

01
О важности термических сопротивлений системы охлаждения при выборе термоэлектрического модуля

© Е.Н. Васильев

Институт вычислительного моделирования СО РАН,
660036 Красноярск, Россия
e-mail: ven@icm.krasn.ru

Поступило в Редакцию 31 января 2023 г.
В окончательной редакции 15 марта 2023 г.
Принято к публикации 15 марта 2023 г.

Представлены результаты расчетов и анализ энергетических характеристик системы охлаждения и терморегулирования с учетом рабочих характеристик термоэлектрического модуля, термических сопротивлений устройств подвода и отвода теплоты, параметров охлаждаемого объекта. Проведено сравнение эффективности охлаждения при использовании двух серийных термоэлектрических модулей, имеющих различную мощность. Показано, что существенным фактором, влияющим на эффективность охлаждения, являются термические сопротивления устройств подвода и отвода теплоты. Определены критерии, позволяющие осуществлять выбор термоэлектрического модуля для системы охлаждения и терморегулирования.

Ключевые слова: термоэлектрическая система охлаждения, теплообменник, холодильный коэффициент, холодопроизводительность.

DOI: 10.21883/JTF.2023.05.55455.13-23

Введение

В настоящее время элементы Пельтье находят широкое применение в различных практических приложениях [1–6]. Термоэлектрические системы имеют относительно невысокую эффективность [7–9], поэтому важен выбор оптимальной конструкции, обеспечивающей максимальные характеристики процесса. Термоэлектрические системы охлаждения и терморегулирования (ТЭСОТ) используются для обеспечения требуемых температурных режимов как микрообъектов, так и холодильных камер большого объема. Термоэлектрический модуль (ТЭМ), являющийся тепловым насосом, производит на своих сторонах отрицательный температурный перепад, осуществляя теплопередачу со своей холодной стороны на горячую. Эффективность ТЭСОТ определяется параметрами ТЭМ, а также величиной и соотношением внутренних и внешних тепловых потерь. Первый вид потерь обусловлен, прежде всего, обратным тепловым потоком по материалу термоэлементов. Величина этих потерь зависит от конструкции и параметров ТЭМ, в итоге она находит свое отражение в рабочих характеристиках производителя. Второй вид относится к потерям на термических сопротивлениях устройств подвода и отвода теплоты, а также на всех тепловых контактах. Температурные перепады на термических сопротивлениях теплообменных устройств относятся к необратимым потерям, которые снижают энергетическую эффективность ТЭСОТ. В целом эффективность процесса охлаждения зависит от общей конструкции ТЭСОТ, параметров теплообменных устройств, рабочих характеристик ТЭМ и режима его работы.

В настоящее время выпускается большой ассортимент ТЭМ, имеющих существенно различающиеся рабочие характеристики и параметры. Выбор оптимального ТЭМ является достаточно сложной задачей, поскольку зависит от целого набора исходных параметров ТЭСОТ. В настоящей работе с целью обоснования выбора ТЭМ исследуется влияние термических сопротивлений устройств подвода и отвода теплоты, параметров ТЭМ и охлаждаемого объекта (ОО) на энергетические характеристики ТЭСОТ.

1. Схема термоэлектрической системы охлаждения

Общая схема ТЭСОТ и характерное распределение температуры в ней приведены на рис. 1. Задачей ТЭСОТ является поддержание заданной температуры T_1 основания охлаждаемого объекта I , который характеризуется мощностью тепловыделения Q . Охлаждаемые объекты могут быть разного типа: теплонагруженные элементы электроники [10], объем холодильной камеры [11], биологические объекты [12,13] и др. Теплота от ОО на холодную сторону ТЭМ передается с помощью устройства подвода теплоты (УПТ) 2, которое вместе с прилегающими тепловыми контактами (ОО–УПТ и УПТ–ТЭМ) интегрально характеризуется термическим сопротивлением R_T . В качестве УПТ может выступать пластинчатый теплообменник [11], теплораспределитель [14] и др. В самом простом случае, когда ОО устанавливается непосредственно на холодную сторону ТЭМ, R_T равно термическому сопротивлению теплового контакта ОО–ТЭМ. Термоэлектрический модуль 3 дол-

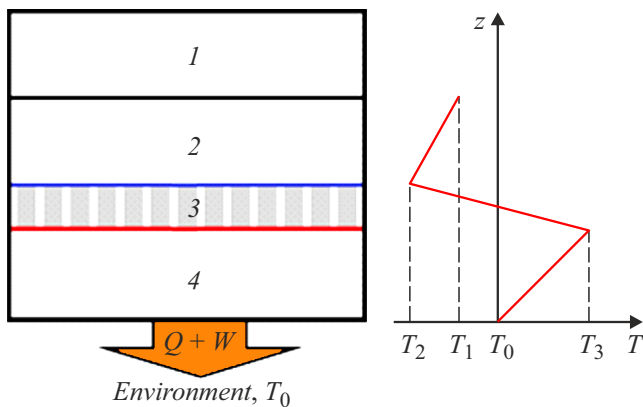


Рис. 1. Схема и характерное распределение температуры в ТЭСОТ: 1 — охлаждаемый объект, 2 — устройство подвода теплоты, 3 — термоэлектрический модуль, 4 — устройство отвода теплоты.

