



Евдулов О.В.

Евдулов О.В., Евдулов Д.В.

ФГБОУ ВПО «Дагестанский государственный
технический университет»,
Россия, г. Махачкала, пр. имама Шамиля, д.70,
367015



Евдулов Д.В.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА
СЛОИСТЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

В работе рассмотрена модель термоэлектрического элемента слоистой конструкции, а также представлены результаты его теоретических исследований. Модель термоэлемента позволяет исследовать происходящие в нем теплофизические и термомеханические процессы на основе решения нестационарного уравнения теплопроводности, уравнений равновесия, сплошности и Дюгамеля-Неймана для многослойной системы численным методом конечных элементов. Результаты представлены в виде двумерных и одномерных графиков изменения температуры, термомеханических напряжений и деформаций в различных точках термоэлемента.

Ключевые слова: термоэлемент, холодильная установка, температурное поле, термомеханические напряжения и деформации, модель, численный метод конечных элементов.

This paper is concerned with a model of a layered thermoelectric element and presents the results of its theoretical studies. The thermoelement model makes it possible to study the thermophysical and thermomechanical processes occurring in it on the basis of solving the unsteady-state equation of thermal conductivity, the equilibrium, the continuity and the Duhamel-Neumann equations for a multi-layered system by a numerical finite element method. The results are represented as two-dimensional and one-dimensional plots of temperature, thermomechanical stresses and deformations at different thermoelement points.

Key words: thermoelement, cooling plant, temperature field, thermomechanical stresses and deformations, model, numerical finite element method.

Введение

Продолжительной, устойчивой работы ряда приборов удастся добиться, лишь создав им необходимые температурные условия. Как правило, температурные условия работы теплонагруженных приборов обеспечиваются специальными охлаждающими системами, холодильными установками. Последние весьма разнообразны, сложны, могут иметь значительные габариты, массу, энергопотребление. Во многих случаях масса, габариты, надежность терморегулирующих систем не всегда сравнимы с соответствующими показателями объектов охлаждения, особенно актуально это для микроминиатюрных устройств с высокими удельными тепловыми потоками. Решение задачи температурной стабилизации

такой аппаратуры в этом случае может быть получено применением в качестве холодильных установок термоэлектрических устройств, оптимально сочетающихся с ней по важнейшим энергетическим и массогабаритным показателям.

Базовым элементом любого термоэлектрического прибора является полупроводниковый термоэлектрический элемент (ТЭ), разновидности которого достаточно подробно рассмотрены в [1-3]. Среди них следует выделить термопарные, анизотропные, вихревые, короткозамкнутые термоэлементы, ТЭ, работающие в магнитном поле и при высоких градиентах температуры, а также пьезотермоэлементы. Наиболее распространено классическое П-образное исполнение этих элементов, когда направление подводимого электрического тока перпендикулярно направлению теплового потока на их холодных и горячих спаех. Однако при проектировании относительно мощных малогабаритных холодильных установок (мощностью более 1 кВт) на основе ТЭ данного типа актуальным является обеспечение их надежной работы на протяжении всего цикла функционирования охлаждаемой аппаратуры.

Так, существующие слаботочные термоэлектрические батареи (ТЭБ) в случае использования их в большом количестве обладают недостаточной надежностью за счет роста числа ТЭ и соответственно паяных соединений, а также низкими термодинамическими характеристиками. Сильноточные П-образные ТЭБ в этом отношении более выгодны, но ввиду наличия больших тепловых потоков на спаех имеют низкие термомеханические характеристики.

Для их повышения чаще всего медные коммутационные пластины применяются со свинцовыми демпфирующими прокладками [4], которые, вследствие своей эластичности, разгружают ветви ТЭ от напряжений, однако одновременно увеличивается электрическое и тепловое сопротивление контактов. При небольших перепадах температур иногда применяются разрезные коммутационные пластины [5], тонкая перемычка которых обладает упругостью и небольшим электрическим сопротивлением благодаря ее малой длине. В ряде конструкций нашли применение компенсированные коммутационные пластины и пластины с различной длиной по холодной и горячей сторонам ТЭ [4]. Обе конструкции требуют наличия увеличенных зазоров между ветвями ТЭ, что приводит к росту величины теплового потока от горячих спаев к холодным через изоляцию и уменьшает полезную холодопроизводительность.

