ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 56971— 2016/ IEC/TS 62610-3: 2009

Конструкции несущие базовые радиоэлектронных средств

УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМИ РЕЖИМАМИ ШКАФОВ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ СТАНДАРТАМ СЕРИЙ IEC 60297 И IEC 60917

Часть 3

Руководство по проектированию. Метод оценки термоэлектрических систем охлаждения (эффект Пельтье)

(IEC/TS 62610-3:2009, Mechanical structures for electronic equipment — Thermal management for cabinets in accordance with IEC 60297 and IEC 60917 series — Part 3: Design guide. Evaluation method for thermoelectrical cooling systems (Peltier effect), IDT)

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2016

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Обществом с ограниченной ответственностью «Авангард-ТехСт» (ООО «Авангард-ТехСт») на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии указанного в пункте 4 международного документа, который выполнен российской комиссией экспертов МЭК/ТК 48D

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 420 «Базовые несущие конструкции, печатные платы, сборка и монтаж электронных модулей», подкомитетом ПК-1 «Базовые несущие конструкции радиоэлектронных средств (РЭС)»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 июня 2016 г. № 649-ст

4 Настоящий стандарт идентичен международному документу IEC/TS 62610-3:2009 «Механические конструкции для электронного оборудования. Управление температурным режимом шкафов в соответствии с сериями IEC 60297 и IEC 60917. Часть 3. Руководство по проектированию. Метод оценки термоэлектрических систем охлаждения (эффект Пельтье)» [IEC/TS 62610-3:2009 «Mechanical structures for electronic equipment — Thermal management for cabinets in accordance with IEC 60297 and IEC 60917 series — Part 3: Design guide. Evaluation method for thermoelectrical cooling systems (Peltier effect)», IDT].

Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5—2012 (пункт 3.5) и для увязки с наименованиями, принятыми в существующем комплексе национальных стандартов Российской Федерации.

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных стандартов соответствующие им национальные стандарты Российской Федерации, сведения о которых приведены в дополнительном приложении ДА

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в ГОСТ Р 1.0—2012 (раздел 8). Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© Стандартинформ, 2016

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения . . . 1
2 Нормативные ссылки . . . 1
3 Обозначения величин и индексов . . . 1
3.1 Обозначения величин буквами латинского алфавита . . . 1
3.2 Обозначения величин буквами греческого алфавита . . . 2
3.3 Обозначения индексов . . . 2
4 Теория термоэлектрических систем охлаждения . . . 2
4.1 Элемент Пельтье . . . 2
4.2 Термоэлектрические системы охлаждения . . . 3
5 Схема измерительной установки . . . 6
6 Интерпретация и оценка данных . . . 7
Приложение А (справочное) Предварительный расчет . . . 10
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочного международного стандарта национальному стандарту . . . 21
Библиография

Введение

Кроме обычного охлаждения с помощью компрессора существуют и другие варианты охлаждения, например абсорбционное охлаждение, термоэлектрическое охлаждение (Пельтье), магнито-тепловое охлаждение, охлаждение с помощью CO_2 и др.

Для проектирования термоэлектрических систем охлаждения необходимо иметь показатели потерь тепла на рассеяние, зависящие от температур окружающей среды и помещения.

Работа термоэлектрических систем охлаждения — это функция температуры окружающей среды, работы горячей и холодной сторон теплообменника (радиатора), термической нагрузки, конструкции элемента Пельтье и электрических параметров элемента Пельтье.

Следовательно, должен быть разработан оценочный метод. Данное руководство по проектированию позволяет сопоставить разные термоэлектрические системы охлаждения.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Конструкции несущие базовые радиоэлектронных средств

УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМИ РЕЖИМАМИ ШКАФОВ, СООТВЕТСТВУЮЩИХ СТАНДАРТАМ СЕРИЙ IEC 60297 И IEC 60917

Часть 3

**Руководство по проектированию.
Метод оценки термоэлектрических систем охлаждения (эффект Пельтье)**

Mechanical structures for electronic equipment.
Thermal management for cabinets in accordance with IEC 60297 and IEC 60917 series.
Part 3. Design guide. Evaluation method for thermoelectrical cooling systems
(Peltier effect)

Дата введения — 2017—03—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает методику оценки термоэлектрических систем охлаждения (эффект Пельтье). С помощью данного руководства по проектированию возможно рассчитать эффективность термоэлектрической системы охлаждения (эффект Пельтье) и ее охлаждающей способности, зависящей от температуры окружающей среды и температуры помещения. Данное руководство по проектированию может быть также использовано для оценки термоэлектрической системы охлаждения путем определения ее экономичности.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использована нормативная ссылка на следующий международный стандарт. Для недатированной ссылки применяют только указанное издание ссылочного стандарта.

IEC 62194:2005 Method of evaluating the thermal performance of enclosures (Метод оценки тепловых характеристик корпусов электронной аппаратуры)

3 Обозначения величин и индексов

В настоящем стандарте применены следующие обозначения величин и индексов.

3.1 Обозначения величин буквами латинского алфавита

C_P — теплоемкость, Вт/кг · °С;
D — диаметр трубы, м;
I — ток, А;
k — общий коэффициент теплопередачи, Вт/м^2 · °С;

Издание официальное

n — общее количество элементов Пельтье;
Δp — разность давлений, Па;
Q — потоки энергии (термическая, электрическая проводимость), Вт;
Q_c — полезная охлаждающая способность термоэлектрической системы охлаждения (Пельтье), Вт;
Q_{cPe} — охлаждающая способность термоэлектрического охладителя Пельтье в рабочих условиях, Вт;
Q_D — общий поток рассеянного тепла (плотность теплового потока) на горячей стороне, Вт;
Q_H — мощность нагрева внутри шкафа, Вт;
R_{Pe} — электрическое сопротивление элемента Пельтье, В/А;
R_i — тепловое сопротивление, °С/Вт;
S — поверхность (площадь контакта), м^2;
T — температура, °С;
V — напряжение, В;
$\dot{V}$ — объем воздушного потока, м^3/с;
ZT — термоэлектрическая эффективность.