жен отводить от ОО тепловую мощность Q , обеспечивая заданный перепад температуры $\Delta T_0 = T_1 - T_0$. Основными характеристиками ТЭМ являются максимальные значения холодопроизводительности Q_{\max} , температурного перепада между его горячей и холодной сторонами $\Delta T_{\text{ТЕМ}} = T_3 - T_2$ и собственного энергопотребления W . Устройство отвода теплоты (УОТ) 4 обеспечивает теплопередачу с горячей стороны ТЭМ в окружающую среду или теплоноситель, которые имеют температуру T_0 . Наиболее распространены УОТ в виде воздушных и жидкостных теплообменников, теплопередающая эффективность УОТ с учетом тепловых контактов характеризуется суммарным термическим сопротивлением R_S .

2. Термическое сопротивление теплообменников

Одними из основных исходных параметров при расчете характеристик ТЭСОТ являются значения R_S и R_T , величину которых определяют термические сопротивления УОТ, УПТ и тепловых контактов. В конструкции УОТ и УПТ, как правило, используются разнообразные теплообменники, из которых можно выделить два наиболее распространенных типа: воздушные и жидкостные. Значение термического сопротивления теплообменников может быть определено из расчета [11], эксперимента [15] или получено из информации производителя. Оценим возможные диапазоны значений термического сопротивления для воздушных и жидкостных теплообменников.

Термическое сопротивление стандартных воздушных теплообменников с вентилятором (кулеров) для компьютерных процессоров обычно лежит в диапазоне 0.3–0.5 К/Вт, лучшие образцы с использованием тепловых трубок могут достигать значения 0.1 К/Вт и даже

ниже. При этом, как правило, повышение эффективности кулеров сопровождается увеличением веса, габаритов и цены. Тепловые трубки и термосифоны позволяют эффективно осуществлять теплопередачу между сравнительно небольшой боковой поверхностью ТЭМ и ребрами теплообменника, значительно развивая поверхность теплообмена. В экспериментальном исследовании [16] было показано, что использование термосифона в УПТ улучшило термическое сопротивление между холодной стороной ТЭМ и ОО на 37%, а холодильный коэффициент при этом повысился на 32%.

В жидкостных теплообменниках теплота передается потоку жидкости, движение которой обеспечивается помпой, поэтому они более сложные и дорогие. Жидкостное охлаждение превосходит воздушное в эффективности, поскольку коэффициент теплообмена жидкости с твердой поверхностью может в 100 и более раз превышать аналогичный параметр для воздуха. Расчетное значение термического сопротивления жидкостного теплообменника для УОТ термоэлектрического блока охлаждения составило 0.03 К/Вт [11]. Следует отметить, что в некоторых системах дальнейший отвод теплоты от жидкости в окружающую среду в итоге осуществляется кулером. В таком случае теплопередающее устройство будет иметь меньшее общее термическое сопротивление только при условии использования эффективного воздушного теплообменника. Это условие обычно выполняется за счет того, что воздушный теплообменник располагается удаленно от источника тепловыделения, имея при этом более развитую поверхность теплообмена и лучшие условия теплообмена с окружающей средой.

При несоответствии габаритов ТЭМ и ОО для снижения неоднородности полей температуры и теплового потока между ОО и ТЭМ устанавливается теплораспределитель, который обычно имеет вид прямоугольной пластины из материала с высокой теплопроводностью. Термическое сопротивление теплораспределительной пластины растет с уменьшением размеров ОО, для медного теплораспределителя 40×40 мм его минимальное термическое сопротивление составляет примерно 0.03 К/Вт при размере ОО 22.5×22.5 мм [14].

Значение термического сопротивления тепловых контактов зависит от теплопроводности наполнителя, толщины и площади зазора. Теплопроводность промышленных термопаст находится в диапазоне 0.5–6 Вт/(м·К). При использовании стандартной термопасты КПТ-8 с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0.85$ Вт/(м·К) величина термического сопротивления $R = \delta/(\lambda S)$ для толщины слоя $\delta = 0.1$ –0.2 мм и площади контакта $S = 40 \times 40$ мм составит 0.074–0.15 К/Вт. Значение R может быть существенно снижено при использовании паяных контактов; так, низкотемпературный припой ПОСВ-50 (сплав Розе) имеет $\lambda = 16$ Вт/(м·К).

