

УДК 681.5.015.22: 621.565.83

DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.009

Определение параметров тепловой модели элементов Пельтье

Безик Дмитрий Александрович, Бычкова Татьяна Викторовна

Брянский государственный аграрный университет,
Россия, Брянск, tanyabychkova@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы определения параметров тепловой модели элементов Пельтье, необходимых для его представления в расчетной модели метода конечных элементов. Показано, как, используя справочные данные элемента Пельтье, получить уравнение, аппроксимирующее его эффективную тепловую мощность. С использованием этого уравнения предложена методика определения эффективного коэффициента теплопроводности, объёмной и поверхностной плотности теплового потока элемента Пельтье. Эти параметры позволяют полностью описать элемент в конечно-элементной расчетной схеме. Полученные значения применены для расчета термостата на элементах Пельтье в российской САЕ-системе автоматизированного проектирования APM WinMachine.

Ключевые слова: моделирование, теплопередача, элемент Пельтье, метод конечных элементов, параметры модели, APM WinMachine

Цитирование: Безик Д.А. Определение параметров тепловой модели элементов Пельтье / Д.А. Безик, Т.В. Бычкова // Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2025. – № 2 (38). – С. 103-112. – DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.009.

Введение. Современное программное обеспечение позволяет проводить сложные численные расчеты и оптимизировать различные конструкции. В частности, с помощью отечественного пакета программ APM Winmachine, реализующего метод конечных элементов, можно проводить расчет температурных полей [1]. При этом необходимо задать тепловые свойства материалов (теплопроводность и теплоёмкость) и граничные условия (тепловые нагрузки – температуры элементов, поверхностный и объёмный потоки тепла). После этого можно найти стационарное распределение температур или решить задачу нестационарной теплопроводности.

В некоторых холодильных установках для охлаждения применяются полупроводниковые элементы Пельтье (термоэлектрические генераторы). Они представляют собой конструктивно завершённое устройство, состоящее из термопар, соединённых между собой электропроводящими пластинами, расположенных в прямоугольной форме, и помещённых между керамическими пластинами (рис. 1). В качестве материала термопар обычно используются полупроводники. При подаче напряжения на элемент Пельтье (ЭП) одна его сторона (грань) нагревается, а другая охлаждается. Использование термоэлектрических модулей в системах охлаждения имеет ряд достоинств – они не имеют движущихся частей, жидкостей и ими легко управлять. К недостаткам можно отнести невысокий КПД.

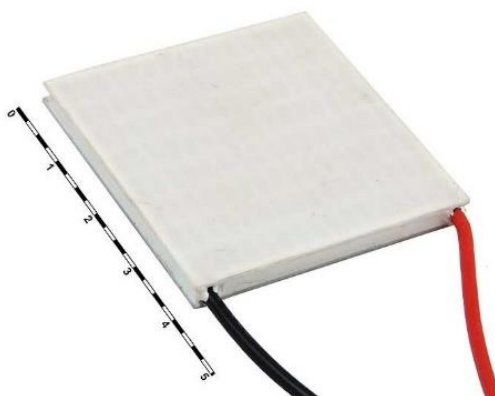


Рис. 1. Внешний вид элемента Пельтье

Для моделирования систем охлаждения в АРМ Winmachine с применением элементов Пельтье нужно задавать значение соответствующих тепловых нагрузок (поверхностные и объёмные тепловые потоки), однако в справочной документации эти параметры не приводятся [2, 3]. Также для тепловых расчетов необходимо знать коэффициент теплопроводности ЭП.

В процессе работы ЭП через него проходит тепловой поток и протекает электрический ток. Эти процессы взаимосвязаны. При протекании электрического тока по закону Джоуля-Ленца выделяется теплота, в контактах полупроводников разного типа проводимости поглощается и выделяется теплота (теплота Пельтье). Также теплота поглощается и выделяется при протекании электрического тока при наличии градиента температуры (эффект Томсона). Перечисленная теплота должна быть учтена при расчете систем охлаждения с применением ЭП.

Существует ряд работ, посвященных данной тематике, но они не дают четкого ответа на вопрос о получении параметров математической модели, выпускаемых промышленностью ЭП. Так, например, модель из [4] довольно громоздка и неточна, модель в [5] позволяет получить представление о работе ЭП, но на практике не применима. Довольно подробно, основываясь на фундаментальных физических законах, рассмотрен процесс работы ЭП в работе [6]. Работа [7] также посвящена моделированию ЭП, но приведенная модель достаточно громоздка и предназначена скорее для рассмотрения термодинамики самих элементов Пельтье, а не для практических расчетов холодильных установок на ЭП. Анализ литературных источников показывает отсутствие математической модели ЭП, которая может быть применена, основываясь только на справочных данных производителей, без привлечения информации о внутреннем устройстве ЭП и пригодной для практического использования в численном эксперименте, поэтому задача разработки такой модели является актуальной.

