{к}}(\tau)), \quad (11)$$

где  $q_{\text{раз}}(\tau)$  – тепловая мощность, отдаваемая корпусу химического нагревательного элемента, Вт;  $a_{\text{к}}$  – коэффициент теплоотдачи от ТАМ к корпусу химического нагревательного элемента, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F_{\text{к}}$  – площадь соприкосновения ТАМ с внутренней стенкой корпуса химического нагревательного элемента, м<sup>2</sup>;  $T_{\text{там}}(\tau)$  – температура теплоаккумулирующего материала, К;  $T_{\text{к}}(\tau)$  – температура стенки корпуса химического нагревательного элемента, К.

При  $\tau > 0$  справедливы следующие уравнения [5]:

$$q_{\text{раз}}(\tau) = \lambda_{\text{т}}^{\text{тв}} \cdot \frac{T_{\text{ф}} - T_{\text{там}}(\tau)}{z(\tau)} \cdot F_{\text{к}}, \quad (12)$$

$$q_{\text{раз}}(\tau) = \rho_{\text{т}}^{\text{тв}} \cdot r_r \cdot \frac{dz(\tau)}{d(\tau)} \cdot F_{\text{к}}, \quad (13)$$

где  $\lambda_{\text{т}}^{\text{тв}}$  – коэффициент теплопроводности ТАМ в твердой фазе, Вт/(м·К);  $z(\tau)$  – толщина кристаллизовавшегося слоя ТАМ в момент времени  $\tau$ , м;  $\rho_{\text{т}}^{\text{тв}}$  – плотность ТАМ в твердой фазе, кг/м<sup>3</sup>.

Принятое допущение об описании теплового состояния корпуса химического нагревательного элемента по его средней температуре дает возможность не рассчитывать локальные скорост-

ные поля и коэффициенты теплоотдачи в различных точках. Тогда при  $\tau > 0$  справедливо следующее уравнение:

$$q_{\text{раз}}(\tau) = a_{\text{т}} \cdot F_{\text{т}} (T_{\text{там}}(\tau) - T_{\text{к}}(\tau)), \quad (14)$$

где  $a_{\text{т}}$  – коэффициент теплоотдачи от аккумулярующего материала к поверхности теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F_{\text{т}}$  – площадь поверхности теплообмена, м<sup>2</sup>.

Учитывая, что подводимая к корпусу химического нагревательного элемента теплота идет на увеличение его внутренней энергии и на теплотери в корпус батареи, при  $\tau > 0$  имеет место следующее уравнение [5]:

$$q_{\text{раз}}(\tau) = C_{\text{к}} \cdot \frac{dT_{\text{к}}(\tau)}{d\tau} + a_{\text{в}} \cdot F_{\text{в}} (T_{\text{в}}(\tau) - T_0), \quad (15)$$

где  $C_{\text{к}}$  – общая теплоемкость корпуса химического нагревательного элемента, соприкасающегося с корпусом батареи, Дж/К;  $a_{\text{в}}$  – коэффициент теплоотдачи от стенок химического нагревательного элемента к поверхности батареи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F_{\text{в}}$  – площадь поверхности корпуса химического нагревательного элемента, соприкасающегося с корпусом батареи, м<sup>2</sup>;  $T_0$  – начальная температура батареи, К.

Последним уравнением, описывающим процесс функционирования системы ТАФП – корпус аккумулятора при  $\tau > 0$ , является балансовое уравнение:

$$q_{\text{раз}}(\tau) = a_{\text{в}} \cdot C_{\text{к}} \cdot (T_{\text{к}}(\tau) - T_{\text{в}}(\tau)). \quad (16)$$

Таким образом, сведя в единую систему уравнения (11 – 16), мы получим математическую модель функционирования системы разогрева корпуса аккумулятора в период разрядки ТАФП. Неизвестными функциями в ней являются  $q_{\text{раз}}(\tau)$ ,  $z(\tau)$ ,  $T_{\text{к}}(\tau)$ ,  $T_{\text{в}}(\tau)$ ,  $T_{\text{там}}(\tau)$ . Поскольку число неизвестных функций равно числу уравнений, то данная система замкнута. Для её решения в рассматриваемом случае формулируем необходимые начальные и граничные условия:

$$\begin{cases} q_{\text{раз}}(0) = 0 \\ 0 \leq z(\tau) \leq \delta_{\text{т}}; \quad z(0) = 0 \\ T_{\text{к}}(0) \approx T_{\text{ф}} \\ T_{\text{в}}(0) = T_{\text{в}}(0) = T_{\text{там}}(0) = T_0 \end{cases}, \quad (17)$$

где  $\delta_{\text{т}}$  – толщина корпуса батареи, м;  $T_{\text{в}}$  – температура батареи в момент времени  $\tau$ , К.