3. Расчет и анализ характеристик термоэлектрической системы охлаждения

Разработка ТЭСОТ основывается на выполнении основной задачи, а именно обеспечение требуемого температурного перепада при заданной мощности тепловыделения ОО. Это условие определяет конструктивные решения для УПТ и УОТ, а также выбор ТЭМ. Наряду с этим важной задачей при разработке ТЭСОТ является достижение максимальной энергетической эффективности процесса охлаждения. Энергетическая эффективность работы отдельного ТЭМ описывается известной характеристикой COP (coefficient of performance), равной отношению его холодопроизводительности к потребляемой им электрической мощности. Характеристика COP соответствует идеальному случаю, когда процессы подвода теплоты к холодной стороне и теплоотвода от горячей стороны ТЭМ происходят без внешних тепловых потерь. В реальной ТЭСОТ, имеющей тепловые потери в УПТ и УОТ, эффективность работы описывается холодильным коэффициентом, который определяется аналогично идеальному случаю $\varepsilon = Q/W$. При этом компенсация тепловых потерь в ТЭСОТ требует для обеспечения заданных значений ΔT_0 и Q более высокого значения W , поэтому значение ε для ТЭСОТ всегда ниже, чем COP для отдельного ТЭМ.

Расчет энергетических характеристик ТЭСОТ проводился для стационарного процесса с помощью соотношения, связывающего общий температурный перепад с перепадами температур на отдельных элементах ТЭСОТ:

$$\Delta T_0 = R_T Q - \Delta T_{\text{ТЕМ}}(I, Q) + R_S [Q + U(I, Q)I], \quad (1)$$

где U, I — напряжение и сила тока электропитания ТЭМ. Первое слагаемое в правой части формулы (1) описывает температурный перепад в УПТ, второе определяет разность температур между горячей и холодной сторонами ТЭМ, третье — перепад температуры в УОТ. Рабочие характеристики термоэлектрического модуля $Q(\Delta T_{\text{ТЕМ}})$ и $U(\Delta T_{\text{ТЕМ}})$ являются исходными данными для определения зависимостей $U(I, Q)$ и $\Delta T_{\text{ТЕМ}}(I, Q)$ с помощью интерполяционных полиномов, расчетная методика этих зависимостей приведена в [17]. Численное решение нелинейной алгебраической системы уравнений для заданных значений $R_S, R_T, \Delta T_0$ и I позволяет рассчитать энергетические характеристики Q, W и ε .

Выбор оптимального ТЭМ основывается на анализе зависимостей энергетических характеристик от параметров ТЭМ и ОО, термических сопротивлений устройств подвода и отвода теплоты. Наиболее эффективным является такой ТЭМ, который при заданной мощности тепловыделения ОО обеспечивает требуемый температурный перепад между ОО и окружающей средой и имеет наибольший холодильный коэффициент. Такой сравнительный анализ проведем на примере двух серийных

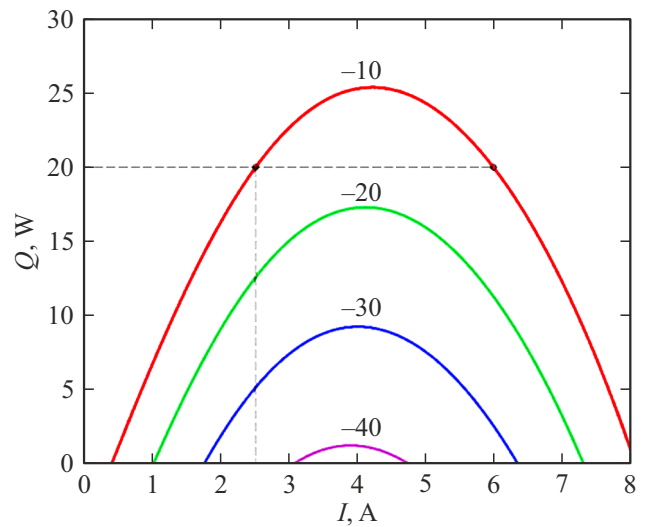


Рис. 2. Зависимости холодопроизводительности от силы тока при различных значениях температурного перепада ΔT_0 , указанных на соответствующих кривых в градусах.