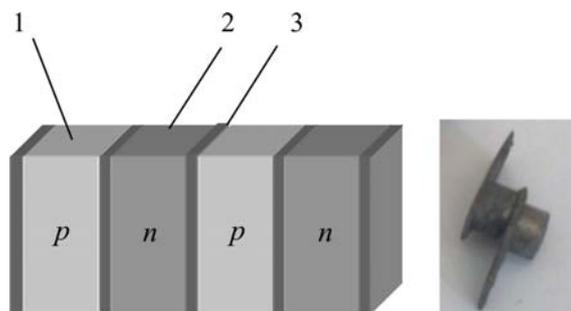


Рис. 1. Конструкция и внешний вид фрагмента слоистой ТЭБ
1 и 2 – ветви p- и n-типа, 3 – коммутационные пластины.

В данных условиях представляется целесообразным применение ТЭБ слоистых конструкций (рис.1), в которых направление электрического тока по длине ТЭ не меняется, конструкция не является жесткой, вследствие чего возникающие в ней термомеханические напряжения могут быть устранены, либо значительно снижены.

Дагестанским государственным техническим университетом запатентован ряд решений

[6-14], реализующих указанный принцип, отличающихся способом подвода и отвода теплоты к коммутационным элементам, а также некоторыми другими конструктивными особенностями.

Целью настоящей работы является разработка модели и теоретические исследования слоистого ТЭ, лежащего в основе данных технических решений, наличие которых позволит оптимизировать и определить наиболее целесообразные режимы работы последних.

Моделирование ТЭ слоистых конструкций включает в себя расчет его температурного поля и на его основе определение соответствующих термомеханических характеристик.

Моделирование теплофизических процессов и расчет температурного поля слоистого ТЭ

На практике в большинстве случаев при эксплуатации ТЭБ предусматривается ее теплоизоляция по боковой поверхности, за исключением поверхностей контакта с объектом охлаждения и системой теплосброса. Поэтому с достаточной степенью точности при моделировании ТЭ можно рассматривать двумерную задачу теплопроводности. Для данных условий расчетная схема имеет вид, соответствующий рис. 2. Области 1, 3 и 5 – коммутационные пластины, 2 и 4 – термоэлектрический материал.

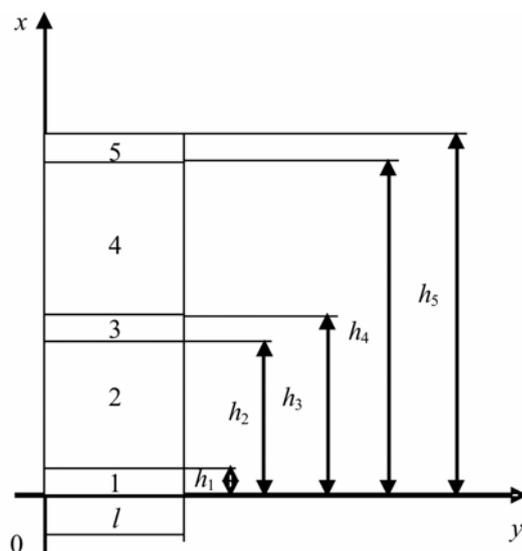


Рис. 2. Расчетная схема слоистого ТЭ.

Система дифференциальных уравнений теплопереноса для этой схемы имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + j^2 \Omega_1 &= C_1 \frac{\partial T_1}{\partial t}, \\
 \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + j^2 \Omega_2 &= C_2 \frac{\partial T_2}{\partial t}, \\
 \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial y^2} + j^2 \Omega_3 &= C_3 \frac{\partial T_3}{\partial t}, \\
 \lambda_4 \frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \lambda_4 \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2} + j^2 \Omega_4 &= C_4 \frac{\partial T_4}{\partial t}, \\
 \lambda_5 \frac{\partial^2 T_5}{\partial x^2} + \lambda_5 \frac{\partial^2 T_5}{\partial y^2} + j^2 \Omega_5 &= C_5 \frac{\partial T_5}{\partial t},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности, Ω_i – удельное электрическое сопротивление, j –

плотность электрического тока, C_i – объемная теплоемкость, T_i – температура, $i = 1, \dots, 5$, t – время.