3.2 Обозначения величин буквами греческого алфавита

α — коэффициент Зеебека (коэффициент термоэдс), В/°С;
ρ — плотность, кг/м^3;
λ — теплопроводность, Вт/м^2 · °С;
σ — электропроводность, См/м = (А/В);
φ — относительная влажность.

3.3 Обозначения индексов

1–7 — точки положения;
A — относящийся к потоку воздуха;
a — наружный;
C — эффективная мощность охлаждения;
c — холодная сторона;
D — полное рассеянное и отведенное тепло на горячей стороне;
E — электропитание, применяемое для термоэлектрической системы охлаждения;
F — вентилятор;
H — нагрев внутри шкафа;
h — горячая сторона;
i — внутренний, внутри шкафа;
L — потери тепла;
m — средний;
Pe — относящийся к элементу Пельтье;
R — обратный;
S — относящийся ко всей термоэлектрической системе охлаждения.

4 Теория термоэлектрических систем охлаждения

4.1 Элемент Пельтье

Эффект Пельтье — это возникновение разности температур при непосредственном протекании электрического тока, а также обратный процесс, который получил название эффекта Зеебека.

Таким образом, термоэлектрическая система охлаждения (эффект Пельтье) передает тепло с одной стороны элемента на другую сторону при градиенте температуры, потребляя электрическую энергию.

Охлаждающую способность термоэлектрического охладителя Пельтье в рабочих условиях вычисляют по формуле

$$Q_{cPe} = \alpha \cdot I \cdot T_c - \frac{1}{2} I^2 \cdot R_{Pe} - \left(\frac{\lambda_{Pe} \cdot S_{Pe}}{X_{Pe}} \right) \left(T_{4h} - T_{4c} \right). \quad (1)$$

Охлаждающая способность одного элемента Пельтье Q_{cPe} зависит от разных явлений.

Член формулы $\alpha \cdot I \cdot T_c$ обозначает максимальную охлаждающую способность, основанную на эффекте Пельтье, в то время как α представляет собой коэффициент термоэдс (коэффициент Зеебека).

Член формулы $\frac{1}{2} I^2 \cdot R_{Pe}$ представляет собой джоулево нагревание, член формулы $\left(\frac{\lambda_{Pe} \cdot A_{Pe}}{X_{Pe}}\right) \cdot (T_{4h} - T_{4c})$ — это теплопроводимость между горячей и холодной стороной посредством элемента Пельтье.

В соответствии с формулой (1) существует требование, чтобы минимизировать сроки джоулева нагревания и теплопроводности.

Для оценки элемента Пельтье термоэлектрическая эффективность ZT была вычислена по

$$ZT = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\lambda} T, \qquad (2)$$

которая представляет собой пропорцию между электропроводностью σ и теплопроводностью λ при заданной температуре T.

ZT, таким образом, очень удобная величина для сравнения потенциальной эффективности приборов, использующих различные материалы. Значения ZT = 1 считаются хорошими, а значения, по крайней мере охватывающие диапазоны 1–3, считаются важными для термоэлектрики, чтобы конкурировать по экономичности с механической генерацией и охлаждающей эффективностью.

4.2 Термоэлектрические системы охлаждения

Термоэлектрические системы охлаждения (см. рисунок 1) переносят тепло Qc из одного рабочего вещества в другое, в то время как эти рабочие вещества могут быть либо газообразными, либо жидкими. Для лучшей теплопередачи радиаторы соединены с обеими сторонами элемента Пельтье. Материал между элементом Пельтье и теплоотводом называется термоинтерфейсным слоем.