ТЭМ с одинаковой площадью боковых поверхностей 40×40 mm. Стандартный ТЭМ „S–199–14–11“ имеет максимальные значения холодопроизводительности $Q = 124.2$ W (для $\Delta T_{\text{ТЕМ}} = 0$) и перепада температуры $\Delta T_{\text{ТЕМ}} = 72.5$ K (для $Q = 0$) при силе тока $I_{\text{max}} = 7.9$ A и напряжении $U_{\text{max}} = 25.3$ V [18]. Высокомощный ТЭМ „D–200–14–06“ обеспечивает при $I_{\text{max}} = 15.1$ A и $U_{\text{max}} = 25.3$ V холодопроизводительность на 92% выше $Q = 238.3$ W, но при меньшем на 3.5% значении $\Delta T_{\text{ТЕМ}} = 70$ K [19]. По информации производителя такие ТЭМ предназначены для применений, требующих высокой производительности, где необходимо отводить большое количество теплоты [20].

Энергетические характеристики ТЭСОТ для ТЭМ „S–199–14–11“ и значений $R_T = 0.3$ K/W, $R_S = 0.3$ K/W приведены на рис. 2 и 3, на кривых указаны соответствующие им значения ΔT_0 в градусах Цельсия. Зависимости холодопроизводительности $Q(I)$ имеют максимумы, значения которых снижаются с ростом абсолютной величины температурного перепада ΔT_0 . Значениям Q , ниже максимальных, соответствуют по два значения силы тока. Так, для уровня $Q = 20$ W, обозначенного штриховой горизонтальной линией, они примерно равны 2.5 A (отмечено штриховой вертикальной линией) и 6 A. Очевидно, что более эффективный режим работы ТЭСОТ обеспечивается при меньшем значении силы тока, поскольку собственное энергопотребление ТЭМ в этом случае значительно ниже.

Графики холодильного коэффициента на рис. 3 также имеют максимумы, зависящие от температурного перепада ΔT_0 , значения которого указаны в градусах Цельсия на соответствующих кривых. В отличие от зависимостей $Q(I)$ на рис. 2 значения силы тока, соответствующие

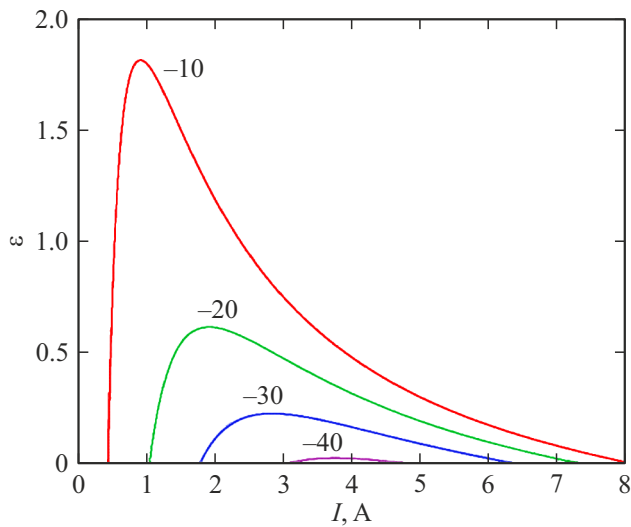


Рис. 3. Зависимости холодильного коэффициента от силы тока при различных значениях температурного перепада ΔT_0 , указанных на соответствующих кривых в градусах.

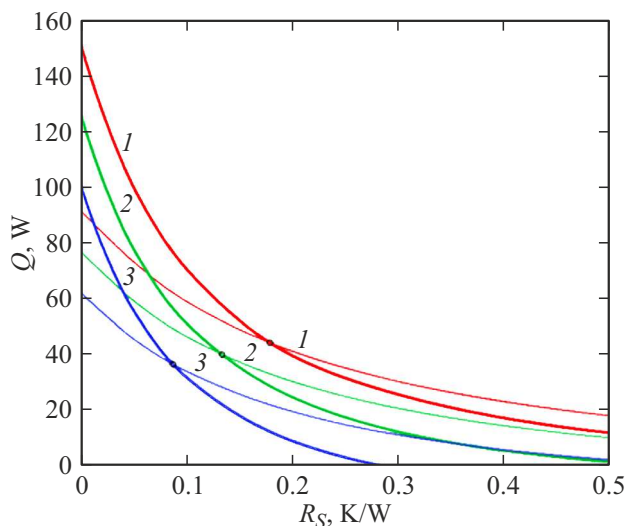


Рис. 4. Зависимости максимальной холодопроизводительности от термического сопротивления R_S при $R_T = 0.1$ К/В: 1 — $\Delta T_0 = -10$, 2 — -20 , 3 — -30 °С.

максимумам графиков $\varepsilon(I)$, имеют существенную зависимость от ΔT_0 .