1. Цель. Разработка математической модели элементов Пельтье, пригодной для использования в численных расчетах методом конечных-элементов на основе доступных справочных данных. Для отечественного пакета программ АРМ Winmachine эта задача состоит в определении поверхностных и объёмных тепловых потоков ЭП и его коэффициента теплопроводности.

2. Математическая модель ЭП. В справочной документации на выпускаемые в настоящее время элементы Пельтье можно найти графики эффективной тепловой мощности, которые представляют собой семейство графиков поглощаемого теплового потока на холодной грани элемента в зависимости от разности температур холодной и горячей грани для разных значений протекающего электрического тока [3]. Эти зависимости представляются семейством прямых (рис. 2).

Используя графики рисунка 2, по силе электрического тока и тепловым сопротивлениям системы охлаждения можно определить разность температур граней элемента Пельтье, абсолютное значение этих температур и тепловые потоки холодной и горячей граней. В данном случае стоит задача по этому семейству графиков определить потоки тепла в математической модели элемента Пельтье для реализации метода конечных элементов.

При работе элемента Пельтье на его холодной грани поглощается, а на горячей грани выделяется тепловая мощность Пельтье

$$Q_{\text{П}} = \Pi I, \quad (1)$$

где Π – коэффициент Пельтье, В; I – сила протекающего тока, А.

В объёме элемента Пельтье по закону Джоуля-Ленца выделяется тепловая мощность

$$Q_{\text{Дж}} = I^2 R, \quad (2)$$

где R – активное сопротивление элемента Пельтье, Ом.

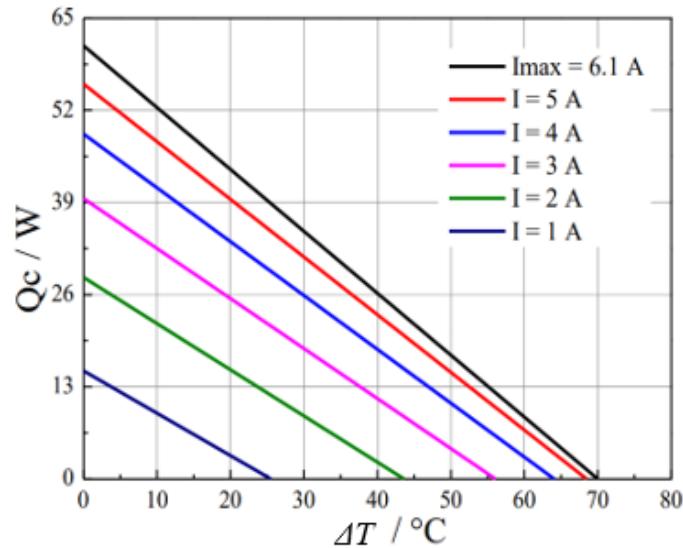


Рис. 2. Эффективная тепловая мощность элемента Пельтье TEC1-12706

Кроме того, через элемент Пельтье проходит тепловой поток с плотностью

$$q = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}, \quad (3)$$

где λ – усреднённый (эффективный) коэффициент теплопроводности элемента Пельтье, Вт/(К·м); x – координата по оси, перпендикулярной плоскости элемента Пельтье, м.

Кроме перечисленного, в объёме ЭП температура не одинакова и поэтому при протекании тока также будет поглощаться и выделяться теплота (эффект Томсона). В справочной документации на ЭП не приводятся использованные полупроводниковые материалы и их термоэлектрические свойства. Поэтому величину теплоты Томсона рассчитать нельзя. Теплота Томсона меньше той, что выделяется/поглощается на гранях ЭП, на это указано и в работе [7], поэтому мы будем пренебрегать эффектом Томсона.

Некоторую неточность в модель будет привносить конечное количество р-п переходов в ЭП. При проведении теплотехнических расчетов холодильных устройств с применением ЭП, серийно выпускаемых промышленностью, количество конечных элементов в расчётной модели меньше, чем количество р-п переходов в ЭП (например, в TEC1-12706 их 127). Кроме того, в конструкции ЭП тепловые потоки отдельных переходов «усредняются» металлизацией керамических граней и самими гранями, что подтверждается однородностью термограмм рабочей поверхности ЭП. Поэтому неравномерностью тепловых потоков граней при применении ординарных промышленных ЭП можно пренебречь, что позволяет рассматривать одномерную модель ЭП.

Распределение температуры внутри элемента Пельтье толщиной L схематично показано на рисунке 3, а. Внешний тепловой поток холодной грани обозначен как Q_c . Поток Q_h – поток тепла, отводимый от горячей грани элемента Пельтье через радиатор во внешнюю среду.

Определение зависимости, описывающей распределение температуры в элементе Пельтье, сводится к решению уравнений для теплового потока [8]:

$$\vec{q} = \alpha T \vec{j} - \lambda \nabla T, \quad (4)$$

и плотности электрического тока

$$\vec{j} = \sigma (\vec{E} - \alpha \nabla T), \quad (5)$$

где q – тепловой поток, Вт/м²;

α – коэффициент термоЭДС (Зеебека), В/К;

j – плотность электрического тока, А/м²;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(К·м);

σ – удельная электропроводность, См/м;

E – напряжённость электрического поля, В/м.

