

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ (05.04.00)

УДК 621.365

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-8-16

Исследование интегральных характеристик охлаждающей системы с термоэлектрическим модулем

В.С. Волгин, А.Ф. Гиневский

Термоэлектрический модуль (ТЭМ) — устройство, с помощью которого можно реализовать как термоэлектрическое охлаждение за счет эффекта Пельтье, так и генерацию электричества с помощью эффекта Зеебека. В первом случае происходит прямое преобразование энергии из электрической в тепловую, а во втором обратное — из тепловой в электрическую.

В связи с недавними успехами в создании новых термоэлектрических наноструктурных материалов со значительно лучшими по сравнению с объемными материалами характеристиками, возрос интерес к термоэлектрическому охлаждению и генерации электричества.

При разработке термоэлектрических систем применяются специальные инженерные методики расчета. Однако они успешно используются только для некоторых простых конструкций. Если конструкция термоэлектрического устройства нетривиальна, то приходится добавлять некоторые приближения для конструкции, что сильно снижает точность результата. Инженерные методики расчета параметров и интегральных характеристик ТЭМ имеют большое число упрощений и недостатков, из-за этого расчетные интегральные характеристики ТЭМ могут существенно отличаться от реальных. В области термоэлектрических устройств численное моделирование необходимо для решения различных задач, в том числе для изучения и оценки перспективных конструкций термоэлектрических приборов.

Представлена математическая модель охлаждающей системы с термоэлектрическими модулями. Получено численное решение уравнений сопряженного теплообмена, описывающих работу системы охлаждения. Показано, что на параметры работы ТЭМ влияет множество факторов, которые важно учитывать при расчете распределения температуры, а интегральные параметры работы ТЭМ в реальных условиях могут значительно отличаться от рассчитанных по стандартным инженерным методикам. Благодаря внедрению строгого математического моделирования представленная модель позволяет рассчитать параметры и интегральные характеристики ТЭМ в условиях их реального функционирования.

Ключевые слова: эффект Пельтье, термоэлектрический модуль, интегральные характеристики, численное моделирование.

Для цитирования: Волгин В.С., Гиневский А.Ф. Исследование интегральных характеристик охлаждающей системы с термоэлектрическим модулем // Вестник МЭИ. 2018. № 4. С. 8—16. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-8-16.

Studying the Integral Characteristics of a Cooling System Equipped with a Thermoelectric Module

V.S. Volgin, A.F. Ginevsky

Thermoelectric modules (TEM) are devices using which it is possible to implement either thermoelectric cooling due to the Peltier effect or electricity generation due to the Seebeck effect. In the first case, electric energy is directly converted into thermal energy, and in the second case, thermal energy is converted into electricity.

Recent advances in the development of new thermoelectric nanostructured materials with characteristics significantly better than those found in bulk ones, prompted an increased interest in cooling and electricity generation through the use of thermoelectric devices.

Special engineering design techniques are used in developing thermoelectric systems. However, such techniques only yield successful results for some simple designs. If the design of a thermoelectric device is non-trivial, some approximations have to be applied for the design, which seriously affects the accuracy of the result. The existing engineering methods for calculating the parameters and integral characteristics of TEMs involve a large number of simplifications and shortcomings, due to which the calculated integral characteristics of a TEM can differ significantly from their actual ones. In the field of thermoelectric devices, numerical simulation has to be used to solve various problems, in particular, for studying and evaluating promising designs of thermoelectric devices.

The article presents the mathematical model of a cooling system equipped with TEMs. Numerical solution of the conjugate heat transfer equations describing the cooling system operation is obtained. It is shown that the TEM operating parameters are influenced by a number of factors that should preferably be taken into account in temperature distribution calculations. It is also shown that under real conditions the integral TEM operation parameters may differ considerably from those calculated according to the standard engineering procedures. Owing to its containing a rigorous body of mathematics, the developed model makes it possible to calculate the TEM parameters and integral characteristics under the real conditions of their operation.

Key words: Peltier effect, thermoelectric module, integral characteristics, numerical simulation.

For citation: Volgin V.S., Ginevsky A.F. Studying the Integral Characteristics of a Cooling System Equipped with a Thermoelectric Module. MPEI Vestnik. 2018;4:8—16. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-8-16.

Введение

Последние исследования применения наноструктурных термоэлектрических полупроводниковых материалов предвещают значительное улучшение добротности ZT

$$ZT = -\frac{\alpha^2}{\lambda\rho},$$

где Z — коэффициент Иоффе; T — средняя температура термоэлемента, К; α — коэффициент Зеебека термопары, В/К; λ — коэффициент теплопроводности термоэлектрического материала, Вт/(м·К); ρ — удельное электрическое сопротивление термоэлектрического материала, Ом·м.

В настоящее время добротность промышленных термоэлектрических материалов не превышает $ZT = 1$, тогда как для конкурентоспособности термоэлектрического преобразования энергии необходимы величины $ZT = 3$ [1]. Исследователи в лабораториях вплотную приблизились к этому значению. Так, многослойная структура на основе Bi_2Te_3 и Sb_2Te_3 благодаря рассеянию фононов вдоль направления тока имеет крайне низкую теплопроводность 0,22 Вт/(м·К), за счет чего достигается добротность $ZT = 2,5$ [2]. Благодаря применению зонной инженерии в структурах с p -проводимостью на основе PbTe удалось увеличить электронную и снизить фононную теплопроводности, что позволило получить $ZT = 2,2$ [3]. Оксидные структуры на основе кальция, которые за счет своей устойчивости могут использоваться в агрессивных средах, показывают результаты $ZT = 1,2...2,7$ для Ca-349 [4]. В [5] представлено исследование свойств кристалла SnSe , который при 923К продемонстрировал $ZT = 2,6$.