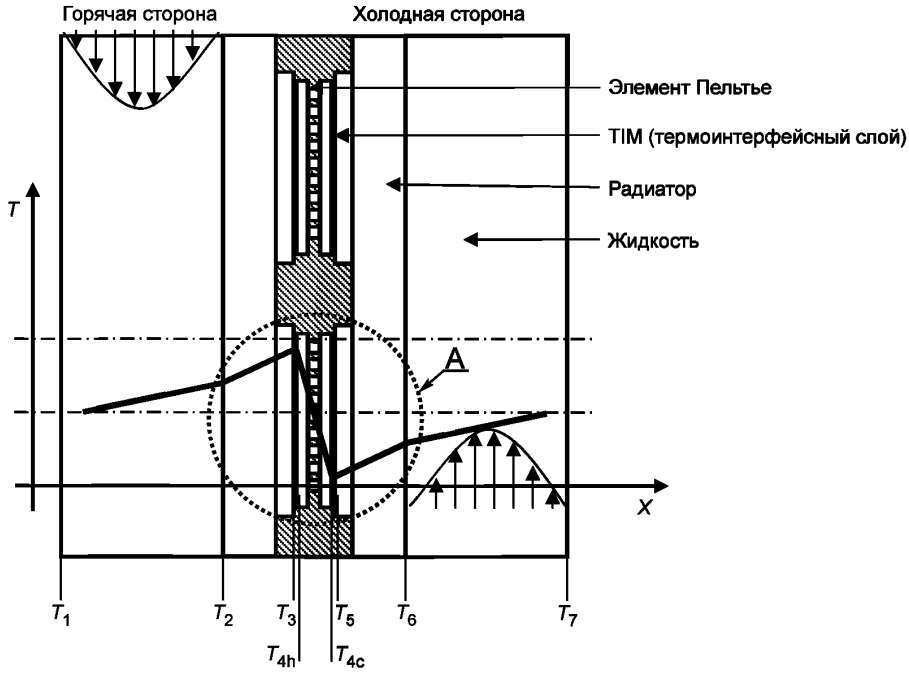


Рисунок 1, лист 1 — Принцип действия термоэлектрической системы охлаждения

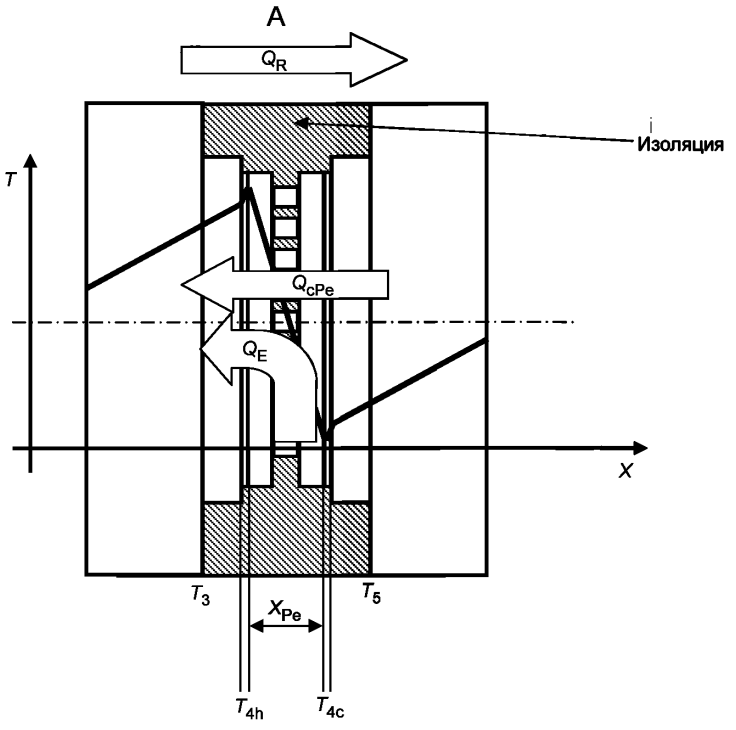
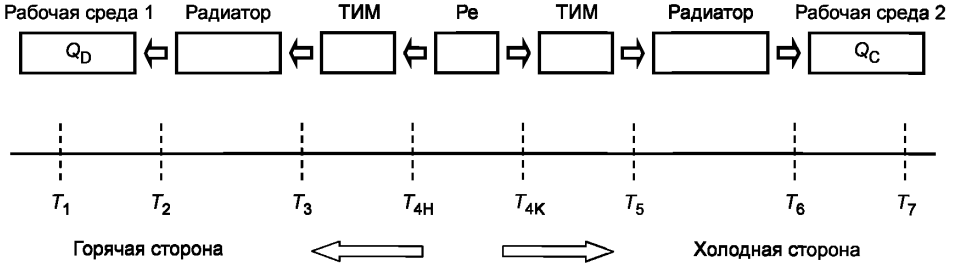


Рисунок 1, лист 2

Рабочая среда при температуре T_7 проходит через радиатор термоэлектрической системы охлаждения (Пельтье), которая имеет температуру T_6, и охлаждается путем конвекции. Тепло передается через радиатор под влиянием теплопроводности при заданном градиенте температуры между T_6 и T_5. Затем, в соответствии с процессом теплопроводности, теплопередача осуществляется через термоинтерфейсный слой. Элемент Пельтье отвечает за основной температурный градиент.

С горячей стороны элемента Пельтье тепловой поток проходит через термоинтерфейсный слой и радиатор в соответствии с процессом теплопроводности и, наконец, тепло отводится с помощью рабочей среды на горячей стороне путем конвекции.

Полное тепловое сопротивление, ограничивающее полный тепловой поток, — это сумма каждого из сопротивлений любого из описанных процессов (см. рисунок 2).



Pe — элемент Пельтье;
ТИМ — термоинтерфейсный слой

Рисунок 2 — Тепловые сопротивления

Тепловые сопротивления могут быть выражены в виде следующих формул:

$$R_1 = \frac{T_2 - T_1}{Q_D}\ °C/Вт; \qquad R_5 = \frac{T_5 - T_{4K}}{Q_C}\ °C/Вт;$$

$$R_2 = \frac{T_3 - T_2}{Q_D}\ °C/Вт; \qquad R_6 = \frac{T_6 - T_5}{Q_C}\ °C/Вт;$$

$$R_3 = \frac{T_{4H} - T_3}{Q_D}\ °C/Вт; \qquad R_7 = \frac{T_7 - T_6}{Q_C}\ °C/Вт.$$

$$R_{общее} = \sum_{i=1}^{7} R_i. \qquad (3)$$

Уменьшение каждого сопротивления необходимо для проектирования экономичной термоэлектрической системы охлаждения.

Как показано на рисунке 1, свободное пространство между двумя радиаторами и элементами Пельтье заполняется изолирующими материалами, чтобы избежать обратного потока тепла Q_R от горячего радиатора к холодному в результате теплопроводности. Для эффективной работы термоэлектрической системы охлаждения данный обратный поток тепла через изоляцию должен быть во что бы то ни стало уменьшен. Следовательно, допускается, что для дальнейших расчетов данный поток тепла Q_R равен нулю.

