

УДК 677.023:62-83

**РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ
ТЕРМОЭКРАНИРУЮЩЕГО ПЛАЩА
С ЭЛЕМЕНТАМИ ПЕЛЬТЬЕ***

**THE THERMOSTATIC SYSTEM CALCULATION
OF THE THERMAL CLOAK
WITH ELEMENTS PELITIE**

И.Ю. БЕЛОВА, А.И. ТИХОНОВ
I.YU. BELOVA, A.I. TIKHONOV

(Ивановский государственный политехнический университет,
Ивановский государственный энергетический университет)
(Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo State Power University)
E-mail: ait@dsn.ru

В статье представлены разработанные авторами конструкция и метод проектирования многослойного материала, экранирующего электромагнитное излучение. Рассчитано необходимое количество элементов Пельтье, а также емкость питающей аккумуляторной батареи для изготовления термоизоляционного плаща.

The article presents a design developed by the authors and the design method of the laminate, shielding electromagnetic radiation. Calculate the number of Peltier elements, as well as the capacity of the battery supply for the manufacture of thermal insulation coat.

Ключевые слова: композиционный материал, электромагнитное излучение, камуфляж, инфракрасный сигнал, термоэлектрический модуль, элемент Пельтье.

* Статья подготовлена в рамках выполнения проектной части госзадания № 11.1898.2014/К.

Keywords: composite material, electromagnetic radiation, camouflage, an infrared signal, a thermoelectric module, a Peltier element.

Как известно, любое тело, в том числе и человеческое, нагретое до определенной температуры, излучает в окружающую среду электромагнитные волны в инфракрасном диапазоне спектра. Инфракрасный сигнал в условиях прямой видимости может передаваться на расстояние до нескольких километров и проходить сквозь непрозрачные для видимого излучения материалы. Это явление используется в приборах ночного видения. До сих пор поэтому актуальной остается проблема маскировки человека для исключения обнаружения его с помощью таких устройств.

Авторами разработана конструкция многослойного материала, экранирующего электромагнитное излучение. Данный материал может быть использован при изготовлении швейных изделий, предназначенных для электромагнитного камуфляжа, в частности, на инфракрасных длинах

волн, а также при изготовлении швейных изделий технического назначения, а именно мобильных укрытий (палаток, тентов). Структура многослойного композиционного материала (рис. 1) включает: 1 – полиэфирный текстильный материал внутреннего слоя пористой структуры; 2 – полиэфирный текстильный материал внешнего слоя с водоотталкивающей пропиткой черного цвета или камуфлирующей раскраски; 3 – металлонапыление, наносимое с изнаночной стороны внутреннего и наружного слоев композиционного материала; 4 – элементы Пельтье, соединенные в цепочку последовательно; 5 – соединительный двусторонний липкий материал; 6 – источник питания и регулятор подводимой мощности электрического тока; 7 – ячейки воздушных зазоров, образованные напуском из текстильного материала наружного слоя.

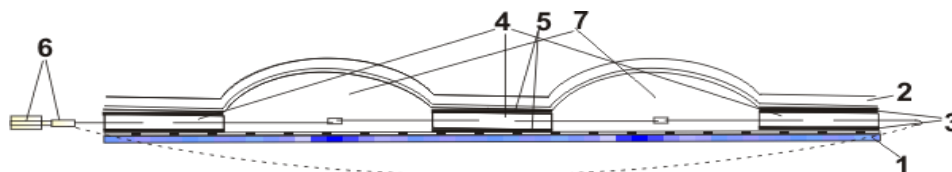


Рис. 1

Современный элемент Пельтье представляет собой термопару, состоящую из двух разнородных полупроводниковых элементов с р- и n-типами проводимости [1], [2]. Для расчета необходимого количества элементов Пельтье и необходимой емкости питающей аккумуляторной батареи разработан программный пакет Kryotherm компании "КРИОТЕРМ" [3], специализирующейся на выпуске высокотермоэлектрических модулей и систем на их основе. Данная программа разработана для оптимизации выбора термоэлектрических модулей и проектирования охлаждающих систем. Наилучшим образом она адаптирована для расчета холодильных установок. Расчет термоэкранирующего плаща требует другой постановки задачи, что не позволяет использовать в полном объеме возмож-

ности программы Kryotherm. В частности, в качестве объекта, расположенного с холодной стороны элемента Пельтье, выступает окружающая среда с фиксированной температурой T_{oc} , а в качестве объекта – с горячей стороны – тело человека с фиксированной температурой T_x .