Применение новых материалов открывает огромные перспективы развития направления термоэлектрического охлаждения, а также увеличивает потенциал применения устройств, основанных на работе данного эффекта. Таким образом, становятся доступны новые варианты использования термоэлектрических преобразователей.

В связи с тем, что прототипы устройств на базе новых материалов зачастую собрать пока невозможно, в исследовании практического применения создаваемых материалов поможет математическое моделирование.

Следует отметить, что в большинстве случаев расчет ТЭМ для конкретных задач проводится с помощью инженерных методик, которые имеют ряд серьезных недостатков и упрощений, оказывающих сильное влияние на точность получаемых результатов. Они базируются на решении одномерной задачи теплопроводности [6] и в них при расчете параметров используются усредненные значения температур на спаях. Однако следует учитывать, что каждая термопара в модуле при работе имеет свои значения температуры горячего и холодного спаев и, соответственно, свои, отличающиеся от других, значения холодопроизводительности и тепловыделения, а также вносит разный вклад в интегральные значения, поэтому для более точного определения интегральных характеристик всего устройства, использующего ТЭМ, следует решать трехмерную задачу теплопроводности. В инженерных методиках ТЭМ рассчитывается без учета влияния других элементов системы, не учитываются их конструктивные особенности, размеры и распределение температуры, а также не учитываются или учитываются частично элементы ТЭМ, вносящие паразитные перепады температур: керамические пластины, интерфейсы, контактные сопротивления, слои термопасты, не принимается во внимание теплообмен с окружающей средой поверхностей элементов конструкции. Все перечисленные факторы существенно влияют на конечный результат расчета рабочих параметров как ТЭМ, так и всей конструкции.

Для исследования новых областей применения термоэлектрических модулей нужны методики, позволяющие правильно рассчитывать режим работы и интегральные характеристики термоэлектрических преобразователей, свободные от недостатков инженерных методик. Для этого эффективны численные методы расчета, основанные на решении трехмерной задачи сопряженного теплообмена.

В области термоэлектрических устройств численное моделирование успешно применяется для решения поставленных задач. Его используют для изучения и оценки перспективных конструкций термоэлектрических генераторов электроэнергии [7]. Ряд исследователей используют численное моделирование для изучения работы микротермоэлектрических охладителей, которые планируется применять для решения проблемы так называемых «горячих точек» [8]. С помощью моделирования можно исследовать процессы, протекающие в модуле, например тепловые потери ТЭМ [9]. Таким образом, с помощью численного моделирования можно решать огромный спектр задач.

Цель настоящей работы заключается в представлении трехмерной математической модели ТЭМ и сопряженного теплообмена и сравнении численной и инженерной методик расчета в рамках исследования новой области применения термоэлектрического охлаждения. Помимо этого, необходима оценка целесообразности применения ТЭМ в данной области.

В качестве варианта использования термоэлектрического охлаждения было выбрано охлаждение центрального процессора (ЦП) в персональном компьютере. Благодаря своей компактности и отсутствию движущихся частей подобное использование ТЭМ вполне обосновано. В качестве расчетного пакета использован PHOENICS.

Математическая модель

Объект исследований — система, состоящая из ЦП, ТЭМ и радиатора, необходимого для охлаждения горячего спая ТЭМ. Радиатор обдувается сверху потоком воздуха с заданной скоростью, ТЭМ состоит из последовательно соединенных парных термоэлектрических элементов (ПТЭ), каждый из которых содержит полупроводниковые *p*- и *n*-ветви, соединенные медным проводником. При прохождении электрического тока, на спае ПТЭ наблюдается эффект Пельтье. Он заключается в том, что при прохождении электрического тока на одной стороне элемента тепло выделяется, а на другой — поглощается. Парные термоэлектрические элементы сконструированы так, что спаи, на которых происходит поглощение тепла, обращены в одну сторону, а те, на которых происходит выделение теплоты, — в другую. Спаи, поглощающие тепло, образуют «холодную» сторону модуля, а выделяющие тепло — «горячую» сторону. Сверху и снизу ТЭМ находятся керамические электрические изоляторы, к которым с помощью интерфейса крепятся цепочки ПТЭ. Схема конструкции ТЭМ представлена на рис. 1.

Особенность охлаждения процессора заключается в том, что источник тепловыделения находится внутри процессора на поверхности кристалла, площадь которого составляет около 10 % от площади всего процессора. Пластинку с кристаллом покрывает теплораспределительная крышка из металла с высокой

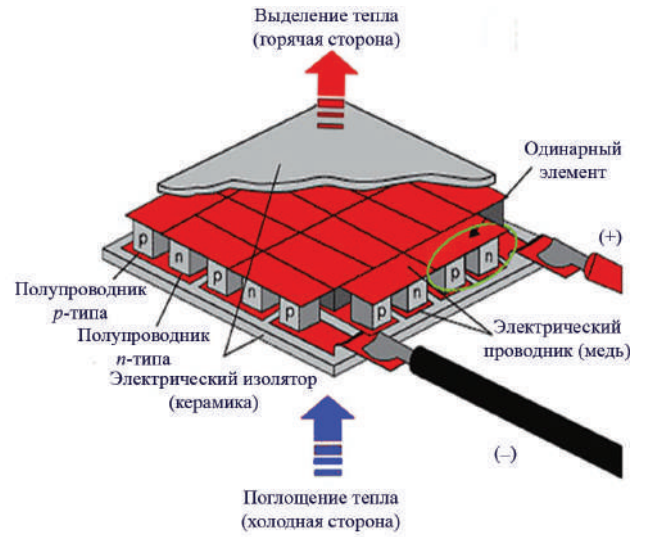


Рис. 1. Схема термоэлектрического модуля

теплопроводностью для того, чтобы тепловое пятно от кристалла растекалось на большую площадь.