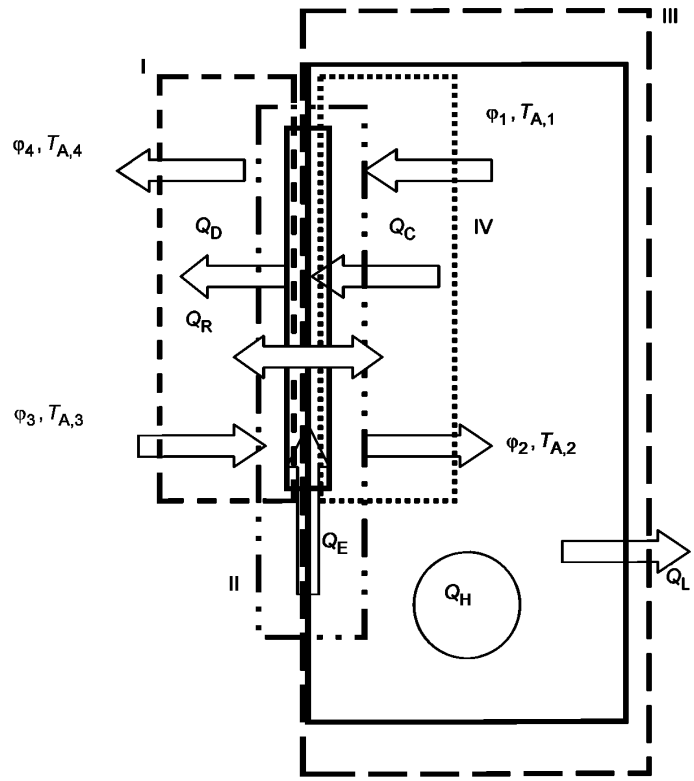


Рисунок 3 — Границы разделов термодинамической установки термоэлектрической системы охлаждения, присоединенной к закрытому шкафу

Формулы мощностей для каждой термодинамической установки в соответствии с рисунком 3 следующие:

$$\text{I:}\quad Q_C = Q_H - Q_L + Q_{F,c} \pm (Q_R = 0); \tag{4}$$

$$\text{II:}\quad Q_D = Q_C + Q_E + Q_{F,h} \pm (Q_R = 0); \tag{5}$$

$$\text{III:}\quad Q_C = \dot{V}_c \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{A,1} - T_{A,2}); \tag{6}$$

$$\text{IV:}\quad Q_D = \dot{V}_h \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{A,4} - T_{A,3}); \tag{7}$$

$$Q_L = k \cdot S(T_{i,m} - T_{\alpha,m}). \tag{8}$$

Поток тепла Q_C, который отводится из шкафа, — это тепловая мощность Q_H минус потери тепла Q_L через стенки шкафа. Q_{Fc} является тепловыделением от вентилятора на холодной стороне, и это зависит от коэффициента полезного действия вентилятора и его скорости вращения. Балансы мощностей в соответствии с границей системы II обозначают, что поток тепла Q_D — это сумма Q_C и мощности Q_E, которая применяется в элементе Пельтье, и рассеянное тепло от вентилятора на горячей стороне $Q_{F,h}$ минус обратный поток тепла Q_R через изоляционный материал.

Далее допускается, что во время охлаждения не происходит конденсации водяного пара. Это подразумевает, что относительная влажность φ, которая зависит от температуры системы и давления системы, должна соответствовать определенным условиям.

Относительная влажность,%, определяется соотношением между парциальным давлением паров воды в смеси P_{H_2O} и давлением насыщенных паров воды при заданной температуре смеси $P^*_{H_2O}$.

$$\varphi = \frac{P_{H_2O}}{P^*_{H_2O}} \cdot 100. \tag{9}$$

Учитывая так называемое перенасыщенное состояние, конденсация водяного пара происходит при φ, равном 100 %. Следовательно, необходимо обеспечить отсутствие конденсации водяных паров во время процесса охлаждения.

5 Схема измерительной установки

Рисунок 4 показывает общее устройство измерительной установки для оценки термоэлектрической системы охлаждения. Она состоит из шкафа, вокруг которого расположена камера искусственного климата, чтобы поддерживать постоянную температуру окружающей среды. В шкафу нагреватель размещается так, чтобы воспроизвести рассеяние тепла в рабочих условиях. Термоэлектрическая система охлаждения (Пельтье) монтируется внутри шкафа. Необходимо предусмотреть, чтобы не было пересечения воздушных потоков.

Входы питания для нагревателя, вентиляторов и элементов Пельтье так же, как температура окружающей среды, должны быть независимо регулируемыми измерениями в фиксированных условиях. Воздушный поток можно легко определить путем использования измерительного сопла определенного диаметра, как показано на рисунке 4. Путем измерения разности давлений скорость воздушного потока W, м/с, может быть вычислена по формуле

$$W = \varepsilon \cdot \tau \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \tag{10}$$

где $\varepsilon \approx 1$ (коэффициент сжатия);

$\tau \approx 1$ (значение сопротивления сопла) для воздуха;

Δp — разность давлений, Па;

ρ — плотность воздуха, кг/м^3.