Путем алгебраических преобразований уравнений (11 – 17) получаем систему, состоящую из двух дифференциальных уравнений:

$$\frac{dz(\tau)}{d\tau} = \frac{E - D \cdot T_{\text{к}}(\tau)}{N \cdot (W + B \cdot z(\tau))}, \quad (18)$$

$$\frac{dT_k(\tau)}{d\tau} = \frac{E - D \cdot T_k(\tau)}{Z + Y \cdot z(\tau)} - I \cdot T_k(\tau) + M, \quad (19)$$

где  $B, W, D, E, I, M, N, Z, Y$  – некоторые константы, рассчитываемые по формулам (20 – 28):

$$B = a_B \cdot a_T \cdot F_B \cdot F_{II}, \quad (20)$$

$$W = (a_T \cdot F_K + a_B \cdot F_B) \cdot \lambda_T^{TB} \cdot F_K, \quad (21)$$

$$D = B \cdot \lambda_T^{TB} \cdot F_K, \quad (22)$$

$$E = D \cdot T_\phi, \quad (23)$$

$$I = \frac{a_B \cdot F_B}{C_B}, \quad (24)$$

$$M = I \cdot T_0, \quad (25)$$

$$N = \rho_T^{TB} \cdot r_r \cdot F_K, \quad (26)$$

$$Z = W \cdot C_B, \quad (27)$$

$$Y = B \cdot C_B, \quad (28)$$

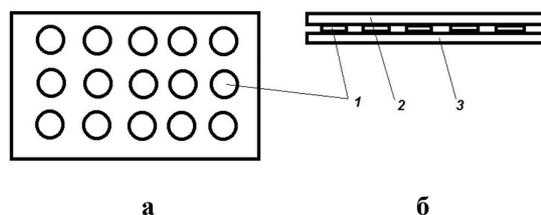
где  $a_B$  – коэффициент температуропроводности батареи,  $m^2/c$ ;  $F_B$  – площадь поверхности батареи, соприкасающейся с химическим нагревательным элементом,  $m^2$ ;  $C_B$  – теплоемкость батареи, Дж/К.

Анализируя систему дифференциальных уравнений, мы приходим к выводу о их нелинейности. Для решения этой системы с начальными и граничными условиями имеет смысл воспользоваться численными методами, к примеру достаточно известным методом Рунге – Кутты четвертого порядка, реализуемым с помощью компьютерной программы Mathcad для Windows [6].

По окончании работы химического нагревательного элемента в целях сохранения нормального теплового режима работы аккумулятора для дальнейшего обеспечения работы средств связи используется резервный электрический нагревательный элемент на основе позисторов. Питание электрического нагревательного элемента осуществляется от аккумулятора или дополнительного источника питания. Устройство электрического нагревательного элемента представлено на рисунке 2.

Электрический нагревательный элемент состоит из верхней 2 и нижней 3 токопроводящих пластин, расположенных параллельно и скрепленных диэлектрическими стяжными винтами (на рисунке 2 не показаны). Между пластинами 2 и 3 децентрализованно расположены и плотно к ним прижаты саморегулируемые нагревательные элементы (позисторы) 1, которые уложены внутри диэлектрической прокладки (на рисунке 2 не показана). Минусовая клемма (-) источника питания подводится к нижней пластине 3 с помощью болта. Плюсовая клемма (+) подводится

от источника питания к верхней пластине 2 с помощью провода через проходной изолятор.



**Рисунок 2 – Устройство электрического нагревательного элемента:  
а – вид сверху; б – вид сбоку**

При подаче напряжения на нижнюю 3 и верхнюю 2 пластины электрический ток проходит через позисторы 1, вследствие чего они нагреваются до «температуры переключения». При этом резко возрастает их электрическое сопротивление, потребление тока падает до минимума, тепловой поток от нижней пластины 3 к разогреваемому корпусу аккумулятора и далее к электролиту уменьшается. При снижении температуры пластины 3 вследствие теплопотерь и теплопередачи к корпусу аккумулятора температура на нагревательных элементах 1 становится ниже точки переключения, генерирование тепла возрастает. Это и обуславливает эффект саморегулирования. При этом каждый позистор 1 реагирует на изменение температуры корпуса в своей зоне размещения и выполняет одновременно роль датчика температуры, регулятора и нагревательного элемента.