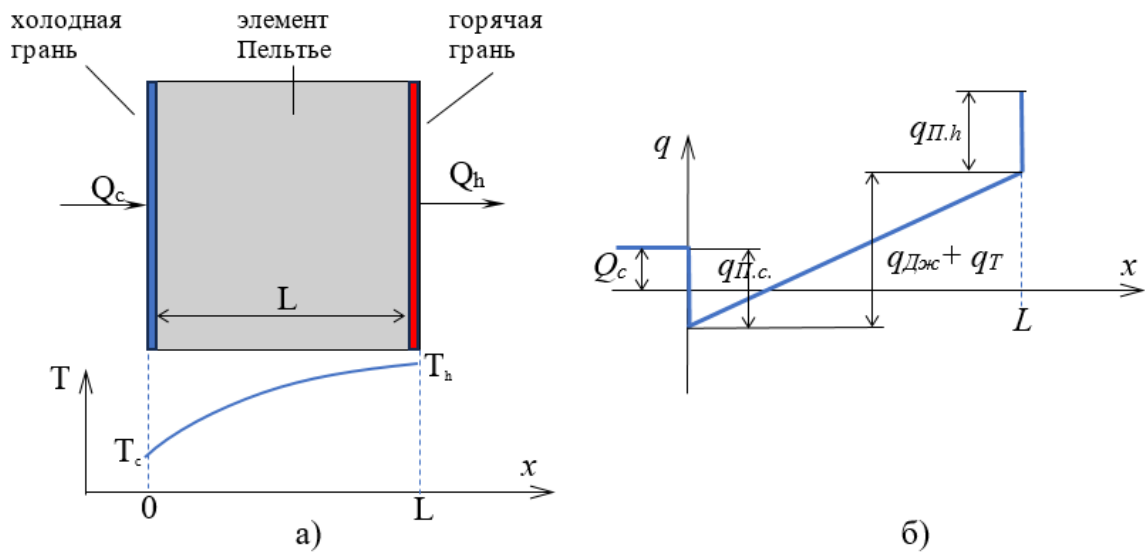


Рис. 3. Распределение температуры внутри элемента Пельтье (а) и тепловой поток через него (б)

В скалярной одномерной форме эти уравнения примут вид:

$$q = \alpha T j - \lambda \frac{dT}{dx}, \quad (6)$$

$$j = \sigma \left(E - \alpha \frac{dT}{dx} \right), \quad (7)$$

Из закона сохранения энергии следует, что $\nabla \vec{q} = \vec{j} \vec{E}$. Так как мы рассматриваем одномерный случай проводников с постоянной площадью поперечного сечения, то $\vec{j} = j_0 \vec{e}_x$ и закон сохранения энергии запишется как $\frac{dq}{dx} = j_0 E$. Подставляя в это уравнение тепловой поток из (6) и напряжённость электрического поля из (7), получим одномерное дифференциальное уравнение для определения температуры:

$$\frac{d}{dx} \left(\alpha T j_0 - \lambda \frac{dT}{dx} \right) = \frac{j_0^2}{\sigma} + \alpha j_0 \frac{dT}{dx}. \quad (8)$$

В первом приближении примем, что коэффициент теплопроводности, коэффициент Зеебека и удельная электропроводность постоянны. Тогда уравнение (8) переходит в уравнение Фурье:

$$-\lambda \frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{j_0^2}{\sigma}, \quad (9)$$

где $\frac{j_0^2}{\sigma} = \frac{RI^2}{AL}$ – объёмная плотность джоулева потока тепла, Вт/м²; A – площадь элемента Пельтье, м².

Найдем решение этого уравнения при заданной температуре горячей грани ($T|_{x=L} = T_h$) и тепловом потоке холодной грани ($q|_{x=0} = Q_c/A$), что соответствует приводимым данным в справочных данных ЭП.

Из уравнения (9) общее решение для распределения температуры по толщине ЭП:

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{j_0^2}{\sigma\lambda}x + C_1, \quad T = -\frac{j_0^2}{\sigma\lambda}\frac{x^2}{2} + C_1x + C_2. \quad (10)$$

Используя заданные начальные условия, получим:

$$T_h = -\frac{j_0^2}{\sigma\lambda}\frac{L^2}{2} + C_1L + C_2, \quad \frac{Q_c}{A} = \alpha j_0 C_2 - \lambda C_1,$$

$$C_1 = \frac{\left(T_h + \frac{j_0^2}{\sigma\lambda}\frac{L^2}{2}\right)\alpha j_0 - \frac{Q_c}{A}}{\alpha j_0 L + \lambda}, \quad C_2 = \frac{L\frac{Q_c}{A} + \left(T_h + \frac{j_0^2}{\sigma\lambda}\frac{L^2}{2}\right)\lambda}{\alpha j_0 L + \lambda},$$