Начальные, граничные условия и условия сопряжения следующие:

$$\begin{aligned}
 T_{1,2,3,4,5} &= T_{cp} \text{ при } t = 0, \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \beta_{mc} (T_1 - T_{mc}) \text{ при } x = 0, 0 < y < \ell, \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} &= \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} + \alpha_{12} j T_2 \text{ при } x = h_1, 0 < y < \ell, \\
 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} - \alpha_{23} j T_2 &= \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \text{ при } x = h_2, 0 < y < \ell, \\
 \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} &= \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} - \alpha_{34} j T_4 \text{ при } x = h_3, 0 < y < \ell, \\
 \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} + \alpha_{45} j T_4 &= \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x} \text{ при } x = h_4, 0 < y < \ell, \\
 \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial x} &= \beta_{mc} (T_5 - T_{mc}) \text{ при } x = h_5, 0 < y < \ell, \\
 \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} &= \beta (T_1 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, 0 \leq x \leq h_1, \\
 \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} &= \beta (T_2 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, h_1 < x \leq h_2, \\
 \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial y} &= \beta (T_3 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, h_2 < x \leq h_3, \\
 \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} &= \beta (T_4 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, h_3 < x \leq h_4, \\
 \lambda_5 \frac{\partial T_5}{\partial y} &= \beta (T_5 - T_{cp}) \text{ при } y = 0 \text{ и } \ell, h_4 < x \leq h_5,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где T_{cp} – температура окружающей среды, α – коэффициент термоЭДС, β – коэффициент теплообмена с окружающей средой, β_{mc} – коэффициент теплообмена с системой теплосброса, T_{mc} – температура системы теплосброса.

Для решения системы уравнений (1) с соответствующими начальными и граничными условиями (2) использован метод конечных элементов.

На рис. 3, 4 приводятся соответственно двумерное температурное поле слоистого ТЭ, а также распределение плотности теплового потока после выхода его на стационарный режим работы. В качестве исходных данных использовались: $\lambda_1 = \lambda_3 = \lambda_5 = 395$ Вт/(м·К), $\lambda_2 = \lambda_4 = 1.5$ Вт/(м·К), $\rho_1 = \rho_3 = \rho_5 = 0.0172 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, $\rho_2 = \rho_4 = 10.65 \cdot 10^{-6}$ Ом·м, $C_1 = C_3 = C_5 = 383$ Дж/(кг·К), $C_2 = C_4 = 123$ Дж/(кг·К), $T_{cp} = 293$ К, $T_0 = 291$ К, $\alpha = 0.2 \cdot 10^{-3}$ В/К, $\beta = 10$ Вт/(м²·К), $T_{mc} = 291$ К, $\beta_{mc} = 70$ Вт/(м²·К).

Величина теплового потока определялась из соотношения:

$$F_{xi} = \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x}, F_{yi} = \lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y}, \text{ где } i = 1, \dots, 5.$$

На рис. 5–6 показано соответственно распределение температуры ТЭ вдоль его продольной оси при различной величине тока питания, а также изменение во времени

температуры в различных точках слоистого ТЭ.