Достоинством устройства будет являться то, что запрограммированная в структуре полупроводникового нагревательного компонента вычисленная для каждого вида нагревателя «точка переключения» (точка Кюри для позистора, после которой происходит скачкообразное повышение его сопротивления), предотвращает излишнее повышение температуры электролита и перегрев корпуса аккумуляторной батареи, тем самым не допуская его проплавления.

В соответствии с теорией теплообмена [5, 7 – 9] рассмотрим нестационарный процесс поддержания оптимального теплового режима аккумулятора с помощью электрического нагревательного элемента. Схема для расчета процесса теплообмена представлена на рисунке 3.

Уравнение теплового баланса в общей форме относительно ничтожно малого по продолжительности отрезка времени имеет вид:

$$dQ = dQ_{II} + dQ_{ky} + dQ_a + dQ_{ap} + dQ_B, \quad (29)$$

где  $dQ$  – общее количество теплоты, выделяемое позисторами, Дж;  $dQ_{II}$  – общее количество теплоты, идущей на нагрев позисторов, Дж;  $dQ_{ky}$  –

количество теплоты, идущей на нагрев корпуса устройства, Дж;  $dQ_a$  – количество теплоты, идущей на нагрев аккумулятора, Дж;  $dQ_{ap}$  – теплотопотери от аккумулятора к корпусу радиостанции, Дж;  $dQ_b$  – теплотопотери в воздух внутри теплоизолирующего корпуса, Дж.

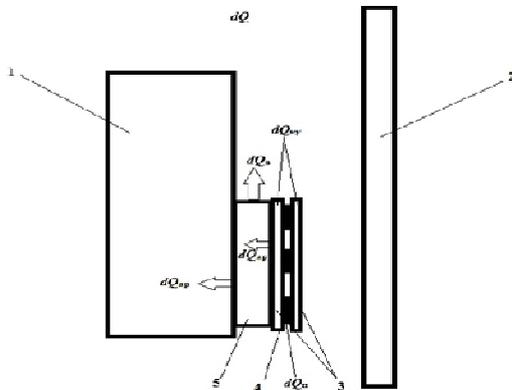


Рисунок 3 – Схема для расчета процесса теплообмена:

- 1 – радиостанция; 2 – теплоизолирующий чехол;  
3 – корпус нагревательного элемента;  
4 – позисторы; 5 – аккумуляторная батарея

Количество теплоты  $dQ$ , выработанной за ничтожно малый временной отрезок, обуславливается мощностью устройства нагрева  $P_{yc}$  и длительностью интервала времени нагрева  $d\tau$ :

$$dQ = P_{yc} d\tau, \quad (30)$$

или, с учетом изменяющейся в зависимости от температуры  $T_1$  мощности позистора,

$$dQ = P_{yc}(T_1) d\tau. \quad (31)$$

При подаче питания от источника электропитания на позисторы, ток, проходящий через них, вызывает их нагрев, в результате чего происходит передача тепла от позисторов на поверхность корпуса электрического нагревательного элемента (на верхнюю и нижнюю токопроводящие пластины). С учетом этих процессов уравнение теплового баланса принимает вид:

$$P_{yc} d\tau = c_1 m_1 dT_1 + \alpha_1 (T_1 - T_2) F_1 d\tau, \quad (32)$$

где  $c_1$  – удельная теплоемкость позисторов, Дж/кг·К;  $m_1$  – суммарная масса позисторов, кг;  $dT_1$  – приращение температуры позисторов, К;  $\alpha_1$  – коэффициент теплоотдачи от позисторов к корпусу нагревательного элемента, Вт/(м·К);  $T_1$  – температура теплоотдающей поверхности позисторов, К;  $T_2$  – температура корпуса электрического нагревательного элемента, К;  $F_1$  – суммарная площадь теплоотдающей поверхности позисторов, м<sup>2</sup>.