значит, искомое распределение температуры по толщине элемента Пельтье:

$$T = -\frac{j_0^2}{\sigma\lambda}\frac{x^2}{2} + \frac{\left(T_h + \frac{j_0^2}{\sigma\lambda}\frac{L^2}{2}\right)\alpha j_0 - \frac{Q_c}{A}}{\alpha j_0 L + \lambda}x + \frac{L\frac{Q_c}{A} + \left(T_h + \frac{j_0^2}{\sigma\lambda}\frac{L^2}{2}\right)\lambda}{\alpha j_0 L + \lambda}. \quad (11)$$

При $x = 0$ температура по формуле (11) равна температуре холодной грани $T = T_c$. Подставив это значение в (11) и выразив поглощаемое холодной гранью теплоту Q_c , получим:

$$Q_c = -\left(A\frac{\lambda}{L} + \alpha I\right)(T_h - T_c) + \alpha T_h I - \frac{1}{2}I^2 R. \quad (12)$$

Полученная формула описывает ту же зависимость, что и график рисунка 2. Используя графические зависимости справочных данных, можно получить формулу (12), а по ней – определить поверхностный поток теплоты Пельтье, объёмный поток джоулевой теплоты и коэффициент теплопроводности.

3. Результаты и обсуждение. Графики рисунка 2 типичны для ЭП, выпускаемых промышленностью. Далее численные значения будут приводиться для элемента Пельтье TEC1-12706 (производство Ruichi, Китай).

По семейству графиков эффективной тепловой мощности элемента Пельтье (рис. 2) методом наименьших квадратов легко получить аппроксимирующее выражение для максимальной поглощаемой теплоты холодной грани в зависимости от силы электрического тока $Q_c(I)|_{\Delta T=0}$ и выражение для максимальной разности температур между гранями в зависимости от силы электрического тока $\Delta T(I)|_{Q_c=0}$. Из них можно получить и зависимость $Q_c = Q_c(\Delta T, I)$. Для ЭП TEC1-12706 эти зависимости имеют вид:

$$Q_c(I)|_{\Delta T=0} = -1.0217I^2 + 16.213I, \quad (13)$$

$$\Delta T(I)|_{Q_c=0} = -2.3921I^2 + 25.834I. \quad (14)$$

Это квадратичные зависимости с нулевым свободным членом.

Зависимость поглощаемой тепловой мощности холодной грани от силы электрического тока и разности температур граней выглядит следующим образом:

$$Q_c = -\frac{-1.0217I^2 + 16.213I}{-2.3921I^2 + 25.834I}\Delta T - 1.0217I^2 + 16.213I, \quad (15)$$

где Q_c – поток тепла через холодную грань элемента Пельтье, Вт; I – сила электрического тока, А; ΔT – разность температур между гранями элемента Пельтье, °С.

Это уравнение по форме совпадает с уравнением (12) и из него можно определить активное сопротивление элемента TEC1-12706 $R = 2.0434$ Ом и коэффициент Пельтье $\Pi = 16.213$ В.

Таким образом, объёмный $\frac{RI^2}{AL}$ и поверхностный $\frac{\Pi I}{A}$ тепловые потоки конечно-элементной модели легко определяются по семейству прямых тепловой мощности элемента Пельтье.

Оценим полученное значение коэффициента Пельтье. Параметры использованных при производстве ЭП TEC1-12706 материалов неизвестны, поэтому оценим их по данным из литературных источников.

Коэффициент Зеебека для теллурида висмута р-типа примем $\alpha = 227$ мкВ/К [9], а для твердого раствора SiGe n-типа $\alpha = -510$ мкВ/К [10]. Тогда при рабочих параметрах ЭП TEC1-12706 $I = 4$ А, $Q_c = 23$ Вт, $\Delta T = 30$ °С, для горячей грани:

$$\Pi(T) = (\alpha_p(T) - \alpha_n(T))TN = (227 \cdot 10^{-6} - 510 \cdot 10^{-6}) \cdot 300 \cdot 64 = 14,504 \text{ В}.$$

Это значение меньше, чем полученное по справочным данным. Это объясняется отсутствием достоверных данных об используемых в производстве материалов.

Рассмотрим вопрос расчёта коэффициента теплопроводности ЭП.

В конструкции ЭП использованы различные материалы, в то время как в модели он будет представлен монолитной однородной средой с единым эффективным коэффициентом теплопроводности. Он может быть получен из формул (12) и (14):

$$\lambda = \frac{L}{A} \left(\frac{-1.0217I^2 + 16.213I}{-2.3921I^2 + 25.834I} - \frac{16.213}{300} I \right). \quad (16)$$