Объем воздушного потока м^3/с, заданного диаметра D_{pipe} трубопровода вычисляют по формуле

$$\dot{V} = \frac{1}{4} w \cdot D^2_{pipe} \cdot \pi. \tag{11}$$

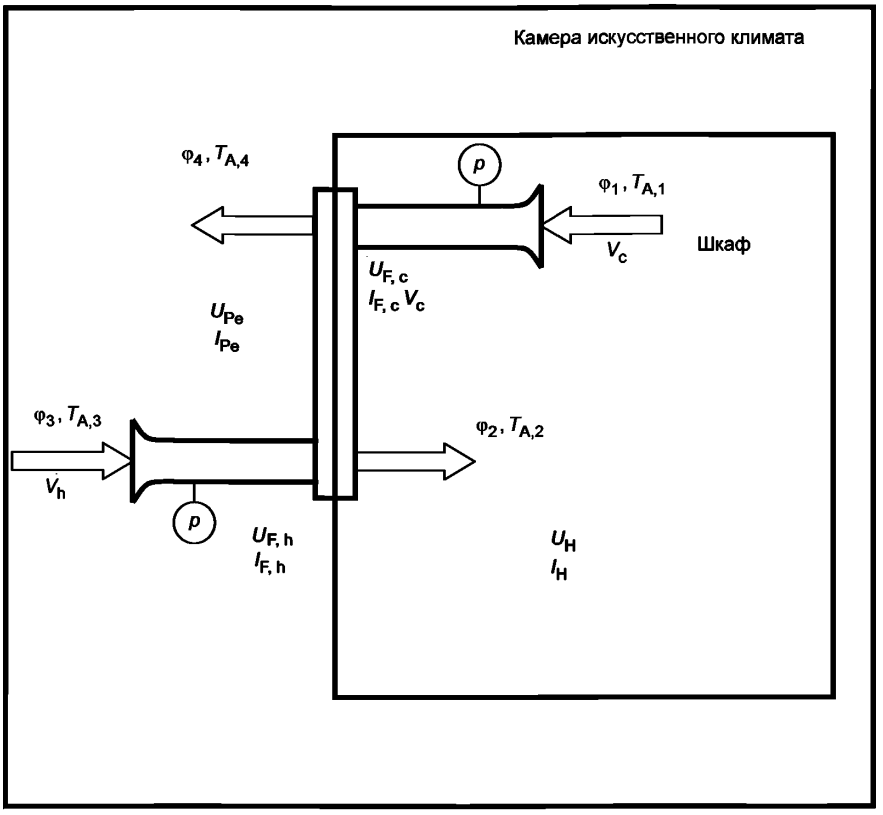


Рисунок 4 – Схема измерительной установки

6 Интерпретация и оценка данных

Для оценки термоэлектрической системы охлаждения (Пельтье) необходимы несколько точек измерения при фиксированных условиях эксплуатации.

Ниже перечислены параметры, используемые в измерительной установке, как показано на рисунке 4.

Условия эксплуатации:

мощность нагрева ($Q_H = U_H \cdot I_H$);

мощность вентилятора ($Q_{F,h}$ и $Q_{F,c}$);

мощность термоэлектрического охлаждающего устройства Пельтье ($Q_{Pe} = U_{Pe} \cdot I_{Pe}$);

$T_{a,4}$ (температура окружающей среды).

Данные измерений:

$T_{A,1}$; $T_{A,2}$; $T_{A,3}$; $T_{A,4}$;

объемы воздушного потока $(\dot{V}_h, \dot{V}_C)$ при определении разности давлений в измерительных соплах.

Дополнительные параметры:

перепад давления радиатора;

температуры на поверхности радиатора.

Дополнительные параметры могут быть использованы для оптимизации работы термоэлектрической системы охлаждения (Пельтье) и при определении всех сопротивлений, указанных на рисунке 2.

Установленный режим регистрируется путем отсутствия изменений температуры в течение определенного времени.

Во-первых, общий коэффициент теплопередачи k, Вт/(м^2 · °С) на поверхности шкафа S должен быть определен в соответствии со стандартом МЭК 62194, приложение А.

Определение данной величины должно быть сделано с помощью измерительной установки, которая используется в дальнейших экспериментах, так как каждое отдельное изменение в установке может изменять значение всего коэффициента теплопередачи.

Процедура эксперимента начинается с установки температуры окружающей среды, мощности двух вентиляторов и мощности элементов Пельтье. Питание не подается, нагревание не происходит. После того как достигнуты условия устойчивого состояния, регистрируются значения температур $T_{A,2}$, $T_{A,3}$, $T_{A,4}$ и определяется поток воздуха. В некоторых случаях определяются перепад давления и поверхностная температура радиатора.

Данная процедура повторяется при увеличенной мощности рассеяния нагревателя. Мощность рассеяния нагревателя должна быть увеличенной до тех пор, пока внутренняя температура $T_{A,1}$ выше, чем установившаяся температура окружающей среды $T_{A,3}$.

Процедура эксперимента продолжается таким же образом, как описано для различных температур окружающей среды $T_{A,3}$.

Оценка данных осуществляется в соответствии с формулами 4–7.

Для проверки данных и настройки измерения результаты термодинамических балансов должны соответствовать результатам калориметрических расчетов и отличаться менее чем на 5 %.

$$\left|\frac{Q_D - Q_D^{calo}}{Q_D}\right| 100\% = \left|\frac{Q_H - Q_L + Q_{F,c} - \left[\dot{V}_h \cdot \rho \cdot C_p \cdot \left(T_{A,4} - T_{A,3}\right)\right]}{Q_H - Q_L + Q_{F,c}}\right| 100\% \le 5\%. \quad (12)$$

$$\left|\frac{Q_C - Q_C^{calo}}{Q_C}\right| 100\% = \left|\frac{Q_C + Q_E + Q_{F,h} - \left[\dot{V}_c \cdot \rho \cdot C_p \cdot \left(T_{A,1} - T_{A,2}\right)\right]}{Q_C + Q_E + Q_{F,h}}\right| 100\% \le 5\%. \quad (13)$$

С помощью полученных данных возможно построить график, как показано на рисунке 5.