Максимальные значения функций $Q(I)$ и $\varepsilon(I)$ характеризуют потенциал применяемого ТЭМ при заданных R_T и R_S , поскольку позволяют определить достижимый предел энергетической эффективности ТЭСОТ. Зависимости максимальных значений холодопроизводительности $Q(R_S)$ ТЭМ „S-199-14-11“ (тонкие линии) и „D-200-14-06“ (толстые линии) для $R_T = 0.1$ К/В приведены на рис. 4, кривые 1–3 соответствуют значениям $\Delta T_0 = -10, -20$ и -30 °С. Для каждого значения ΔT_0 графики $Q(R_S)$ имеют точку пересечения (отмечена кружком) при некотором

значении R_{S^*} , при котором холодопроизводительность двух ТЭМ имеет равное значение Q^* . Таким образом, высокомогущный ТЭМ „D-200-14-06“ обеспечивает более высокую холодопроизводительность по сравнению со стандартным ТЭМ „S-199-14-11“ при $R_S < R_{S^*} = 0.18$ К/В для $\Delta T_0 = -10$ °С, при $R_S < R_{S^*} = 0.13$ К/В для $\Delta T_0 = -20$ °С, при $R_S < R_{S^*} = 0.09$ К/В для $\Delta T_0 = -30$ °С. Меньшая холодопроизводительность ТЭСОТ с более мощным ТЭМ при $R_S > R_{S^*}$ связана с тем, что такой ТЭМ обеспечивает необходимый перепад температуры $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$ при более высоком энергопотреблении, поэтому с некоторого значения R_S возросшие тепловые потери в УОТ нивелируют его преимущество в холодопроизводительности.

Зависимости максимальных значений холодильного коэффициента $\varepsilon(R_S)$ для ТЭМ „S-199-14-11“ (тонкие линии) и „D-200-14-06“ (толстые линии) получены при величине термического сопротивления $R_T = 0.1$ К/В и значениях $\Delta T_0 = -10, -20$ и -30 °С (рис. 5). Из графиков видно, что стандартный ТЭМ „S-199-14-11“ имеет более высокие значения холодильного коэффициента во всем диапазоне термического сопротивления R_S . Это обусловлено его меньшим энергопотреблением, необходимым для обеспечения заданного перепада температуры.

Для определения влияния величины термического сопротивления УПТ на энергетические характеристики ТЭСОТ были проведены аналогичные расчеты для $R_T = 0.3$ К/В и $\Delta T_0 = -10, -20, -30$ °С (кривые 1–3). Результаты расчетов представлены на рис. 6 и 7, тонкими и толстыми линиями отображены зависимости для ТЭМ „S-199-14-11“ и „D-200-14-06“ соответственно. Из сравнения рис. 4 и 6 следует, что увеличение значения R_T с 0.1 до 0.3 К/В приводит к

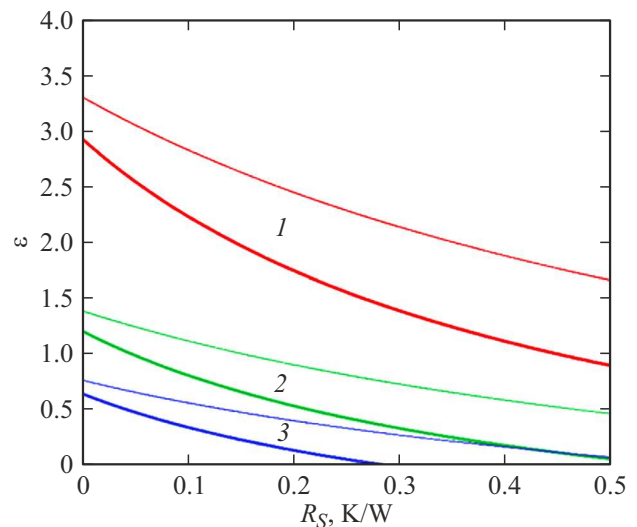


Рис. 5. Зависимости максимального холодильного коэффициента от термического сопротивления R_S при $R_T = 0.1$ К/В: 1 — $\Delta T_0 = -10$, 2 — -20 , 3 — -30 °С.