Рассмотрим стационарный режим работы системы. Опишем тепловые процессы, происходящие в твердых элементах системы. Тепло переносится за счет теплопроводности, поэтому теплоперенос в твердых элементах конструкции описывается трехмерным стационарным уравнением:

$$\lambda \nabla^2 T(x, y, z) + q_v = 0.$$

Если в элементе не происходит тепловыделение, то $q_v = 0$.

В ветвях термоэлементов и проводниках, где имеются источники и стоки тепла, уравнения теплопроводности для *n/p*-ветвей термоэлементов и проводников имеют следующий вид:

$$\lambda_n \nabla^2 T(x, y, z) + I^2 \frac{\rho_n}{a^4} = 0;$$

$$\lambda_p \nabla^2 T(x, y, z) + I^2 \frac{\rho_p}{a^4} = 0;$$

$$\lambda_{cond} \nabla^2 T(x, y, z) + I^2 \frac{\rho_{cond}}{a^2 h^2} = 0,$$

где $\lambda_{p,n}$, λ_{cond} — коэффициенты теплопроводности полупроводников *n/p*-типа и проводника, Вт/(м·К); $\rho_{p,n}$, ρ_{cond} — удельные электрические сопротивления полупроводников *n/p*-типа и проводника, Ом·м; *a* — ширина стороны ветви, м; *h* — толщина проводника, м; *I* — электрический ток, А.

Теплота Пельтье выделяется/поглощается на спае проводника и полупроводниковой ветви термоэлемента (на рис. 2 они обозначены как *S*-поверхности). Граничные условия для холодных и горячих спаев:

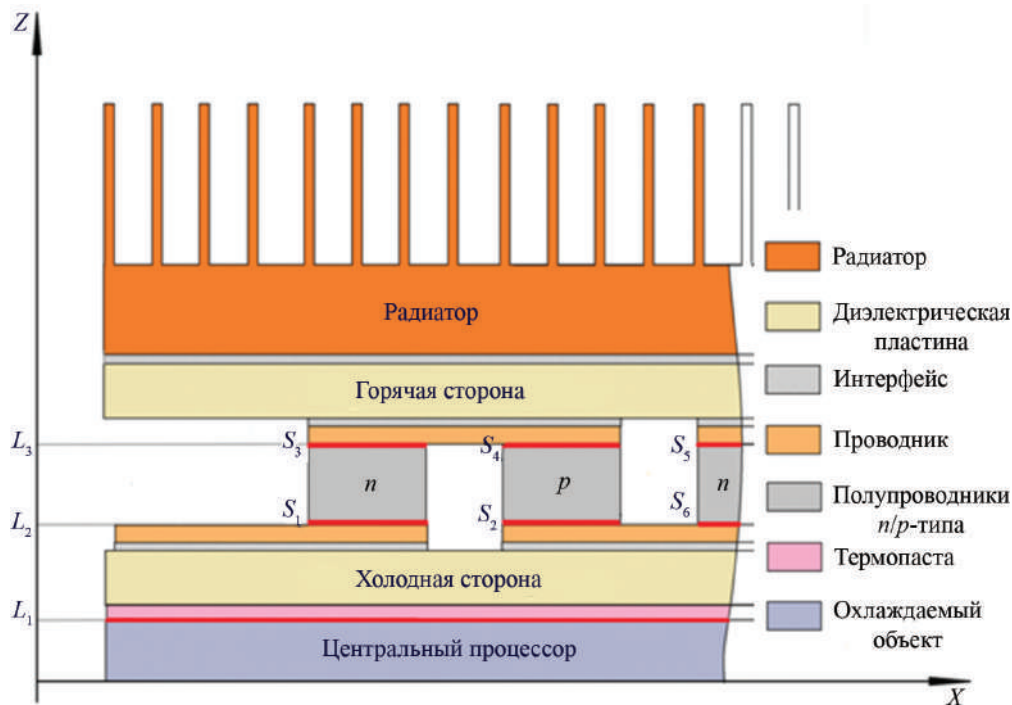


Рис. 2. Принципиальная схема системы

$$q_1 - q_2 = -\frac{\alpha T_{\text{хол}} I}{a^2};$$

$$q_1 - q_2 = \frac{\alpha T_{\text{гор}} I}{a^2},$$

где q_1, q_2 — тепловые потоки ниже и выше спаев, Вт/м²; $T_{\text{хол}}, T_{\text{гор}}$ — температуры холодного и горячего спаев, К; α — коэффициент Зеебека термопары, В/К.