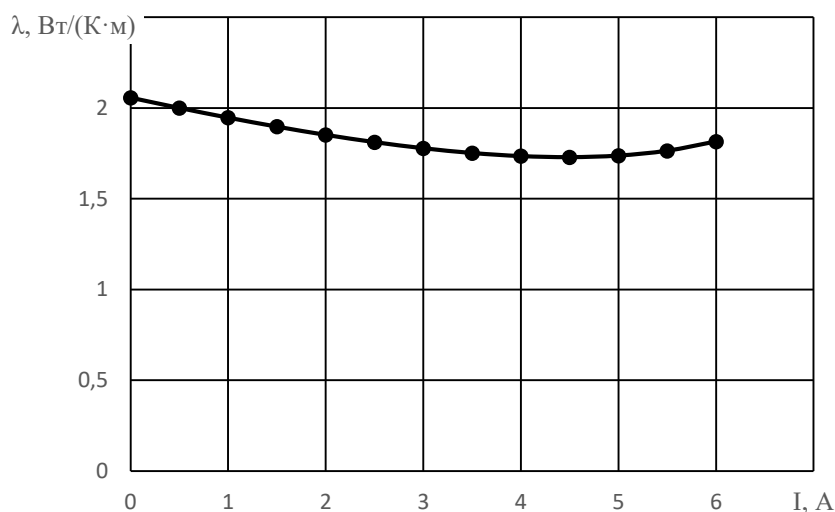


Рис. 4. Расчётный коэффициент теплопроводности ЭП TEC1-12706

График рассчитанного по формуле (16) коэффициента теплопроводности показан на рисунке 4. Полученное значение λ соответствует эффективному коэффициенту теплопроводности, который учитывает теплопроводность использованных полупроводников, керамики граней, припоя и воздушных зазоров. Полученные значения достаточно близки к экспериментальным значениям коэффициента теплопроводности теллурида висмута [10, 11], твёрдого раствора SiGe [10, 12] и оксида алюминия [13]. Расхождение объясняется применением множества материалов, используемых при производстве элементов Пельтье, использованием поликристаллов, сложной конструкцией элемента, а также изменением температуры по объёму элемента в процессе работы.

4. Моделирование методом конечных элементов. В качестве иллюстрации применения полученных параметров элемента Пельтье был произведен расчет параметров термостата. Он имеет наружные размеры $21 \times 24 \times 21$ см³. Теплоизоляция – вспененный

полистирол ($\lambda = 0,05 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$), толщина 50 мм). Теплопроводящий внутренний кожух медный, толщиной 0,8 мм. Радиатор охлаждения горячей грани элемента Пельтье – алюминиевый с принудительным охлаждением ($R_T = 0,2 \text{ °C/Вт}$). Элемент Пельтье - TEC1-12706. Расчеты проводились в конечно-элементной модели (рис. 5), построенной в российской САЕ-системе автоматизированного проектирования APM WinMachine.

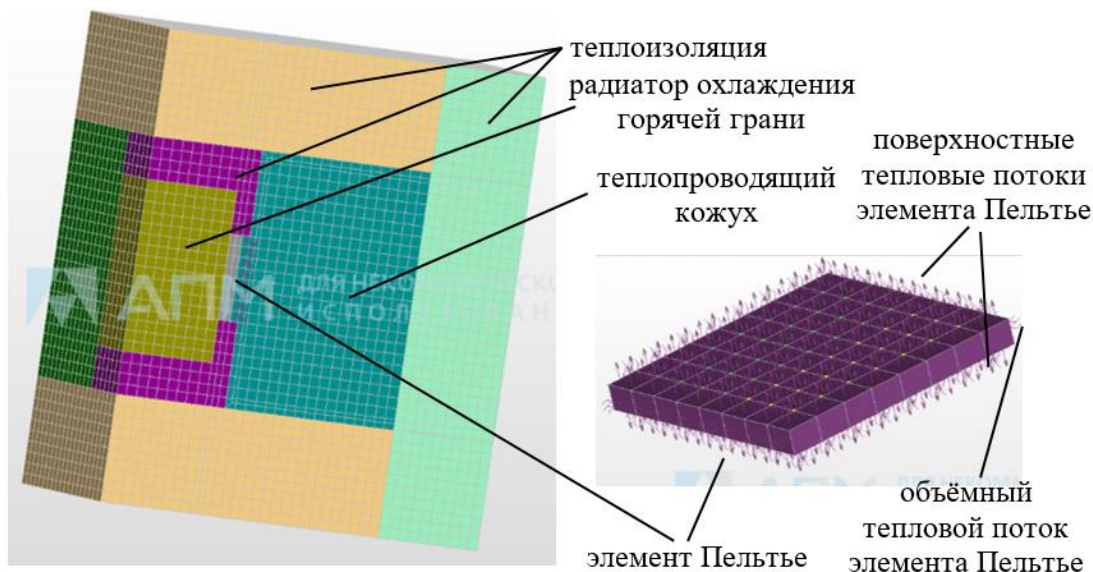


Рис. 5. Конечно-элементная модель термостата в APM WinMachine (тепловые потоки с поверхности термостата не показаны)

Конечные элементы – 8-угольные, тепловые параметры элементов заданы в термических свойствах элементов, тепловые нагрузки элемента Пельтье заданы по приведенным выше формулам (поверхностные и объёмные потоки тепла), теплоотдача от поверхностей задавалась через коэффициент теплоотдачи. Для радиатора охлаждения горячей грани эффективный коэффициент теплоотдачи (расчетное значение $1047 \text{ Вт/(°C}\cdot\text{м)}$) был рассчитан по его тепловому сопротивлению, определённому экспериментально. Конвективный и излучательный поток тепла от внешних поверхностей задавался одним коэффициентом теплоотдачи, также определенным экспериментально на физической модели ($6,4 \text{ Вт/(°C}\cdot\text{м)}$ на боковых поверхностях, $6,1 \text{ Вт/(°C}\cdot\text{м)}$ на верхней поверхности). Результаты расчета теплового поля в APM WinMachine показаны на рисунке 6.