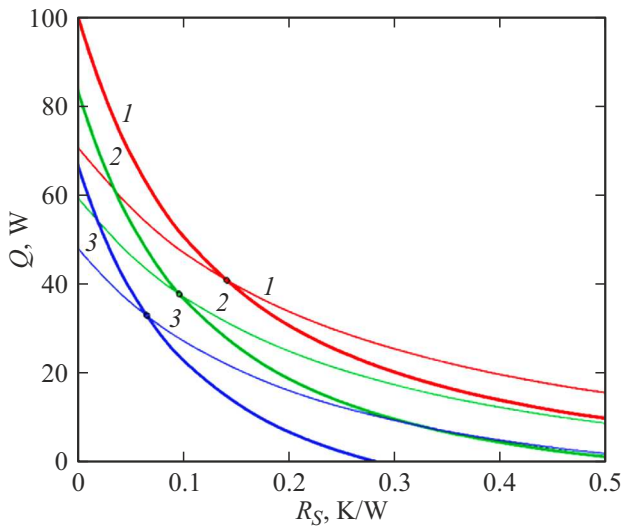


Рис. 6. Зависимости максимальной холодопроизводительности от термического сопротивления R_S при $R_T = 0.3 \text{ K/W}$: 1 — $\Delta T_0 = -10$, 2 — -20 , 3 — -30°C .

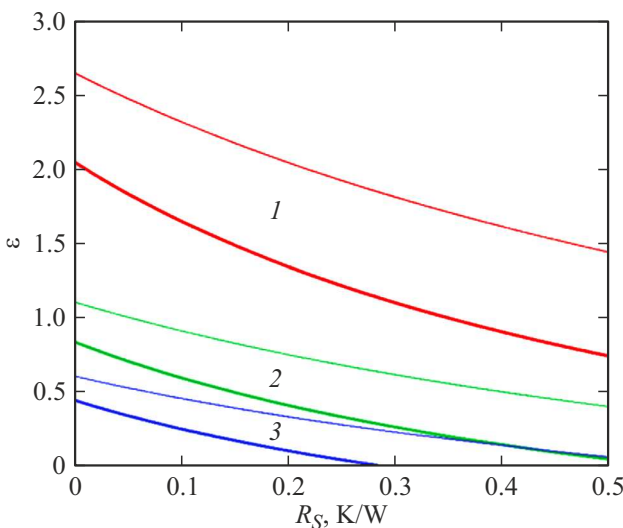


Рис. 7. Зависимости максимального холодильного коэффициента от термического сопротивления R_S при $R_T = 0.3 \text{ K/W}$: 1 — $\Delta T_0 = -10$, 2 — -20 , 3 — -30°C .

заметному снижению холодопроизводительности. При этом наблюдается и уменьшение значений R_{S^*} , при которых ТЭМ „D-200-14-06“ обеспечивает более высокую холодопроизводительность: $R_{S^*} = 0.14, 0.1$ и 0.068 K/W для $\Delta T_0 = -10, -20$ и -30°C соответственно. Таким образом, высокомогущный ТЭМ „D-200-14-06“ имеет заметное преимущество в максимальной холодопроизводительности по сравнению со стандартным ТЭМ только при сравнительно малых значениях термического сопротивления УПТ.

Зависимости $\varepsilon(R_S)$ для ТЭМ „S-199-14-11“ (тонкие линии) и „D-200-14-06“ (толстые линии) значений $R_T = 0.3 \text{ K/W}$, $\Delta T_0 = -10, -20$ и -30°C (кривые 1–3)

приведены на рис. 7. Увеличение значения R_T с 0.1 до 0.3 K/W привело к заметному снижению холодильного коэффициента для обоих ТЭМ.

Расчетные результаты, приведенные на рис. 4–7, свидетельствуют о том, что в случае $R_S > R_{S^*}$ оптимальным выбором является ТЭМ „S-199-14-11“, поскольку он имеет более высокие показатели как по холодопроизводительности, так и холодильному коэффициенту. При обратном неравенстве $R_S < R_{S^*}$ высокомогущный ТЭМ „D-200-14-06“ позволяет добиться более высокой максимальной холодопроизводительности при меньшем холодильном коэффициенте. В этом случае выбор ТЭМ требует дополнительного анализа, поэтому для обоснования выбора проведем сравнение энергетических характеристик ТЭСОТ для следующих исходных параметров: $R_S = R_T = 0.1 \text{ K/W}$, $\Delta T_0 = -20^\circ\text{C}$. Из расчетов получены максимальные значения $Q = 51.3 \text{ W}$, $\varepsilon = 0.81$ для ТЭМ „D-200-14-06“, $Q = 46.5 \text{ W}$ и $\varepsilon = 1.12$ для ТЭМ „S-199-14-11“. Результаты расчетов также представлены на рис. 8 в виде зависимостей $\varepsilon(Q)$ для ТЭМ „S-199-14-11“ (тонкая линия) и „D-200-14-06“ (толстая линия). Критерий для выбора ТЭМ определим по координате пересечения этих зависимостей, которая отмечена вертикальной штриховой линией. Для данного набора исходных параметров точка пересечения соответствует значению $\varepsilon^* = 0.58$ при $Q^* \approx 43 \text{ W}$. Следовательно, для мощности тепловыделения охлаждаемого объекта $Q_0 < 43 \text{ W}$ более эффективную работу ТЭСОТ будет обеспечивать ТЭМ „S-199-14-11“, для мощности тепловыделения ОО более 43 W приоритет имеет ТЭМ „D-200-14-06“. При меньших значениях термических сопротивлений точка пересечения зависимостей $\varepsilon(Q)$ смещается в сторону снижения Q и увеличения ε . Так, например, при значениях $R_S = 0.05 \text{ K/W}$ и $R_T = 0.1 \text{ K/W}$ координаты точки пересечения $Q^* = 40.4 \text{ W}$, $\varepsilon^* = 0.91$,