Движение воздушных потоков и теплообмен в них описываются уравнениями Навье–Стокса для несжимаемой жидкости, неразрывности и энергии:

$$(\mathbf{v}\nabla)\vec{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\Delta\mathbf{v};$$

$$\text{div}(\mathbf{v}) = 0;$$

$$\text{div}(\rho C_v T - \lambda\nabla T) = 0.$$

Теплообмен конструкции с окружающей средой осуществляется по всей ее поверхности. Радиатор обдувается сверху воздушным потоком со скоростью v_0 . После прохождения через ребра радиатора поток уходит через открытые границы. Граничные условия для верхней границы и боковых поверхностей верхней части равны:

$$T = T_0; \quad v = v_z = v_0;$$

$$T = T_0; \quad P = P_0,$$

где T_0 — температура окружающей среды в начальный момент времени, К; P_0 — давление окружающей среды в начальный момент времени, Па.

Нижняя часть расчетной области, где находится ТЭМ и ЦП, изолирована от окружающей среды и за-

полнена воздухом. На твердых поверхностях выполняются условия прилипания.

Реализация математической модели в PHOENICS

Геометрия рассматриваемой системы, реализованной в PHOENICS, представлена на рис. 3. С помощью вспомогательной управляющей программы PHOENICS–Direct создан программный пакет, имеющий самостоятельный интерфейс, благодаря которому можно менять многие параметры: количество термоэлектрических элементов, размеры радиатора и скорость его обдува, редактировать размеры, материал охлаждаемого объекта и мощность тепловыделения на нем, не работая напрямую с PHOENICS. В пакете реализованы объекты, создающие дополнительное термическое сопротивление: интерфейсы, с помощью которых прикрепляются керамические пластины, слои термопасты, наносимые для хорошего контакта поверхностей и т. д.

Результаты

При проведении расчетов были использованы параметры серийной модели ТЭМ компании «Криотерм» и процессор Intel Core i5 3-го поколения. Для безопасной работы процессора необходимо, чтобы система охлаждения с ТЭМ обеспечивала температуру на кристалле не более 72 °С даже при максимальном тепловыделении, равном 84 Вт.

Первоначально параметры ТЭМ были рассчитаны с помощью инженерной методики расчета [10] при заданных температурах холодного и горячего спаев

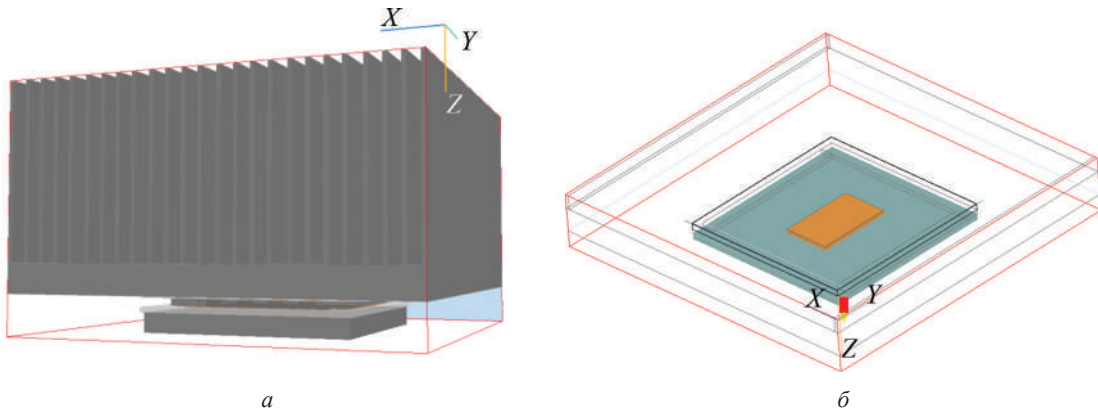


Рис. 3. Вид трехмерной модели системы (а) и реализация модели процессора (б) в PHOENICS

$T_{\text{хол}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{гор}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Согласно этим расчетам холодопроизводительность 84 Вт в ТЭМ достигается при токе 16,1 А. Исходя из принятой температуры горячего спая и тепловыделения была подобрана конструкция радиатора со следующими характеристиками: габаритные размеры — $70 \times 70 \times 35 \text{ мм}$, размеры ребра — $70 \times 30 \times 1 \text{ мм}$, межреберное расстояние — 4 мм, скорость воздуха на входе $v = 2 \text{ м/с}$. При таких параметрах число Рейнольдса равно 434, что соответствует ламинарному движению потоков воздуха. Материал радиатора — медь. Распределение температурного поля в системе, полученное в PHOENICS, изображено на рис. 4, а.

Таким образом, была получена средняя температура на поверхности кристалла ЦП $t_{\text{ЦП}} = 78,05 \text{ }^\circ\text{C}$. Это на 6° выше критической температуры работы кристалла. Средняя температура холодного спая составила $T_{\text{хол}} = 53,73 \text{ }^\circ\text{C}$, а горячего $T_{\text{гор}} = 82,47 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура ЦП, рассчитанная с помощью инженерной методики при тех же входных параметрах, что и в численном моделировании, составила $58 \text{ }^\circ\text{C}$.