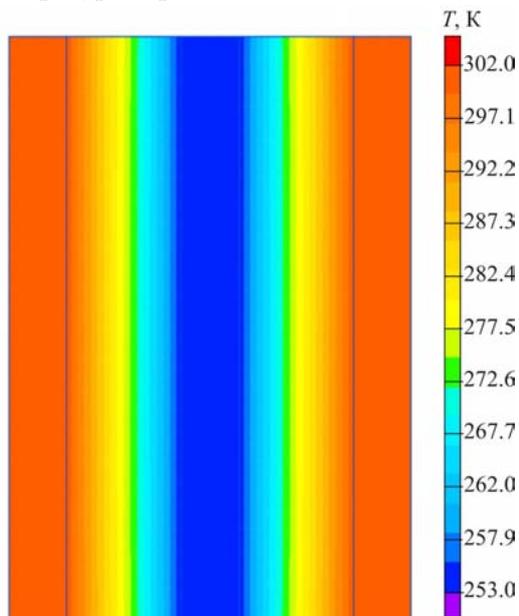


Рис. 3. Температурное поле слоистого ТЭ

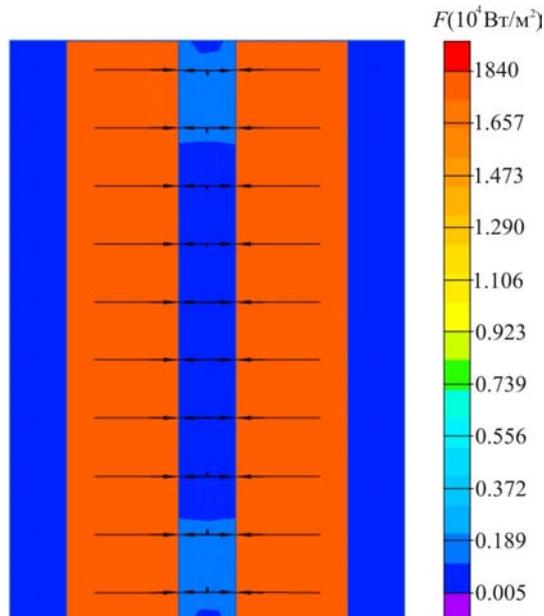


Рис. 4. Картина распределения тепловых потоков в слоистом ТЭ

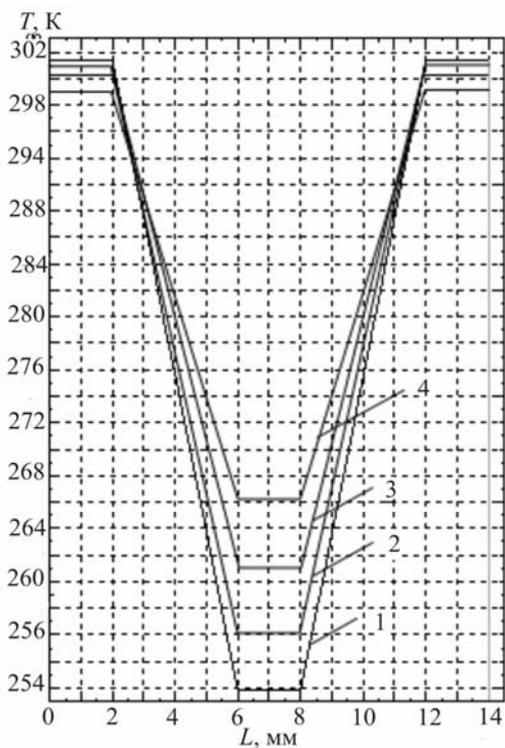


Рис. 5. Распределение температуры ТЭ вдоль продольной оси слоистого ТЭ при различной величине тока питания: 1 – 140 А, 2 – 120 А, 3 – 100 А, 4 – 80 А