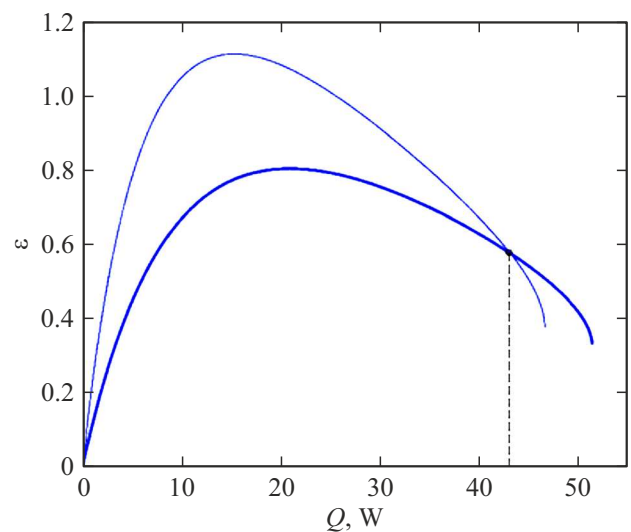


Рис. 8. Зависимости холодильного коэффициента от холодопроизводительности.

а при $R_S = 0.05 \text{ K/W}$ и $R_T = 0.05 \text{ K/W}$ — $Q^* = 38.5 \text{ W}$, $\varepsilon^* = 1.06$.

Таким образом, алгоритм выбора ТЭМ для системы охлаждения включает в себя следующие шаги.

1. Задаются исходные параметры термоэлектрической системы охлаждения: требуемый температурный перепад ΔT_0 , мощность тепловыделения охлаждаемого объекта Q_0 , также определяются термические сопротивления теплообменников и тепловых контактов, по которым вычисляются значения R_S и R_T .

2. Из технической документации производителя определяются рабочие характеристики $Q(\Delta T_{\text{ТЕМ}})$ и $U(\Delta T_{\text{ТЕМ}})$ термоэлектрических модулей, которые рассматриваются для использования в системе охлаждения.

3. Для заданных значений R_T и ΔT_0 по формуле (1) с использованием интерполяционных полиномов, построение которых описано в [17], производятся расчеты и строятся графики максимальных значений холодопроизводительности Q и холодильного коэффициента ε . Если полученные максимальные значения холодопроизводительности меньше заданного значения Q_0 , то необходимо изменение конструкции системы охлаждения, направленное, прежде всего, на снижение величины R_S и R_T .

4. По кривым $Q(R_S)$ определяются координаты R_{S^*} и Q^* точки их пересечения. При выполнении условия $R_S > R_{S^*}$ выбирается менее мощный ТЭМ, который имеет в этом случае более высокие значения Q и ε .

5. В случае выполнения $R_S < R_{S^*}$, дополнительно для обоих ТЭМ рассчитываются зависимости $\varepsilon(Q)$ и определяется координата Q^* их пересечения. При выполнении соотношения $Q_0 < Q^*$ преимущество имеет менее мощный ТЭМ, при обратном соотношении $Q_0 > Q^*$ необходимую холодопроизводительность обеспечит только более мощный ТЭМ.

Приведенный алгоритм позволяет производить для заданных Q и ΔT_0 выбор ТЭМ, обеспечивающий максимальный холодильный коэффициент ТЭСОТ в зависимости от термических сопротивлений устройств подвода и отвода теплоты. В информации производителя о высокомоощных ТЭМ сообщается только об их более высокой производительности без упоминания каких-либо ограничений, которые могут препятствовать ее достижению; приведенная выше методика позволяет количественно определить эти ограничительные условия.