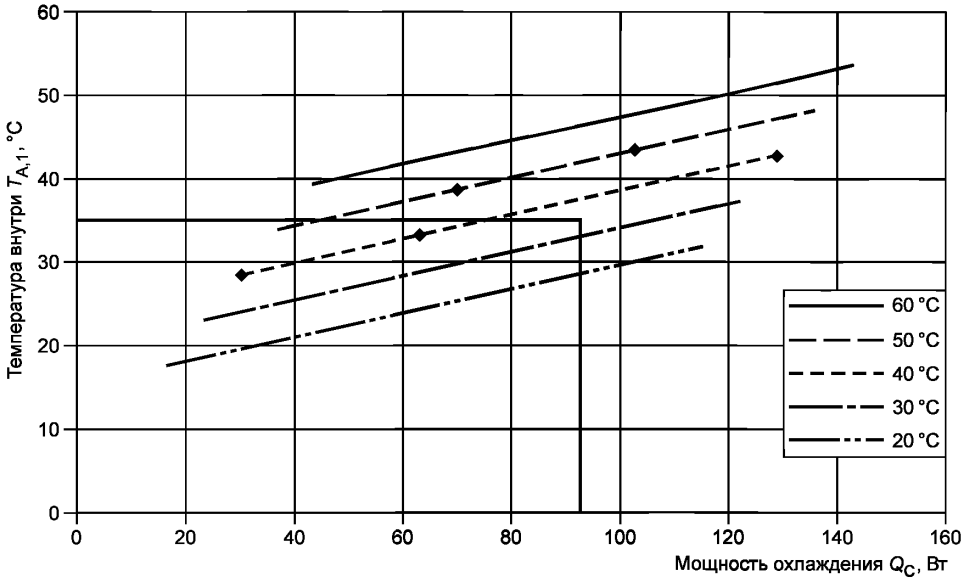


Рисунок 5 — Результаты измерений

Рисунок 5 показывает зависимость мощности охлаждения Q_C от температуры внутри $T_{A,4}$ при заданной температуре окружающей среды $T_{A,3}$.

Для достижения оптимальной мощности охлаждения Q_C термоэлектрической системы охлаждения Пельтье определение разницы температур между температурой внутри $T_{A,1}$ и температурой окружающей среды $T_{A,3}$ важно по двум причинам. Во-первых, эта разница температур влияет на направление потери тепла (положительная, если $T_{A,4} < T_{A,3}$, и, если наоборот, отрицательная), см. формулу 4. Во-вторых, эта разница температур влияет на температуру горячей и холодной сторон самого охлаждающего устройства Пельтье, и этот факт непосредственно зависит от штатного режима функционирования элемента Пельтье согласно рисунку 1.

Зависимость охлаждающей способности температуры окружающей среды $T_{A,3}$ возникает как результат физических свойств элемента Пельтье по формуле 1.

Расстояние между каждой кривой различных температур окружающей среды $T_{A,3}$ приблизительно постоянно.

$$COP_{Pe} = \frac{Q_{C,Pe}}{Q_E}. \quad (14)$$

Кроме того, рекомендуется определить *COP* (коэффициент полезного действия) элемента Пельтье, основанный на оптимальной мощности охлаждения Q_C и электрической мощности, применяемой к элементу Пельтье.

$$COP_S = \frac{Q_C}{Q_E}. \quad (15)$$

И, наконец, возможно определить COP всей термоэлектрической системы охлаждения (Пельтье), основанной на общей примененной мощности. Она включает в себя мощность, применяемую к устройству Пельтье, мощность, применяемую к обоим вентиляторам, и мощность, применяемую к любому другому электрическому прибору в термоэлектрическом охлаждающем устройстве Пельтье.

$$COP_{общий} = \frac{Q_C}{\Sigma_i Q_E}. \quad (16)$$

В качестве попутного замечания, каждый из этих холодильных коэффициентов (*COP*) зависит от температур $T_{A,1}$ и $T_{A,3}$.

Суммируя сказанное, для объективного сравнения термоэлектрических систем охлаждения (Пельтье) рекомендуется иметь следующие доступные данные:

- мощность охлаждения Q_C при $T_{A,1} = T_{A,3} = 35$ °C с тремя соответствующими холодильными коэффициентами (COP_S);
- мощность охлаждения Q_C при $T_{A,1} = T_{A,3} = 45$ °C с тремя соответствующими холодильными коэффициентами (COP);
- ток, который используется в термоэлектрическом охлаждающем устройстве Пельтье;
- ток, который применяется в вентиляторах;
- дополнительно полезные параметры воздушного потока и перепад давления.

На рисунке 6 приведен пример детализации термоэлектрического охлаждающего устройства (Пельтье).

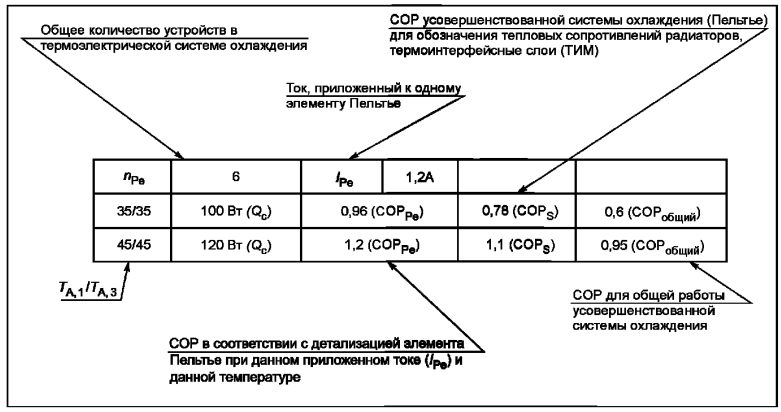


Рисунок 6 — Пример детализации термоэлектрической системы охлаждения (Пельтье)

Приложение А
(справочное)

Предварительный расчет

А.1 Предварительный расчет

Данные, приведенные на рисунке 5, перечислены в таблице А.1.