Тепло, выделяемое в результате разогрева корпуса электрического нагревательного эле-

мента, идет на нагрев корпуса аккумулятора. При этом происходят потери тепла от корпуса аккумулятора в воздух и к стенкам теплоизолирующего корпуса. Уравнение теплового баланса для корпуса аккумулятора в дифференциальной форме будет выглядеть следующим образом:

$$\alpha_1 (T_1 - T_2) F_1 d\tau = c_2 m_2 dT_2 + \alpha_2 (T_2 - T_3) F_2 d\tau + \alpha_3 (T_2 - T_{3cp}) F_3 d\tau, \quad (33)$$

где  $c_2$  – удельная теплоемкость аккумулятора, Дж/кг·К;  $m_2$  – масса аккумулятора, кг;  $dT_2$  – приращение температуры электрического нагревательного элемента, К;  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от аккумулятора к корпусу радиостанции, Вт/(м·К);  $T_3$  – температура корпуса радиостанции, К;  $F_2$  – площадь поверхности теплоотдачи аккумулятора к корпусу радиостанции, м<sup>2</sup>;  $\alpha_3$  – коэффициент теплоотдачи от аккумулятора в воздух, Вт/(м·К);  $T_{3cp}$  – температура воздуха, К;  $F_3$  – поверхность теплоотдачи аккумулятора в воздух, м<sup>2</sup>.

Тепло, поступившее от аккумулятора на корпус радиостанции, идет на увеличение его температуры. Результатом этого являются также потери тепла в воздух внутри теплоизолирующего корпуса. Уравнение теплового баланса для корпуса радиостанции в дифференциальной форме в этом случае будет иметь вид:

$$\alpha_2 (T_2 - T_3) F_2 d\tau = c_3 m_3 dT_3 + \alpha_4 (T_3 - T_4) F_4 d\tau, \quad (34)$$

где  $c_3$  – удельная теплоемкость корпуса радиостанции, Дж/кг·К;  $m_3$  – масса корпуса радиостанции, кг;  $dT_3$  – приращение температуры корпуса радиостанции, К;  $\alpha_4$  – коэффициент теплоотдачи от корпуса радиостанции в воздух, Вт/(м·К);  $T_4$  – температура окружающего воздуха в теплоизолирующем корпусе, К;  $F_4$  – площадь корпуса радиостанции, м<sup>2</sup>.

Мощность устройства электрического нагрева можно рассчитать по формулам:

$$P_{n1} = \frac{n \cdot U^2}{A'' e^{\alpha t_{n1}}}, \quad (35)$$

$$P_{n2} = \frac{n \cdot U^2}{B'' e^{\alpha t_{n2}}}, \quad (36)$$

где  $P_{n1}$  – мощность устройства до температуры переключения позистора, Вт;  $n$  – количество позисторов в устройстве;  $U$  – напряжение питания устройства, В;  $A''$  – коэффициент, зависящий от свойств полупроводниковых материалов;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления позистора, К<sup>-1</sup>;  $t_{n1}$  – температура позистора на участке до температуры переключения позистора ( $t_{пер}$ ), К;  $P_{n2}$  – мощность устройства после температуры переключения позистора, Вт;  $B'$ ,  $B''$

– коэффициенты, зависящие от свойств полупроводниковых материалов;  $t_{п2}$  – температура позистора на участке после температуры переключения позистора ( $t_{пер}$ ), К.

Уравнения (31 – 34) приведем к канонической форме и с учетом уравнений (35 – 36) составим математическую модель (37) процесса нагрева аккумулятора с помощью позисторов:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_1}{dt} = \frac{P_{yc} - \alpha_1(T_1 - T_2)F_1}{c_1 m_1} \\ \frac{dT_2}{dt} = \frac{\alpha_2(T_2 - T_3)F_2 - \alpha_4(T_3 - T_4)F_3}{c_2 m_2} \\ \frac{dT_3}{dt} = \frac{\alpha_1(T_1 - T_2)F_1 - \alpha_2(T_2 - T_3)F_2 - \alpha_3(T_2 - T_{3cp})F_3}{c_3 m_3} \\ \text{при } t_1 \leq t_{пер} \quad P_{п1} = \frac{n \cdot U^2}{A'' e^{\alpha_{п1}}} \\ \text{при } t_1 \geq t_{пер} \quad P_{п2} = \frac{n \cdot U^2}{-B'} \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad B'' e^{t_{п2}} \end{array} \right. \quad (37)$$

Представленная математическая модель (37) может быть использована для описания происходящих изменений энергетических параметров процесса подогрева аккумуляторной батареи электрическим нагревательным элементом с саморегулированием мощности, выполненным на базе позисторов, а также для определения его оптимальных конструктивных и режимных параметров.