Заключение

Представленная методика позволяет проводить расчет и анализ энергетических характеристик ТЭСОТ и осуществлять с учетом исходных технических условий целенаправленный выбор оптимального термоэлектрического модуля, обеспечивающий максимальную эффективность процесса охлаждения. Сравнительный анализ энергетических характеристик ТЭСОТ для двух серийных ТЭМ с различной холодопроизводительностью

показал, что высокомоощный ТЭМ обеспечивает более высокую эффективность охлаждения только при относительно малых значениях термических сопротивлений УПТ и УОТ. Ограниченность применения высокомоощного ТЭМ обусловлена его более высоким собственным энергопотреблением, необходимым для поддержания заданного перепада температуры, и пропорциональным увеличением тепловых потерь при росте термического сопротивления.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Zhao, G. Tan. Appl. Thermal Engineer., **66** (1–2), 15 (2014). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.01.074
- [2] D. Enescu, E.O. Virjoghe. Renewable and Sustainable Energy Reviews, **38**, 903 (2014). DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.045
- [3] М.Ю. Штерн, Ю.И. Штерн, А.А. Шевченков. Известия вузов. Сер. электроника, **4**, 30 (2011).
- [4] Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Н.А. Набиев, Т.А. Рагимова. Мед. техника, **2**, 12 (2019). [T.A. Ismailov, O.V. Yevdulov, T.A. Ragimova, N.A. Nabiev. Biomed. Engineer., **53** (2), 92 (2019). DOI: 10.1007/s10527-019-09884-2]
- [5] Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Н.А. Набиев, С.Г. Магомедова. Мед. техника, **1**, 40 (2020). [T.A. Ismailov, O.V. Yevdulov, N.A. Nabiev, S.G. Magomedova. Biomed. Engineer., **54** (1), 56 (2020). DOI: 10.1007/s10527-020-09973-7]
- [6] Т.А. Исмаилов, У.И. Абдулхакимов, Д.В. Евдулов, О.В. Евдулов. Мед. техника, **4**, 38 (2017). [T.A. Ismailov, U.I. Abdulkhakimov, D.V. Yevdulov, O.V. Yevdulov. Biomed. Engineer., **51** (4), 280 (2017). DOI: 10.1007/s10527-017-9731-6]
- [7] А.Ф. Иоффе. Полупроводниковые термоэлементы (Изд-во АН СССР, М.- Л., 1960)
- [8] С.В. Ордин. ФТП, **31** (10), 1269 (1997). [S.V. Ordin. Semiconductors, **31**, 1091 (1997). DOI: 10.1134/1.1187031]
- [9] Е.Н. Васильев. ЖТФ, **91** (5), 743 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.05.50684.296-20 [E.N. Vasil'ev. Tech. Phys., **66** (5), 815 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221050248]
- [10] Y. Cai, Y. Wang, D. Liu, F.Y. Zhao. Appl. Thermal Engineer., **148**, 238 (2019). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.11.014
- [11] Е.Н. Васильев. Теплофизика и аэромеханика, **29** (3), 419 (2022). [E.N. Vasil'ev. Thermophys. Aeromech., **29** (3), 401 (2022). DOI: 10.1134/S0869864322030088]
- [12] Y. Xu, Z. Li, J. Wang, M. Zhang, M. Jia, Q. Wang. Appl. Thermal Engineer., **200**, 117730 (2022). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2021.117730
- [13] W. Xue, X. Cao, G. Zhang, G. Tan, Z. Liu, K. Li. Energies, **15** (8), 2781 (2022). DOI: 10.3390/en15082781
- [14] Е.Н. Васильев. ЖТФ, **88** (4), 471 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.04.45714.2312 [E.N. Vasil'ev. Tech. Phys., **63** (4), 487 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218040266]
- [15] Б.М. Рассамкин, В.А. Рогачев, С.М. Хайрнасов. Технология и конструирование в электронной аппаратуре, **4**, 48 (2006).

- [16] J.G. Vián, D. Astrain. *Appl. Thermal Engineer.*, **28**, 1514 (2008).
- [17] Е.Н. Васильев. *ЖТФ*, **87** (1), 80 (2017). DOI: 10.21883/JTF.2017.01.44022.1725 [E.N. Vasil'ev. *Tech. Phys.*, **62** (1), 90 (2017). DOI: 10.1134/S1063784217010248]
- [18] Электронный ресурс. *Thermoelectric Module Specification*. Режим доступа: https://crystalltherm.com/upload/iblock/5af/1knj372x6ho3v82cwzufypmaktsqm4ph/TM_S_199_14_11_L2_SPEC.pdf
- [19] Электронный ресурс. *Thermoelectric Module Specification*. Режим доступа: https://crystalltherm.com/upload/iblock/7ab/8c3ns0gqzkiik73qlpga7mwdr5qg9oc/TM_D_200_1_06_L2_SPEC.pdf
- [20] Электронный ресурс. *Thermoelectric Module Specification*. Режим доступа: <https://crystalltherm.com/ru/production/termoelektricheskie-moduli/113/>