Расчет осуществлен исходя из условия температуры окружающей среды $T_{oc} = -20^{\circ}\text{C} \sim 253^{\circ}\text{K}$. Температура тела, при которой у человека возникает ощущение комфорта $T_t \sim 34^{\circ}\text{C} \sim 304^{\circ}\text{K}$. Принимая средний рост человека $H = 1,75$ м, длину камуфлирующего плаща можно вычислить из известной пропорции человеческого тела:

$$H_n \approx H(1 - (1 - \phi)^2), \quad (1)$$

где $\phi \approx 0,618$ – золотая пропорция.

Тело человека под плащом условно можно разбить на две приблизительно равные по высоте области: область собственно тела с прижатыми руками высотой $H_T \approx \frac{H_n}{2}$ и область ног высотой

$H_n \approx \frac{H_n}{2}$. В области тела плащ непосредственно облегал тело человека, и тепло передается от человека к плащу путем теплопроводности. В области ног между ногами и плащом имеется воздушный промежуток с большим тепловым сопротивлением. Рассчитаем тепловые сопротивления на пути теплового потока отдельно по каждой из этих областей.

Тело с прижатыми руками условно можно представить в форме цилиндра диаметром $D_T \approx \frac{2}{3} H_T$. Площадь теплоотдачи с поверхности тела можно условно принять равной:

$$S_T \approx \pi D_T H_T. \quad (2)$$

Принимая, что человек чувствует себя комфортно при плотности потока энергии с поверхности тела $q_T = 42,4 \text{ Вт/м}^2$, тепловой расчет будем вести из учета теплового потока с поверхности тела человека:

$$Q_T = q_T S_T \approx 40 \text{ Вт}. \quad (3)$$

Приближенность теплового расчета не должна восприниматься излишне критично, так как, во-первых, тепловые расчеты вообще относятся к числу одних из самых неточных расчетов физических процессов, во-вторых, неточность расчета может быть впоследствии скомпенсирована регулировкой напряжения питания элементов Пельтье. Поэтому приведенный расчет можно считать оценочным.

Тепловое сопротивление одежды человека рассчитываем по формуле:

$$R_{то} = \frac{1}{2\pi\lambda H_T} \ln\left(\frac{D_T + 2b_o}{D_T}\right), \quad (4)$$

где $\lambda = 0,034 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ – удельная теплопроводность пакета материалов, из которого изготавливается одежда; b_o – толщина этого пакета. При $b_o = 0,02 \text{ м}$ (зимняя одежда) получаем $R_{то} = 0,634 \text{ Вт/°C}$.

Проектируемый плащ выполнен из двух слоев ткани толщиной $b_n = 0,0003 \text{ м}$, металлизированной стороной обращенных непосредственно к элементам Пельтье для выравнивания температуры всей поверхности. Таким образом, тепловое сопротивление между теплыми сторонами элементов Пельтье и внутренней поверхностью плаща в области тела:

$$R_{нтт} = \frac{b_n}{\lambda \pi D_{нтт} H_T k_n}, \quad (5)$$

где $D_{нтт} \approx D_T + 2b_o + (0,02 \div 0,06)$ – внутренний диаметр плаща с учетом прибавки на свободу облегания; $k_n \approx 0,5$ – коэффициент, учитывающий уменьшение площади прилегания плаща к одежде за счет складок. В результате получаем $R_{нтт} = 0,016 \text{ Вт/°C}$.

Пренебрегая теплопроводностью воздушных включений в складках плаща, температура на теплой поверхности элементов Пельтье найдена как

$$T_{нтт} = T_T - Q_T (R_{то} + R_{нтт}). \quad (6)$$

При данной постановке задачи можно рассчитать температуру на теплой стороне элементов Пельтье в области тела $T_{нтт} \approx 9^\circ\text{C} \approx 282^\circ\text{K}$.

Для расчета температуры на холодной стороне элементов Пельтье рассчитываем тепловое сопротивление с холодной стороны плаща $R_{тпх}$. Так как температура на поверхности плаща должна равняться температуре окружающей среды, возможно пренебречь явлением теплоотдачи с поверхности плаща в окружающую среду.