Таблица А.1 — Данные, используемые при измерении

$T_{A,3}$	$T_{A,1}$	Q_c
60,0	39,4	43,9
60,0	44,1	76,8
60,0	48,7	110,0
60,0	53,6	142,6
50,0	34,0	37,1
50,0	38,7	70,0
50,0	43,4	102,9
50,0	48,2	135,8
40,0	28,5	30,3
40,0	33,3	63,1
40,0	38,0	96,0
40,0	42,7	129,0
30,0	23,1	23,4
30,0	27,8	56,3
30,0	32,5	89,2
30,0	37,3	122,1
20,0	17,6	16,6
20,0	22,3	49,5
20,0	27,1	82,4
20,0	31,8	115,3

Для следующего предварительного расчета будут рассмотрены: точка измерения при температуре окружающей среды $T_{A,3}$, равной 50 °С, внутренняя температура $T_{A,1}$, равная 43,4 °С и полученная оптимальная мощность охлаждения Q_c, равная 102,9 Вт.

Предварительные эксперименты определили общий коэффициент теплоотдачи k, равный 1,5 Вт/м^2 · °С при площади поверхности шкафа S, равной 1 м^3.

Температуры даны ниже:

$T_{A,1}$ = 43,4 °C;

$T_{A,2}$ = 38,1 °C;

$T_{A,3}$ = 50,0 °C (температура окружающего воздуха);

$T_{A,4}$ = 55,9 °C.

Исходная тепловая мощность Q_H равна 80 Вт, мощность, приложенная к вентилятору на холодной стороне, $Q_{F,c}$ равна 13 Вт, а мощность, подаваемая на горячую сторону, $Q_{F,H}$ равна 26 Вт.

Термоэлектрическая система охлаждения (Пельтье) состоит из шести элементов Пельтье, при этом к каждому элементу был приложен ток I_{Pe}, равный 1,2 А, и напряжение U_{Pe}, равное 14,8 В. Q_{Pe} составляет в общем 106,56 Вт.

Воздушные потоки на горячей стороне V_H равны 119 м^3/ч и на холодной стороне V_C равны 58 м^3/ч.

Потери тепла через стенки шкафа Q_L, Вт, вычисляют по формуле

$$Q_L = k \cdot S(T_{A,1} - T_{A,3}) = -9,9.$$

Оптимальную мощность охлаждения Q_C, Вт, вычисляют по формуле

$$Q_C = Q_H - Q_L + Q_{F,c} = 80 - (-9,8) + 13 = 102,9.$$

Калориметрический расчет мощности охлаждения проводят по формуле

$$Q_C^{calo} = \dot{V}_{ch} \cdot \rho \cdot c_p \left(T_{A,1} - T_{A,2}\right) = \frac{58}{3600} 1,184 \cdot 1005 (43,4 - 38,1) = 101,6 \text{ Вт}.$$

В соответствии с формулой (5) тепло Q_D, Вт, вычисляют по формуле

$$Q_D = Q_C + Q_E + Q_{F,h} = 102,9 + 106,57 + 26 = 234,16.$$

Калориметрический расчет на горячей стороне проводят по формуле

$$Q_D^{calo} = V_h \cdot \rho \cdot c_p \left(T_{A,4} - T_{A,3}\right) = \frac{119}{3600} 1,184 \cdot 1005 (55,9 - 50) = 232,1 \text{Вт}.$$

Проверку результатов проводят следующим образом:

$$\frac{Q_C - Q_C^{calo}}{Q_C} 100\% = \frac{102,9 - 101,6}{102,9} 100\% = 1,26\% \le 5\%;$$

$$\frac{Q_D - Q_{DC}^{calo}}{Q_D} 100\% = \frac{234,2 - 232,1}{2342} 100\% = 1,44\% \le 5\%.$$

Определение коэффициентов производительности производится следующим образом:

COP элементов Пельтье должен быть извлечен из детализации изготовления элементов Пельтье при заданных рабочих условиях.

$\text{COP}_{PE} = \frac{Q_{cPe}}{Q_E}$ из детализации элемента Пельтье.

COP термоэлектрической системы охлаждения вычисляют по формуле (12).

$$\text{COP}_S = \frac{Q_C}{Q_E} = \frac{102,9}{106,56} = 0,97.$$

Общий COP вычисляют по формуле (13).

$$\text{COP}_{\text{общий}} = \frac{Q_C}{Q_E + Q_{F,c} + Q_{F,h}} = \frac{102,9}{106,56 + 13 + 26} = 0,71.$$

Этот расчет может быть сделан для каждой комбинации температур $T_{A,1}$ и $T_{A,3}$ (температура окружающей среды), несмотря на то, что допустима линейная интерполяция между точками измерения.

Данный факт позволяет дать требуемые определения Q_C, COP_{PE}, COP_S, $\text{COP}_{\text{общий}}$ при температуре $T_{A,3}$ = 35 °C и внутренней температуре $T_{A,1}$ = 35 °C и при температурах $T_{A,3}$ = 45 °C и $T_{A,1}$ = 45 °C для термоэлектрических охлаждающих систем (Пельтье) наряду со всеми другими требуемыми характеристиками, такими как ток и напряжение, применяемыми к элементам Пельтье, вентиляторам и скачкам давления.