### Заключение

Таким образом, в статье освещены следующие научные результаты.

1. Обоснован принцип работы устройства поддержания оптимального теплового режима работы аккумуляторной батареи радиостанции, состоящий из химического нагревательного элемента, выполненного на основе использования в качестве теплоаккумулирующего материала перенасыщенного раствора ацетата натрия трехводного, и электрического нагревательного элемента, выполненного на основе использования саморегулирующихся позисторов.

2. Разработана математическая модель, описывающая процесс поддержания в оптимальном тепловом состоянии аккумуляторной батареи радиостанции в условиях низких температур за счет использования электрического нагревательного элемента.

3. Разработана математическая модель, описывающая процесс поддержания в оптимальном тепловом состоянии аккумуляторной батареи радиостанции в условиях низких температур за счет использования химического нагревательного элемента.

4. Рассмотрены и приняты основные представления и допущения в математических моделях работы электрического и химического нагревательных элементов.

Таким образом, используя полученные научные результаты, может быть создано достаточно эффективное, и в то же время простое в использовании, устройство для компенсации теплопотерь аккумуляторных батарей в условиях низких температур. Предлагаемое устройство позволяет обеспечить эффективную эксплуатацию аккумуляторных батарей в условиях низких температур при их круглосуточном использовании за счет поддержания нормального теплового режима работы аккумуляторной батареи во время всего разрядного цикла, сокращения времени подготовки аккумуляторных батарей к заряду при эксплуатации в условиях низких температур.

Благодаря применению данного устройства может быть увеличен срок службы аккумуляторных батарей при эксплуатации их в условиях низких температур окружающего воздуха не менее чем на 20 %. Его низкая себестоимость делает выгоду от его использования еще более очевидной. А то, что для его применения не требуется каких-либо специальных знаний и навыков, позволяет применять его во всех звеньях управления без дополнительного обучения личного состава, занимающегося обслуживанием и эксплуатацией средств связи.

### Библиографический список

1. Батарея 10НКГЦ-1Д. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. М.: Воениздат, 2000. 10 с.
2. Исследование возможности применения переохлажденных жидкостей в качестве теплоаккумулирующих материалов в фазопереходных тепловых аккумуляторах, устанавливаемых на мобильные машины для предпускового разогрева их двигателей зимой: отчет о НИР (итоговый) / Воен. инж.-техн. ун-т; рук. В. В. Шульгин; отв. исполн.: А. Г. Мелентьев. СПб., 2000. 26 с. № 40049-Л. Инв. №561756-ОФ.
3. Булычев В. В., Челноков В. С., Сластилова С. В. Накопители тепла с фазовым переходом на основе Al-Si-сплавов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1996. № 7. С. 64-67.
4. Исследование возможности применения переохлажденных жидкостей в качестве теплоаккумулирующих материалов в фазопереходных тепловых аккумуляторах, устанавливаемых на мобильные машины для предпускового разогрева их двигателей зимой: отчет о НИР (промежуточ. по этапу № 3) / Воен. инж.-техн. ун-т; рук. В. В. Шульгин; отв. исполн.: А. Г. Мелентьев. СПб., 2000. 28 с. № 40049-Л. Инв. № 561554-ОФ.

5. Патанкар С. В., Сполдинг Д. Б. Тепло- и массообмен в пограничных слоях / под ред. акад. АН БССР А.В. Лыкова. М.: Энергия, 1971. 127 с.

6. Mathcad 6.0 PLUS. Финансовые, инженерные и научные расчеты в среде Windows 95: пер. с англ. М.: Информационно-издательский дом «Филинь», 1996. 712 с.

7. Беляев Н. М., Рядно А. А. Методы теории теплопроводности: учеб. пособие для студентов вузов

/ Н.М. Беляев, А.А. Рядно. В 2 ч. М.: Высш. школа, 1982. Ч. 1. 327 с.

8. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982. 510 с.

9. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. Изд. 5-е, доп. М.: Атомиздат, 1979. 415 с.