Зависимости температуры процессора, полученные с помощью инженерной методики и численного моде-

лирования, от тепловыделения продемонстрированы на рис. 5, а. Как следует из графика рис. 5, а, температура ЦП, полученная с помощью численного моделирования, выше температуры, полученной с помощью инженерных методик, на десять и более градусов. Это значительная разница, которая может быть критична в зависимости от ситуации. Подобные расхождения возникли из-за конструктивных особенностей процессора, проявляющиеся в том, что лишь малая часть термопар ТЭМ соприкасаются с тепловым потоком, идущим от ЦП. Поскольку ТПЭ расположены на площадке $40 \times 40 \text{ мм}$, а кристалл имеет размеры $16 \times 10 \text{ мм}$, то лишь 10 % ТПЭ находятся непосредственно над источником тепловыделения (рис. 5, б). Пластинку с кристаллом накрывает теплопроводящая крышка из металла с высокой теплопроводностью, чтобы тепловое пятно от кристалла растекалось на большую площадь. Однако, несмотря на ее наличие, распределение температуры очень сильно отличается от равномерного.

Сравнение средних температур на холодных и горячих спаях в зависимости от величины тепловыделения на ЦПН показано на рис. 5, б. Как следует из графика рис. 5, б результаты инженерного расчета и

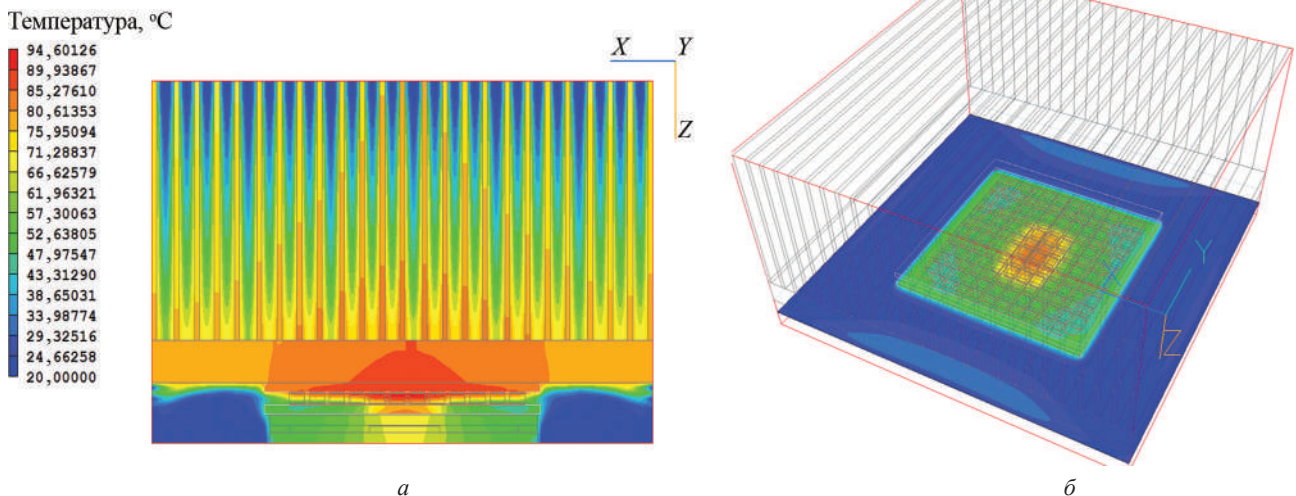


Рис. 4. Вид распределения температуры в расчетной области (а) и тепловое пятно от работы кристалла процессора (б)