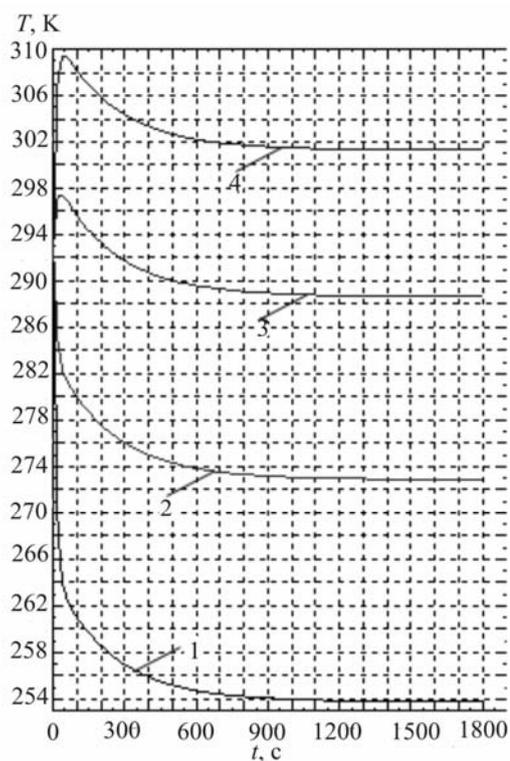


Рис. 6. Изменение температуры в различных точках слоистого ТЭ вдоль продольной оси во времени: 1 – холодная коммутационная пластина, 2 – ветвь ТЭ на расстоянии 1.5 мм от холодной коммутационной пластины, 3 – ветвь ТЭ на расстоянии 1.5 мм от горячей коммутационной пластины, 4 – горячая коммутационная пластина.

Как следует из полученных данных, при использовании ТЭ в слоистом исполнении можно получить значительный перепад температур между холодной и горячей коммутационной пластиной при большой величине теплового потока. Так, при перепаде температур между коммутационными пластинами в 47 К тепловой поток на холодном спае ТЭ, пропорциональный его холодопроизводительности, составляет порядка 18000 Вт/м², что соответствует при данной геометрии ТЭ току питания в 140 А. С уменьшением величины питающего электрического тока значение теплового потока на холодном спае ТЭ и перепад температур между его спаями также уменьшаются. При этом снижении тока питания ТЭ с 140 А до 80 А уменьшает перепад температур между спаями ТЭ с 47 К до 31 К, соответственно тепловой поток на холодном спае уменьшается с 18000 Вт/м² до 12000 Вт/м².

На рис. 6 приведены данные об изменении температуры холодной и горячей коммутационной пластин, а также различных точек ветви ТЭ во времени при токе питания 140 А. Согласно приведенным данным, температура в указанных точках выходит на установившийся режим примерно через 900 с. Данное обстоятельство связано с достаточно большими габаритными размерами ТЭ. При толщине коммутационных пластин 2 мм и высоте ветвей ТЭ 4 мм площадь поперечного сечения равняется 400 10⁻⁶ м². При этом, как следует из расчетных данных, целесообразным будет предусмотреть съём теплоты не только с горячих коммутационных пластин, но и также с близлежащей к ним поверхности ветвей ТЭ. В данном конструктивном исполнении может быть предложен дополнительный теплосъём примерно с 1/3 боковой поверхности ТЭ.

Моделирование термомеханических процессов в ТЭ слоистой конструкции

Для оценки термомеханических характеристик ТЭ слоистой конструкции был произведен расчет возникающих в нем механических напряжений и деформаций, являющихся следствием теплового расширения материалов.

Соотношения между механическими напряжениями σ_x , σ_y , τ_{xy} и деформациями ε_x и ε_y имеют вид (соотношения Дюгамеля-Неймана):

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y) + \gamma T,$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x) + \gamma T,$$

$$\gamma_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E}\tau_{xy},$$

где E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуансона, γ – коэффициент линейного расширения, индексы x , y , xy определяют направление действия величин, при этом индекс xy означает действие величин по диагонали.

Деформация ε_z определяется с помощью ε_x и ε_y по формуле

$$\varepsilon_z = \frac{\nu}{\nu-1}(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + \frac{1+\nu}{1-\nu}\gamma T.$$

При решении плоской задачи термоупругости в напряжениях в качестве неизвестных принимаются величины σ_x , σ_y и τ_{xy} .

В случае плоского напряженного состояния можно записать

$$\nabla^2(\sigma_x + \sigma_y) + E\gamma\nabla^2 T = 0.$$

Частное решение задачи термоупругости имеет вид:

$$\sigma_x^{(T)} = -2G \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2}, \quad \sigma_y^{(T)} = -2G \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}, \quad \tau_{xy}^{(T)} = 2G \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y}, \quad (3)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$

Для случая плоского напряженного состояния имеем

$$\nabla^2 \Phi = (1+\nu)\alpha T, \quad (4)$$

где Φ – термоупругий потенциал перемещений.