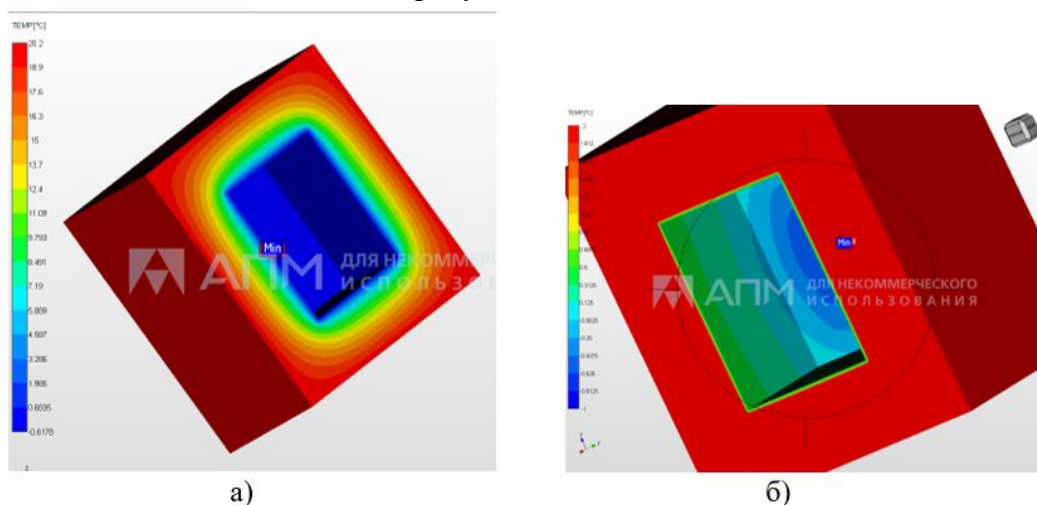


Рис.6. Расчетное температурное поле в термостате на элементе Пельтье: а) автоматический выбор шкалы температуры; б) шкала температуры от -1 до 2 °C

Правый рисунок показывает детальное изменение температуры по поверхности внутреннего теплопроводящего кожуха. Неравномерность нагрева стенки 1,46 °С, что достаточно для целей разработки данного термостата.

Таким образом, САЕ-системы (в нашем случае APM WinMachine) при известных тепловых параметрах элементов Пельтье (определяемых по формулам, приведенным выше) позволяют рассчитать произвольную конструкцию охладителей на этих элементах.

Заключение. Получены формулы, позволяющие по справочным данным элементов Пельтье рассчитать параметры их тепловой модели для использования в конечно-элементном методе расчета. По семейству прямых тепловой эффективности элементов Пельтье можно определить их активное сопротивление, коэффициент Пельтье, эффективный коэффициент теплопроводности. Этих параметров достаточно для описания тепловой модели ЭП, например, для расчета охладителей в пакете программ APM Winmachine.

Приведенная модель применима при теплотехническом расчете устройств с промышленно выпускаемыми ЭП. В случае же специализированных ЭП (например, состоящих из очень малого количества переходов или из материалов с существенной зависимостью коэффициента Зеебека от температуры) требуется учесть особенности конструкции ЭП и свойства их материалов.