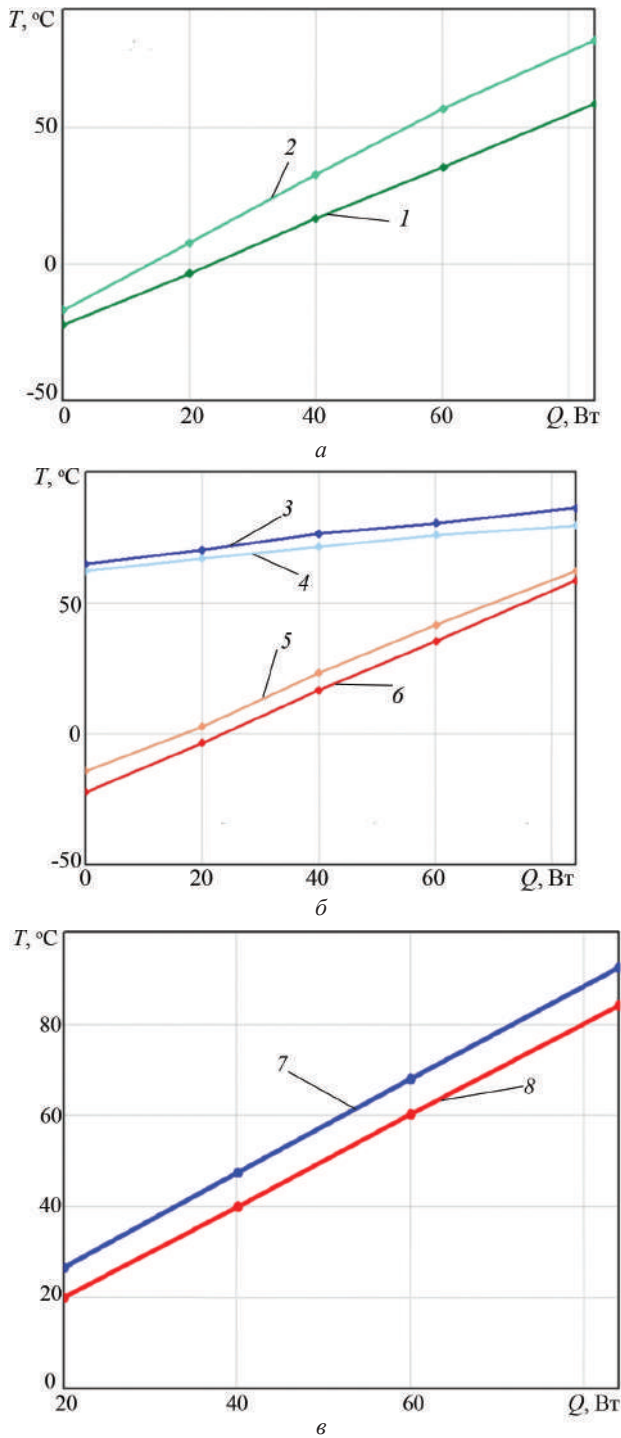


Рис. 5. Зависимости температуры процессора от тепловыделения на нем (а), температуры горячего и холодного спая от тепловыделения на процессоре (б), холодопроизводительности ТЭМ от тепловыделения на процессоре (в):

1 — средняя температура процессора (инженерный расчет);
 2 — средняя температура процессора (численная методика);
 3 — средняя температура горячего спая (инженерный расчет);
 4 — средняя температура горячего спая (численная методика);
 5 — средняя температура холодного спая (инженерный расчет);
 6 — средняя температура холодного спая (численная методика);
 7 — холодопроизводительность ТЭМ (численный метод);
 8 — холодопроизводительность ТЭМ (инженерный расчет)

численного моделирования отличаются друг от друга, хотя и наблюдается корреляция. Перепад температур при численном расчете меньше, чем при инженерном, что естественно, так как в математической модели в отличие от инженерной учитываются дополнительные тепловые сопротивления.

График, представленный на рис. 5, в, демонстрирует холодопроизводительность ТЭМ при разных уровнях тепловыделения на процессоре. В данном случае холодопроизводительность, рассчитанная по инженерной методике, ниже рассчитанной с помощью численного моделирования. Это вызвано тем, что в математической модели холодопроизводительность модуля вычисляется из суммы холодопроизводительностей каждого ПТЭ, каждый из которых имеет свои температурные режимы, вследствие неравномерности распределения теплового потока на поверхности ТЭМ.

Помимо ТЭМ в систему охлаждения входит радиатор, охлаждающий горячий спай, следовательно необходимо узнать влияние радиатора на уровень охлаждения системы.

На графиках рис. 6 видно, что при повышении скорости обдува радиатора, эффективность охлаждения ЦП повышается, причем температура ЦП при охла-

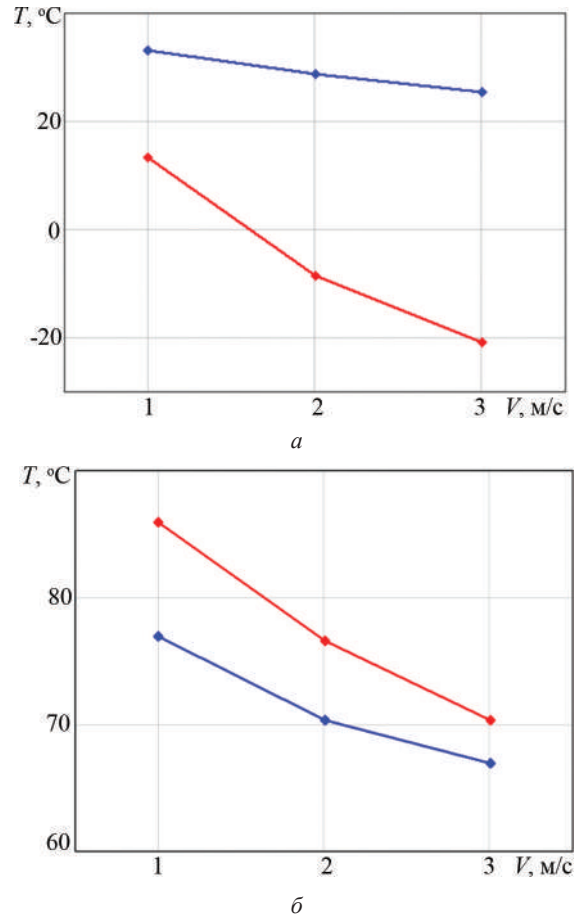


Рис. 6. Зависимость средней температуры ЦП от разных скоростей обдува радиатором при мощности тепловыделения 20 (а) и 84 Вт (б)

дении системой с ТЭМ падает больше, чем при радиаторном охлаждении. При тепловыделении на ЦП в 84 Вт система с ТЭМ справляется с охлаждением хуже, чем система без ТЭМ, однако при тепловыделении в 20 Вт ситуация меняется и система с ТЭМ опережает радиаторное охлаждение на несколько десятков градусов. Все дело в том, что чем меньше тепловая нагрузка, тем больший перепад температур способен обеспечить ТЭМ, поэтому для того, чтобы использование ТЭМ в системах охлаждения дало полезный эффект, необходимо подбирать ТЭМ с некоторым запасом в максимальной холодопроизводительности.

Рассмотрим получившееся распределение скоростей между ребер радиатора (рис. 7). Поток воздуха обдувает ребра сверху вниз и отводится через открытые области во фронтальных проекциях. На самом входе в проекции OYZ поток прямолинеен и практически не отклоняется от заданного направления, но ближе к основанию радиатора он начинает замедляться в центре и ускоряться по бокам, при этом чем ближе к фундаменту и дальше от центра по оси Y, тем более он отклоняется от своего первоначального направления. В проекции OXZ поток на входе начинает затормаживаться по краям, пока распределения не будут повторять параболу.

Исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что при применении промышленных ТЭМ параметры системы не подходят для достижения приемлемой температуры на кристалле. Единственный вариант для снижения температуры ЦП, это увеличение теплоотвода с горячего спая за счет увеличения скорости обдува. При обдуве радиатора потоком воздуха со скоростью 2,8 м/с температура ЦП достигает отметки в 71,89 °С.

Представляет интерес исследование возможности достижения рабочих параметров системы при использовании перспективных материалов, которых еще нет среди промышленных образцов. В таблицах 1 — 3 приведены результаты расчета температуры в системе с материалами, обладающими разной добротностью,

Таблица 1

Зависимость температуры центрального процессора от теплопроводности

Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	$T_{\text{ЦП}}$, °С
1,3183 ($ZT = 1$)	71,89
0,66 ($ZT = 2$)	65,41
0,44 ($ZT = 3$)	63,12

Таблица 2

Зависимость температуры центрального процессора от удельного сопротивления

Удельное сопротивление $\rho \times 10^{-6}$, Ом/м	$T_{\text{ЦП}}$, °С
9,62 ($ZT = 1$)	71,89
4,81 ($ZT = 2$)	60,95
3,20 ($ZT = 3$)	53,28

Таблица 3

Зависимость температуры центрального процессора от коэффициента Зеебека

Коэффициент Зеебека $\alpha \times 10^{-6}$ В/К	$T_{\text{ЦП}}$, °С
195 ($ZT = 1,0$)	71,89
243 ($ZT = 1,5$)	46,14
292,5 ($ZT = 2,0$)	27,34

при скорости обдува 2,8 м/с. Добиться повышения добротности можно за счет уменьшения теплопроводности, увеличения коэффициента Зеебека или снижения электрического сопротивления термоэлектрического материала. При использовании более эффективных материалов можно получить значительное увеличение эффективности охлаждения процессора. Влияние параметров, входящих в определение добротности, различно. За счет увеличения коэффициента Зеебека уда-

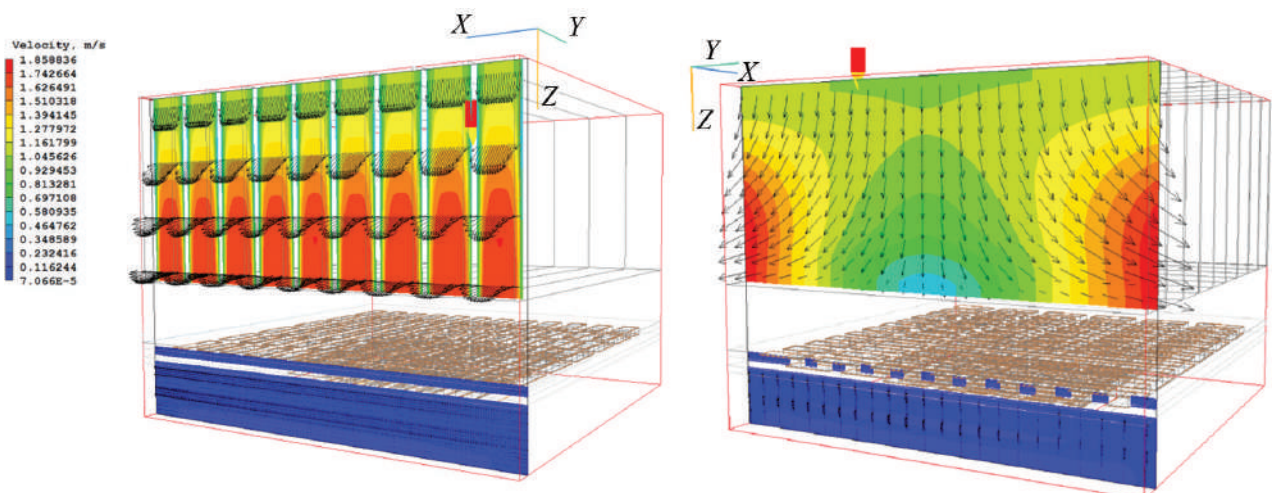


Рис. 7. Распределение скоростей потоков воздуха в плоскостях OXZ (а) и OYZ (б)

ется получить наибольший эффект, вызвано это тем, что от этого коэффициента напрямую зависит величина поглощаемого тепла эффекта Пельтье.

Заключение

В рамках исследования интегральных характеристик термоэлектрических охлаждающих модулей рассмотрены факторы, влияющие на теплообмен в ТЭМ и разработана численная модель, основанная на решении трехмерной задачи сопряженного теплообмена. Получено распределение температурного поля в ТЭМ и рассчитаны его интегральные характеристики. На основе полученных результатов сделаны следующие выводы:

— перепад температур холодного и горячего спаев при численном расчете в среднем меньше, чем при расчете с помощью инженерной методики;

— температура на кристалле процессора в численном эксперименте превысила критическую и оказалась на несколько десятков градусов выше, чем при расчете инженерной методикой;

— при сравнении интегральной холодопроизводительности модуля численной и инженерной методиками видно, что при численной она выше, так как температура холодного спаев выше;

— при повышении скорости обдува радиатора эффективность охлаждения ЦП повышается, а в случае системы с ТЭМ она повышается больше, чем при собственно воздушном охлаждении;

— для того, чтобы использование ТЭМ в системе охлаждения ЦП давало полезный эффект по сравнению с только радиаторным охлаждением необходимо подбирать ТЭМ с максимальной холодопроизводительностью, несколько большей, чем тепловыделение на охлаждаемом объекте;

— использование материалов с высокой добротностью заметно увеличивает эффективность охлаждения;

— параметры, входящие в определение добротности, имеют разную степень влияния на интегральные характеристики системы. Наибольшее влияние оказывает коэффициент Зеебека.