Для стационарных температурных полей:

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0,$$

поэтому, применив оператор ∇^2 к уравнению (4), можно получить

$$\nabla^2 \nabla^2 \Phi = \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \Phi}{\partial y^4} = 0. \quad (5)$$

Таким образом, если из уравнения (5) определен термоупругий потенциал перемещений Φ , то напряжения находятся простым дифференцированием в соответствии с формулой (3).

В связи с тем, что упругий потенциал перемещений дает лишь частное решение, полученные с его помощью напряжения (3) в общем случае не будут удовлетворять однородным граничным условиям.

Следовательно, чтобы граница была свободна от внешних воздействий, надо наложить такое решение уравнений теории упругости, которое на поверхности тела будет давать значения напряжений, равные по величине и противоположные по знаку тем, которые следуют из равенства (3).

Решение такой задачи можно найти через функцию напряжений Эри по формулам:

$$\sigma_x^{(P)} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}, \quad \sigma_y^{(P)} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}, \quad \tau_{xy}^{(P)} = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}, \quad (6)$$

где φ – бигармоническая функция.

Окончательное решение термоупругой задачи может быть получено суммированием выражений (3) и (6):

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_x^{(T)} + \sigma_x^{(P)} = \frac{\partial^2 (\varphi - 2G\Phi)}{\partial y^2}, \\ \sigma_y &= \sigma_y^{(T)} + \sigma_y^{(P)} = \frac{\partial^2 (\varphi - 2G\Phi)}{\partial x^2}, \\ \tau_{xy} &= \tau_{xy}^{(T)} + \tau_{xy}^{(P)} = \frac{\partial^2 (2G\Phi - \varphi)}{\partial x \partial y}. \end{aligned}$$

Введя функцию напряжений Эри, связанную с напряжениями σ_x , σ_y , τ_{xy} формулами, аналогичными (6), и подставив их в (5), получим

$$\nabla^2 \nabla^2 \varphi + E\alpha \nabla^2 T = 0.$$

Общее решение данного уравнения можно представить в виде

$$\varphi = \varphi^{(P)} + \varphi^{(T)},$$

где $\varphi^{(P)}$ – общее решение бигармонического уравнения

$$\nabla^2 \nabla^2 \varphi^{(P)} = 0,$$

а $\varphi^{(T)}$ – частное решение уравнения

$$\nabla^2 \varphi^{(T)} + E\alpha \nabla^2 T = 0.$$

Решение уравнений термоупругости совместно с граничными условиями, определяющими наличие по всем граням системы нулевого нормального давления, распределение температуры, определяемое при решении уравнений (1)-(2), дает возможность получить двумерную картину механических напряжений, деформаций и перемещений.

Результаты вычислений приведены на рис. 7-8. Расчеты выполнены при следующих исходных данных: $E = 1.2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$, $\nu = 0.3$, $\gamma = 22.2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$ для термоэлектрического материала и $E = 1.2 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$, $\nu = 0.34$, $\gamma = 16.8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/К}$ для медных коммутационных пластин [15]. Предел прочности термоэлектрического материала составляет $1.0 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$, коммутационных пластин – $3.2 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$.