Список источников

1. Расчет конструкций, деталей машин и механизмов. – URL: <https://help.apm.ru/structure3d/v20/> (дата обращения: 20.01.2025).
2. RUICHI - электронные компоненты, электротехнические изделия, монтажные компоненты. – URL: <https://ruichi-sz.com/ru/catalog/installation-products/peltier-modules> (дата обращения: 20.01.2025).
3. Specification of Thermoelectric Module. Available at: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/000189115DS02/datenblatt-189115-tru-components-tec1-12706-peltier-element-15-v-64-a-65-w-l-x-b-x-h-40-x-40-x-38-mm.pdf>. (accessed: 01/20/2025).
4. Иванов Ю.А. Моделирование и идентификация элемента Пельтье TEC1-12706 для применения в малообъемных биореакторах искусственного ЖКТ рыб / Ю.А. Иванов, А.Д. Лукьянов, Д.Ю. Донской, и др. // *Агроинженерия*, 2024. – Т. 26. – № 3. – С. 58-65. – DOI: 10.26897/2687-1149-2024-3-58-65.
5. Reddy B.V.K., Barry M., Li J., et al. Mathematical modeling and numerical characterization of composite thermoelectric devices. *International journal of thermal sciences*, 2013, v. 67, pp. 53-63, DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2012.11.004.
6. Seifert W., Ueltzen M., Müller E. One-dimensional modelling of thermoelectric cooling. *Physica status solidi (a)*, 2002, v. 194, no. 1, pp. 277-290, DOI: 10.1002/1521-396X(200211)194:1%3C277::AID-PSSA277%3E3.0.CO;2-5.
7. Zavorotneva E.V., Indeitsev D.A., Lukin A.V., et al. Technique for compact modeling of thermoelectric systems. *Computing, telecommunications and Control*, 2021, v. 14, no. 2, pp. 29-48, DOI: 10.18721/JCSTCS.14203.
8. Ландау Л.Д. Электродинамика сплошных сред / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2005. – Т. 8. – 656 с.
9. Иванова Л.Д. Термоэлектрические и механические свойства твердых растворов Sb₂Te₃–Bi₂Te₃, легированных свинцом / Л.Д. Иванова, Ю.В. Гранаткина, А.Г. Мальчев и др. // *Неорганические материалы*, 2020. – Т. 56. – № 3. – С. 247-252. – DOI: 10.31857/S0002337X20030057.
10. Kim B.S., Dow H.-S., Oh M.-W., et al. Thermoelectric properties of Bi₂Te₃ material doped with lanthanum by mechanical alloying. *Synthesis and reactivity in inorganic, metal-organic, and nano-metal chemistry*, 2008, v. 38, pp. 143-147, DOI: 10.1080/15533170801922647.
11. Васильев А.Е. Термоэлектрические свойства твердых растворов Bi₂Te_{2,7}Se_{0,3}, легированных тулием / А.Е. Васильев, М.Н. Япрынцев, О.Н. Иванов и др. // *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии*, 2018. – Т. 8. – № 4(29). – С. 162-170.
12. Кузнецов Ю.М. Легирование термоэлектрического наноструктурированного твердого раствора Si_{1-x}Gex (x ~ 0,3) донорными и акцепторной примесью в процессе синтеза методом электроимпульсного плазменного спекания / Ю.М. Кузнецов, И.В. Ерофеева, М.В. Дорохин и др. // *Перспективные материалы*, 2024. – № 7. – С. 18-33. – DOI: 10.30791/1028-978X-2024-7-18-33.

13. Абызов А.М. Оксид алюминия и алюмооксидная керамика (Обзор). Часть 1. Свойства Al_2O_3 и промышленное производство дисперсного Al_2O_3 / А.М. Абызов // Новые огнеупоры, 2019. – № 1. – С. 16-23.

Безик Дмитрий Александрович. Канд. техн. наук, доцент, директор института энергетики и природопользования, Брянский государственный аграрный университет. AuthorID: 16673, SPIN: 1052-9774, ORCID: 0000-0003-1883-716X, bda20101@yandex.ru, 243365, Россия, Брянская область, Выгоничский район, с. Кокино, ул. Советская, д. 2а.

Бычкова Татьяна Викторовна. Канд. пед. наук, доцент кафедры автоматизации, физики и математики, Брянский государственный аграрный университет. AuthorID: 284108, SPIN: 2592-1200, ORCID: 0000-0002-7457-8783, tanyabychkova@mail.ru, 243365, Россия, Брянская область, Выгоничский район, с. Кокино, ул. Советская, д. 2а.

UDC 681.5.015.22: 621.565.83
DOI:10.25729/ESI.2025.38.2.009

Determination of the parameters of the thermal model of Peltier elements

Dmitry A. Bezik, Tatyana V. Bychkova

Bryansk state agrarian university,
Bryansk, Russia, tanyabychkova@mail.ru

Abstract. The issues of determining the parameters of the thermal model of Peltier elements necessary for its representation in the computational model of the finite element method are considered. It is shown how, using the reference data of the Peltier element, to obtain an equation approximating its effective thermal power. Using this equation, a method is proposed for determining the effective coefficient of thermal conductivity, volume and surface heat flux density of a Peltier element. These parameters allow you to fully describe the element in a finite element calculation scheme. The obtained values were used to calculate a Peltier element thermostat in the Russian CAE computer-aided design system APM WinMachine.

Keywords: modeling, heat transfer, Peltier element, finite element method, model parameters, APM WinMachine