Получаем:

$$R_{тпх} = \frac{b_n}{\lambda \pi D_{пх} H_T}, \quad (7)$$

где $D_{\text{пх}} \approx D_{\text{пт}} + 4b_{\text{п}} + 2h_{\text{п}}$ – наружный диаметр плаща; $h_{\text{п}}$ – толщина элемента Пельтье с учетом подложек и клея. При данных условиях задачи получаем $R_{\text{пх}} = 0,0082 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$, что дает температуру на холодной поверхности элементов Пельтье как

$$T_{\text{пх}} = T_{\text{ос}} + Q_{\text{т}} R_{\text{пх}} \quad T_{\text{пт}} \approx -19,7 \text{ }^\circ\text{C} \approx 253,3 \text{ K.} \quad (8)$$

Исходные данные для решения задачи по определению количества элементов Пельтье, необходимых для обеспечения на внешней поверхности плаща температуры, равной температуре окружающей среды, следующие:

1) разность температур, которую должны обеспечить элементы Пельтье,

$$\Delta T = T_{\text{пт}} - T_{\text{пх}} \approx 29 \text{ }^\circ\text{C}; \quad (9)$$

2) тепловой поток, который должны компенсировать элементы Пельтье,

$$Q_{\text{с}} = Q_{\text{т}} = 40 \text{ Вт.} \quad (10)$$

Для создания термоэкранирующего плаща использован модуль элементов Пельтье ТВ-32-0,45-1,3 (размеры $6,6 \times 6,6 \times 2,3 \text{ мм}$, характеристики которого приведены на рис. 2 [3]).

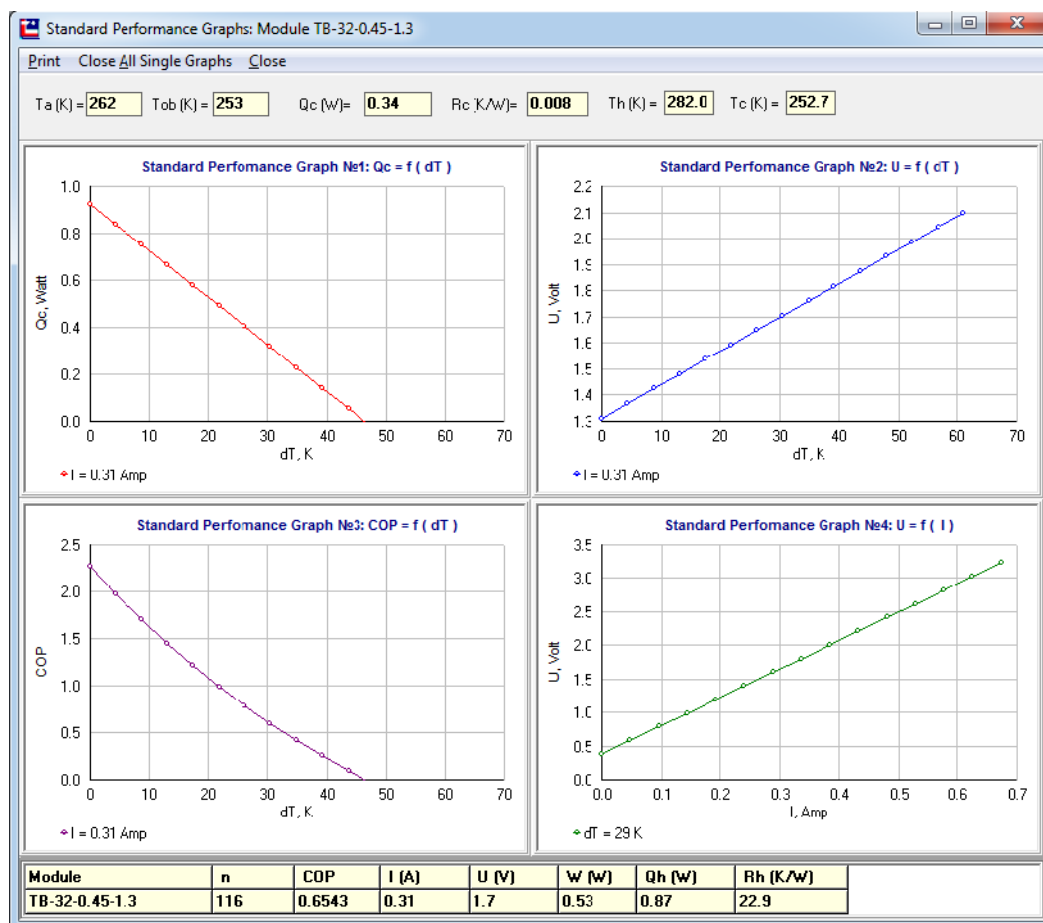


Рис. 2

Из графиков видно, что при $\Delta T = 29^\circ\text{C}$ один модуль элементов Пельтье выдает тепловую мощность $Q_{\text{с}} \approx 0,345 \text{ Вт}$, поэтому для компенсации теплового потока $Q_{\text{т}} = 40 \text{ Вт}$ потребуется 116 модулей. При