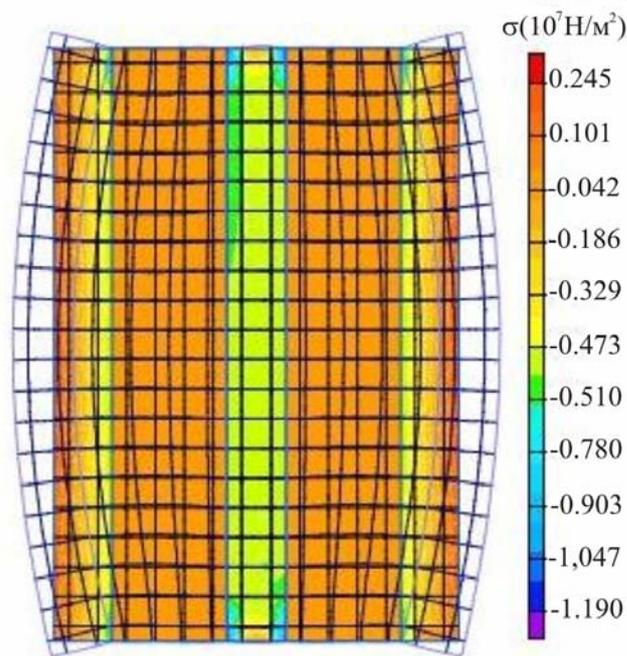


Рис. 7. Картина распределения механических напряжений в слоистом ТЭ

На рис. 7 показано двумерное поле механических напряжений для слоистого ТЭ при токе питания 120 А, что соответствует величине теплового потока 16000 Вт/м^2 . Как следует из приведенных данных, для указанного конструктивного исполнения ТЭ величина механических напряжений не выходит за допустимые значения. Наибольшая нагрузка приходится на места контакта коммутационных пластин с ветвями ТЭ. Здесь величина механической нагрузки достигает значения $0.9 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$ для коммутационной пластины. Наибольшие механические напряжения в термоэлектрическом веществе не превышают $0.2 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2$. На рис. 7 также отображена деформированная граница ТЭ. Как следует из рисунка, в случае слоистой конструкции ТЭ деформации относительно незначительны и связаны, прежде всего, с удлинением и расширением ТЭ с боков, что объясняется отсутствием его жесткой фиксации по

краям. При этом максимальная величина перемещений согласно расчетным данным не превышает 0.18 мм.

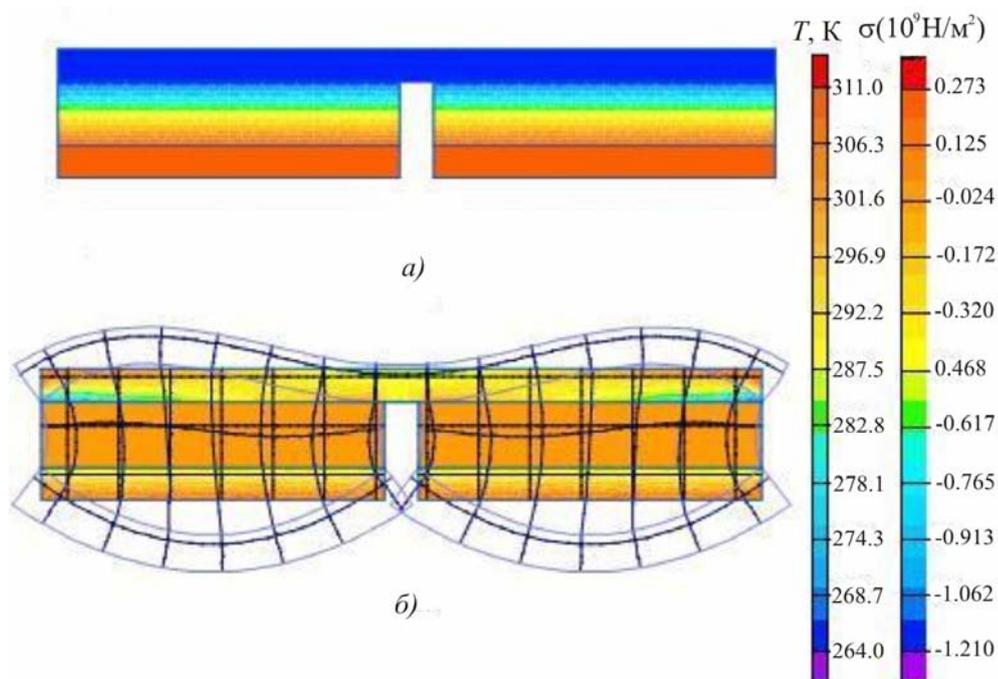


Рис. 8. Температурное поле (а) и поле механических напряжений (б) классической П-образной конструкции ТЭ.