References

1. Raschet konstrukcij, detalej mashin i mekhanizmov [Calculation of structures, machine parts and mechanisms]. Available at: <https://help.apm.ru/structure3d/v20/> (accessed: 01/20/2025).
2. RUICHI - elektronnye komponenty, elektrotekhnicheskie izdeliya, montazhnye komponenty [RUICHI - electronic components, electrical products, assembly components]. Available at: <https://ruichi-sz.com/ru/catalog/installation-products/peltier-modules> (accessed: 01/20/2025).
3. Specification of thermoelectric module. Available at: <https://asset.conrad.com/media10/add/160267/c1/-/en/000189115DS02/datenblatt-189115-tru-components-tec1-12706-peltier-element-15-v-64-a-65-w-l-x-b-x-h-40-x-40-x-38-mm.pdf>. (accessed: 01/20/2025).
4. Ivanov Yu.A., Luk'yanov A.D., Donskoj D.Yu. et al. Modelirovanie i identifikaciya elementa Pel't'e TEC1-12706 dlya primeneniya v maloob'emnyh bioreaktorah iskusstvennogo ZhKT ryb [Modeling and identification of the Peltier element TEC1-12706 for use in low-volume bioreactors of the artificial gastrointestinal tract of fish]. Agrozhenneriya [Agrozhenneriya], 2024, vol. 26, no. 3, pp. 58-65, DOI: 10.26897/2687-1149-2024-3-58-65.
5. Reddy B.V.K., Barry M., Li J., et al. Mathematical modeling and numerical characterization of composite thermoelectric devices. International journal of thermal sciences, 2013, v. 67, pp. 53-63, DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2012.11.004.
6. Seifert W., Ueltzen M., Müller E. One-dimensional modelling of thermoelectric cooling. Physica status solidi (a), 2002, v. 194, no. 1, pp. 277-290, DOI: 10.1002/1521-396X(200211)194:1%3C277::AID-PSSA277%3E3.0.CO;2-5.
7. Zavorotneva E.V., Indeitsev D.A., Lukin A.V., et al. Technique for compact modeling of thermoelectric systems. Computing, telecommunications and Control, 2021, v. 14, no. 2, pp. 29-48, DOI: 10.18721/JCSTCS.14203.
8. Landau L.D., Lifshic E.M. Elektrodinamika sploshnykh sred [Electrodynamics of continuous media]. M.: Fizmatlit [M.: Fizmatlit], 2005, vol. 8, 656 p.

9. Ivanova L.D., Granatkina Yu.V., Mal'chev A.G., et al. Termoelektricheskie i mekhanicheskie svoystva tverdyh rastvorov Sb₂Te₃–Bi₂Te₃, legirovannyh svincom [Thermoelectric and mechanical properties of lead-doped Sb₂Te₃–Bi₂Te₃ solid solutions]. *Neorganicheskie materialy* [Inorganic materials], 2020, vol. 56, no. 3, pp. 247-252, DOI: 10.31857/S0002337X20030057.
10. Kim B.S., Dow H.-S., Oh M.-W., et al. Thermoelectric properties of Bi₂Te₃ material doped with lanthanum by mechanical alloying. *Synthesis and reactivity in inorganic, metal-organic, and nano-metal chemistry*, 2008, v. 38, pp. 143-147, DOI: 10.1080/15533170801922647.
11. Vasil'ev A.E., Yaprincev M.N., Ivanov O.N., et al. Termoelektricheskie svoystva tverdyh rastvorov Bi₂Te_{2,7}Se_{0,3}, legirovannyh tuliem [Thermoelectric properties of Bi₂Te_{2.7}Se_{0.3} solid solutions doped with thulium]. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* [Bulletin of the South-West State University. Series: Engineering and Technology], 2018, vol. 8, no. 4 (29), pp. 162-170.
12. Kuznecov Yu.M., Erofeeva I.V., Dorohin M.V., et al. Legirovanie termoelektricheskogo nanostrukturirovannogo tverdogo rastvora Si_{1-x}Gex ($x \sim 0,3$) donornymi i akseptornoj primesyami v processe sinteza metodom elektroimpul'snogo plazmennogo spekaniya [Doping of thermoelectric nanostructured solid solution Si_{1-x}Gex ($x \sim 0.3$) with donor and acceptor impurities during synthesis by electric pulse plasma sintering]. *Perspektivnye materialy* [Perspective materials], 2024, no. 7, pp. 18-33, DOI: 10.30791/1028-978X-2024-7-18-33.
13. Abyzov, A.M. Oksid alyuminiya i alyumooksidnaya keramika (Obzor). Chast' 1. Svoystva Al₂O₃ i promyshlennoe proizvodstvo dispersnogo Al₂O₃ [Aluminum oxide and alumina ceramics (Review). Part 1. Properties of Al₂O₃ and industrial production of dispersed Al₂O₃]. *Novye ognepupory* [New refractories], 2019, no. 1, pp. 16-23.

Безик Дмитрий Александрович. *Candidate of technical sciences, associate professor, director of the Institute of energy and environmental management, Bryansk state agrarian university. AuthorID: 16673, SPIN: 1052-9774, ORCID:0000-0003-1883-716X, bda20101@yandex.ru, 243365, Russia, Bryansk region, Vygonichsky district, Kokino village, Sovetskaya str., 2a.*

Бычкова Татьяна Викторовна. *Candidate of pedagogical sciences, associate professor of the Department of automation, physics and mathematics, Bryansk state agrarian university. AuthorID: 284108, SPIN: 2592-1200, ORCID:0000-0002-7457-8783, tanyabychkova@mail.ru, 243365, Russia, Bryansk region, Vygonichsky district, Kokino village, Sovetskaya str., 2a.*

Статья поступила в редакцию 13.02.2025; одобрена после рецензирования 01.04.2025; принята к публикации 10.04.2025.

The article was submitted 02/13/2025; approved after reviewing 04/01/2025; accepted for publication 04/10/2025.