Таким образом, расчет с помощью инженерных методик имеет значительные отклонения от реальных значений. Численная методика расчета, основывающаяся на прямом математическом моделировании с описанием сопряженного теплообмена, показывает более точную, приближенную к реальности картину.

Литература

1. **Vineis C.J., Shakouri A., Majumdar A.** Nanostructured Thermoelectrics: Big Efficiency Gains from Small Features // *Adv. Mater.* 2010. V. 22:3970—3980.

2. **Venkatasubramanian R., Siivola E., Colpitts T.** Thin-film Thermoelectric Devices with High Room-temperature Figures of Merit // *Nature.* 2001. V. 413 (6856):597—602.

3. **Biswas K., Blum I., Hogan T.** High-performance Bulk Thermoelectrics with All-scale Hierarchical Architectures. *Nature.* 2012. V. 489:414—418.

4. **Funahashi R., Matsubara I., Ikut H.** An Oxide Single Crystal with High Thermoelectric Performance in Air // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2000. V. 39:1127.

5. **Li-Dong Zhao e. a.** Ultralow Thermal Conductivity and High Thermoelectric Figure of Merit in SnSe Crystals // *Nature.* 2014. V. 508:373—377.

6. **Sandoz-Rosado E., Stevens R.J.** Experimental Characterization of Thermoelectric Modules and Comparison with Theoretical Models for Power Generation // *J. Electronic Materials.* 2009. V. 38. No. 7:1239—1244.

7. **Jieyi Long, Memik S.O., Grayson M.** Optimization of an On-chip Active Cooling System Based on Thin-film Thermoelectric Coolers // *Proc. Electrical Eng. and Computer Sci. Conf. Dresden, 2010:117—122.*

8. **Wang P., Bar-Cohen A., Yang B.** Analytical Modeling of Silicon Thermoelectric Microcooler // *J. Appl. Phys.* 2006. V. 100:014501.

9. **Bjørk R., Christensen D.V., Eriksen, D., Pryds N.** Analysis of the Internal Heat Losses in a Thermoelectric Generator // *Intern. J. Thermal Sci.* 2014. V. 85:12—20.

10. **Булат Л.П., Бузин Е.В.** Термоэлектрические охлаждающие устройства. СПб.: СПбГУНИИПТ, 2001.

References

1. **Vineis C.J., Shakouri A., Majumdar A.** Nanostructured Thermoelectrics: Big Efficiency Gains from Small Features. *Adv. Mater.* 2010;22:3970—3980.

2. **Venkatasubramanian R., Siivola E., Colpitts T.** Thin-film Thermoelectric Devices with High Room-temperature Figures of Merit. *Nature.* 2001;413 (6856):597—602.

3. **Biswas K., Blum I., Hogan T.** High-performance Bulk Thermoelectrics with All-scale Hierarchical Architectures. *Nature.* 2012;489:414—418.

4. **Funahashi R., Matsubara I., Ikut H.** An Oxide Single Crystal with High Thermoelectric Performance in Air. *Jpn. J. Appl. Phys.* 2000;39:1127.

5. **Li-Dong Zhao e. a.** Ultralow Thermal Conductivity and High Thermoelectric Figure of Merit in SnSe Crystals. *Nature.* 2014;508:373—377.

6. **Sandoz-Rosado E., Stevens R.J.** Experimental Characterization of Thermoelectric Modules and Comparison with Theoretical Models for Power Generation. *J. Electronic Materials.* 2009;38;7:1239—1244.

7. **Jieyi Long, Memik S.O., Grayson M.** Optimization of an On-chip Active Cooling System Based on Thin-film Thermoelectric Coolers. *Proc. Electrical Eng. and Computer Sci. Conf. Dresden, 2010:117—122.*

8. **Wang P., Bar-Cohen A., Yang B.** Analytical Modeling of Silicon Thermoelectric Microcooler. *J. Appl. Phys.* 2006;100:014501.

9. Bjørk R., Christensen D.V., Eriksen, D., Pryds N. Analysis of the Internal Heat Losses in a Thermoelectric Generator. Intern. J. Thermal Sci. 2014;85:12—20.

10. Bulat L.P., Buzin E.V. Termoelektricheskie Ohlazhdayushchie Ustroystva. SPb.: SPbGUNIPT, 2001. (in Russian).

Сведения об авторах

Волгин Всеволод Станиславович — аспирант кафедры низких температур НИУ «МЭИ», e-mail: volginvs@list.ru

Гиневский Алексей Феликсович — кандидат технических наук, доцент кафедры низких температур НИУ «МЭИ», e-mail: alexeyginevsky@gmail.com

Information about authors

Volgin Vsevolod S. — Ph.D.-student of Low Temperatures Dept., NRU MPEI, e-mail: volginvs@list.ru

Ginevsky Aleksey F. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Low Temperatures Dept., NRU MPEI, e-mail: alexeyginevsky@gmail.com

Статья поступила в редакцию 30.10.2017