Для сравнения на рис. 8 рассмотрена картина механических напряжений при тех же условиях для классического П-образного ТЭ. В данном случае деформации достаточно велики, и при величине тока питания 120 А без применения специальных мер по снижению термомеханических нагрузок механические усилия превышают соответствующий предел прочности материала. Например, для коммутационных пластин в стыке с ветвью ТЭ значение механических напряжений свыше $7 \cdot 10^8$ Н/м², что более чем в 2 раза превышает величину предела прочности меди, для термоэлектрического материала соотношение механических нагрузок и предела прочности в данном случае еще выше. При этом в соответствии с проведенными расчетами установлено, что для данной конструкции ТЭ наибольшим током питания без превышения допустимого значения механических нагрузок в системе является электрический ток, не превышающий величины 82 А, т.е. почти в 1.7 раза меньше, чем в случае использования слоистого ТЭ, для которого максимальная величина тока питания по расчетам составляет 140 А.

Выводы

На основе проведенных исследований могут быть сделаны следующие выводы:

1. При проектировании относительно мощных малогабаритных холодильных систем на основе ТЭБ возникают сложности в обеспечении надежности их работы. При этом в случае использования слаботочных ТЭБ на надежность влияет большое количество ТЭ, а в случае сильноточных ТЭБ – наличие существенных термомеханических напряжений.
2. Для уменьшения величины термомеханических напряжений и деформаций в сильноточных ТЭБ целесообразным является их конструктивное исполнение в виде слоистой структуры, в

которой направление электрического тока и теплового потока совпадают.

3. Моделирование слоистого ТЭ включает в себя расчет его температурного поля и на его основе определение соответствующих термомеханических характеристик. При этом расчет температурного поля слоистого ТЭ произведен на основе решения нестационарного уравнения теплопроводности для многослойной системы, а определение механических напряжений и деформаций осуществлено соответственно при решении уравнений равновесия, сплошности и Дюгамеля-Неймана численным методом конечных элементов.
4. Результаты теоретических исследований для слоистого термоэлемента показали его несомненные преимущества перед классическим П-образным в части термомеханических характеристик при больших токах питания.

Литература

1. Анатычук Л.И. Термоэлектричество. Термоэлектрические преобразователи энергии. – Киев, Черновцы: Институт термоэлектричества, 2003.
2. Анатычук Л.И. Элементная база термоэлектричества // Доклады IX Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение». – Санкт-Петербург, 2004.
3. Анатычук Л.И. О физических моделях термоэлементов // Термоэлектричество. – 2003, – №1. – С. 5-17.
4. Поздняков Б.С., Коктейлев Е.А. Термоэлектрическая энергетика. – М.: Атомиздат, 1974.
5. Малкович Б.Е.-Ш. Термоэлектрические модули на основе сплавов теллурида висмута // Доклады XI Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение». – Санкт-Петербург, 2008.
6. Патент РФ № 2280919. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В., 2006.
7. Патент РФ № 2280920. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В., 2006.
8. Патент РФ № 2280921. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В., 2006.
9. Патент РФ № 2270495. Способ обеспечения функционирования термоэлектрической батареи / Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В., 2006.
10. Патент РФ №2335036. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., 2008.
11. Патент РФ № 2357330. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Вердиев М.Г., Евдулов О.В., 2009.
12. Патент РФ № 2380787. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., 2010.
13. Патент РФ № 2379790. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., 2010.
14. Патент РФ № 2417484. Термоэлектрическая батарея / Исмаилов Т.А., Евдулов О.В., Евдулов Д.В., 2011.
15. Воронин А.И., Осилков А.С., Горбатовская Т.А. К вопросу о механической прочности ветвей термоэлементов на основе Bi_2Te_3 // Доклады XI Межгосударственного семинара «Термоэлектрики и их применение». – Санкт-Петербург, 2008.

Поступила в редакцию 14.04.2015.