данной разнице температур модуль обеспечивает КПД = 0,654 и при напряжении питания $U = 1,7 \text{ В}$ потребляет ток $I = 0,31 \text{ А}$, что соответствует потребляемой мощности всех 116 элементов $P = 61,2 \text{ Вт}$. Если

для питания всех элементов использовать литиевую аккумуляторную батарею WB-LYP100АНА емкостью 100 ампер-часов ($U = 2,8...4,0$ В; вес 3,5 кг; размеры 179x62x218 мм), то модули нужно соединить по схеме, состоящей из 58 параллельных ветвей по 2 последовательно соединенных элемента в каждой ветви. При этом требуемое напряжение питания составит $U = 3,4$ В. Время разряда аккумуляторной батареи при этом составит 4-5 часов, что достаточно для ее использования в полевых условиях.

Следует отметить, что расчет проводился для достаточно тяжелых условий эксплуатации плаща, когда он должен обеспечить разность температур почти в 30°C . Уменьшить разность температур при одной и той же температуре окружающей среды можно с помощью дополнительных слоев верхней одежды. При этом время разряда аккумуляторной батареи существенно увеличивается.

Кроме того, наличие значительного воздушного пространства в области ног обеспечивает перепад температур между телом и элементами Пельтье при тех же условиях расчета 46°C , что в два раза превышает перепад температуры в области тела. Перепад температуры на поверхности плаща составит 8°C , поэтому модули Пельтье в этой области плаща можно не устанавливать.

Проектируемая система в представленном варианте термостатирования требует внесения пояснений о каналах потери теплоты, способствующих предотвращению перегрева человека. Защитный камуфлирующий плащ имеет форму плаща-палатки с капюшоном свободного покроя с плотным прилеганием к корпусу на участке опорной поверхности и заканчивается на 5...10 см выше пяточной точки. Это обеспечивает возможность дозированной потери (ухода) тепловых потоков через низ. Уход тепла через низ камуфлирующего плаща будет создавать в этой области облако неконтурного теплового поля, которое при движении человека будет быстро смешиваться с воздушными массами окру-

жающей среды и не повлияет на маскировочные свойства плаща в целом.

ВЫВОДЫ

1. Предложено конструктивно-технологическое решение многослойного пакета материалов камуфлирующего изделия, предназначенного для изготовления индивидуальной экипировки военнослужащего, обеспечивающего электромагнитный камуфляж, то есть функциональное соответствие назначению и условиям эксплуатации.

2. Разработан метод проектирования многослойного пакета материалов, адаптированный к термодинамической системе "человек-одежда-среда" и позволяющий рассчитать необходимое количество элементов Пельтье, а также емкость питающей аккумуляторной батареи, обеспечивающих в комплексе требуемый эффект электромагнитного экранирования.

3. Выполнен расчет системы термостатирования для частного случая изготовления термоэкранирующего плаща с заданным комплексом свойств, который показал, что потребуется 116 элементов Пельтье марки ТВ-32-0,45-1,3 и аккумуляторная батарея WB-LYP100АНА емкостью 100 ампер-часов, при его эксплуатации в температурном диапазоне от -40 до $+10^{\circ}\text{C}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Физическая энциклопедия. – М.: Большая Российская Энциклопедия – 1998. Т.5. С.98...99.
2. Шостаковский П.Г. Современные решения термоэлектрического охлаждения для радиоэлектронной, медицинской, промышленной и бытовой техники. – Компоненты и технологии. – 2009, №12. С. 40...46.
3. Шостаковский П.Г. Разработка термоэлектрических систем охлаждения и термостатирования с помощью компьютерной программы KRYOTHERM. – Компоненты и технологии. – 2010, № 7. С. 129...135.

Рекомендована кафедрой технологии швейных изделий ИВГПУ. Поступила 04.03.15.