UDC 621.354.341

## THEORETICAL STUDIES OF THE PROCESS OF MAINTAINING OPTIMAL TEMPERATURE MODE BATTERY LIFE IN LOW TEMPERATURES

**K. M. Burovsky**, PhD (technical sciences), associate Professor, RVVDCU, Ryazan, kburovsky@mail.ru

**E. I. Lagutina**, post-graduate student, RVVDCU, Ryazan, below8585@mail.ru

**D. N. Strelkov**, PhD (technical sciences), teacher, RVVDCU, Ryazan, cobalt4@yandex.ru

*We consider the problem of providing operational characteristics of power sources of portable communication devices in low-temperature way of control.*

**Objectives.** 1. To justify the principle of operation of the device for compensation of heat losses of storage batteries in low temperature conditions by the method of temperature control with the use of different heating elements. 2. To develop a mathematical model describing the process of maintaining an optimum heat range of the battery due to the use of chemical and electrical heating elements. 3. To develop key concepts and assumptions to mathematical models. As a chemical heating element, supersaturated sodium acetate  $\text{NaCH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  is used. The electric heating element is made based on posistors.

**Key words:** battery, temperature control, electric heating element, heat storage material, heat accumulator phase transition.

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-56-2-155-162

### References

1. *Batareja 10NKGС-1D. Tehnicheskoe opisanie i instrukcija po jekspluatácii* (Battery 10NKGС-1D. Technical description and operating instructions). Moscow: Voenizdat, 2000, 10 p. (in Russian).

2. *Issledovanie vozmozhnosti primenenija pereohlazhdennyh zhidkostej v kachestve teploakkumulirujushih materialov v fazoperehodnyh teplovyh akkumuljatorah, ustanavlivaemyh na mobil'nye mashiny dlja predpuskovogo razogreva ih dvigatelej zimoj: otchet o NIR (itogovyj)*. Voen. inzh.-tehn. un-t; ruk. V. V. Shul'gin; otv. ispoln.: A. G. Melent'ev. SPb., 2000, 26 p. № 40049-L. Inv. №561756-OF (in Russian).

3. **Bulychev V. V., Chelnokov B. C., Slastilova S. V.** *Nakopiteli tepla s fazovym perehodom na osnove Al-Si-splavov. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Chernaja metallurgija*, 1996, no 7, pp. 64-67 (in Russian).

4. *Issledovanie vozmozhnosti primenenija pereohlazhdennyh zhidkostej v kachestve teploakkumulirujushih materialov v fazoperehodnyh teplovyh akkumuljatorah, ustanavlivaemyh na mobil'nye mashiny dlja predpuskovogo razogreva ih dvigatelej zimoj: otchet o NIR (promezhutoch. po jetapu № 3)*. Voen. inzh.-tehn. un-t; ruk. V. V. Shul'gin; otv. ispoln.: A. G. Melent'ev.

SPb., 2000, 28 p. № 40049-L. Inv. № 561554-OF (in Russian).

5. **Patankar S. V., Spolding D. B.** *Teplo- i massoobmen v pogranichnyh slojah* (Heat and mass transfer in boundary layers). Pod red. akad. AN BSSR A. V. Lykova. Moscow: Jenergija, 1971, 127 p. (in Russian).

6. *Mathcad 6.0 PLUS. Finansovyje, inzhenernye i nauchnye raschety v srede Windows 95* (Mathcad 6.0 PLUS. Financial, engineering and scientific calculations in Windows 95): per. s angl. Moscow: Informacionno-izdatel'skij dom «Filin#», 1996, 712 p. (in Russian).

7. **Beljaev N. M., Rjadno A. A.** *Metody teorii teploprovodnosti: ucheb. posobie dlja studentov vuzov* (Methods in heat conduction theory: textbook for University students.). N. M. Beljaev, A. A. Rjadno. V 2 vol. Moscow: Vyssh. shkola, 1982. Vol. 1. 327 p. (in Russian).

8. *Teplo- i massoobmen. Teplotehnicheskij jeksperiment: spravochnik* (Heat and mass transfer. Thermal engineering experiment: a handbook). Pod obshh. red. V. A. Grigor'eva, V. M. Zorina. Moscow: Jenergoizdat, 1982, 510 p. (in Russian).

9. **Kutateladze S. S.** *Osnovy teorii teploobmena* (Fundamentals of the theory of heat transfer). Izd. 5-e, dop. Moscow: Atomizdat, 1979, 415 p. (in Russian).