Отсутствие конденсации водяных паров должно быть предусмотрено для всех точек согласно рисунку А.1. Это можно легко показать с помощью h-x-диаграммы Моллье, как изображено на рисунке А.1. Оба впускных клапана в термоэлектрической системе охлаждения имеют температуру 35 °С и относительную влажность 50 %. Холодный поток воздуха охлаждается до 30 °С. Таким образом, относительная влажность поднимается до величины около 65 %. Конденсации не происходит. Горячий поток воздуха нагревается до 44 °С, относительная влажность уменьшается до примерно 35 %. Конденсации снова не происходит.

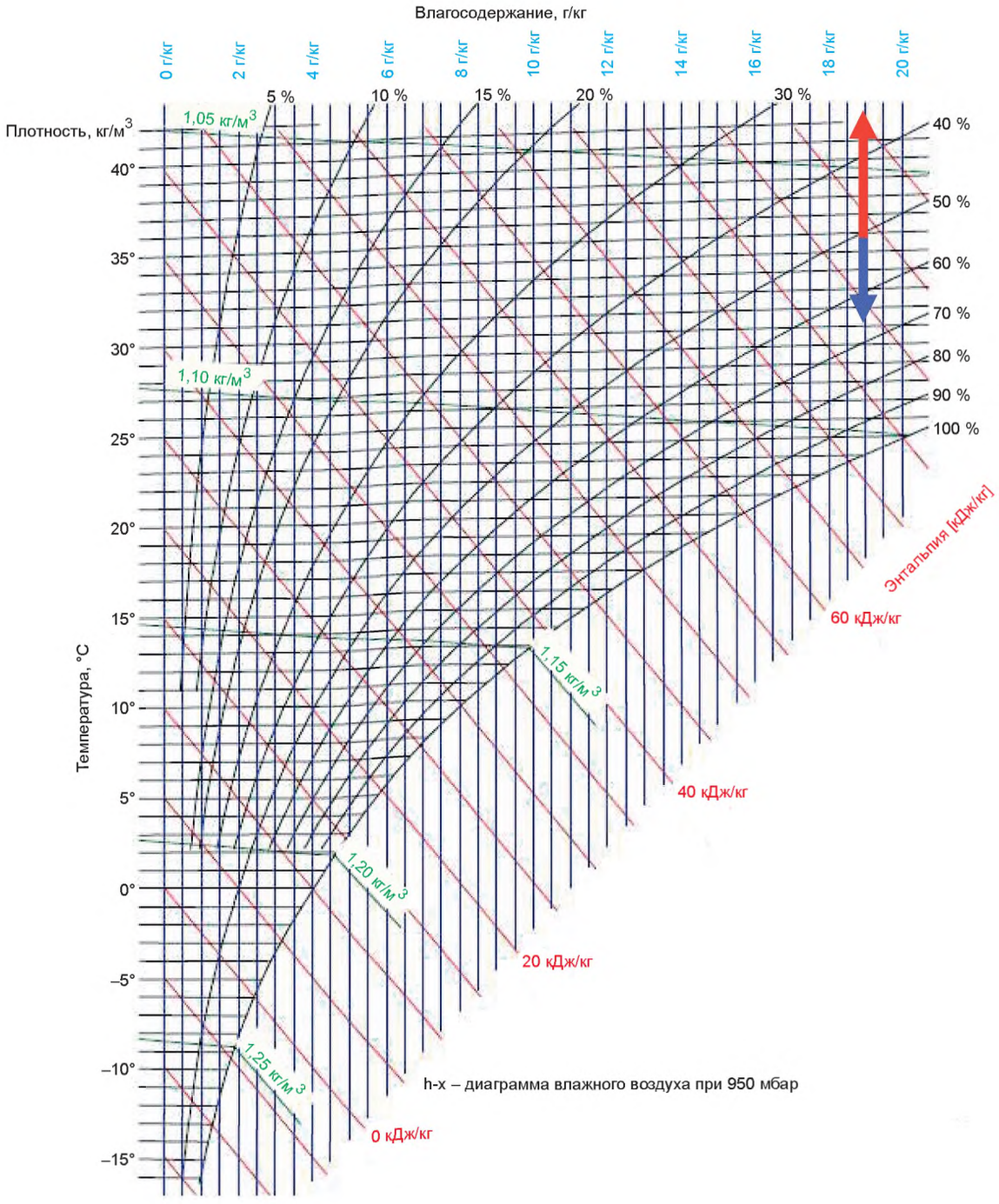


Рисунок А.1 — h-x — диаграмма Моллье для влажного воздуха

Внутренний поток воздуха охлаждается от температуры $T_{A,1}$ = 35 °С до $T_{A,2}$ = 30 °С, в то время как внешний поток воздуха нагревается от температуры $T_{A,3}$ = 35 °С до $T_{A,4}$ = 43 °С. Относительная влажность воздуха составляет 50 % для обоих воздушных потоков.

А.2 Примечания

А.2.1 Общие сведения

В соответствии с Киотским протоколом и директивами Европейского парламента и Европейского совета необходимо избегать использования охладителей с высокой вероятностью загрязнения окружающей среды и глобального потепления (фактор ПГП, потенциал глобального потепления). Наиболее перспективные альтернативные варианты для компрессора охлаждения, например R134a, охлаждение компрессора с помощью CO_2, активное охлаждение на основе эффекта Пельтье и абсорбционной охладительной системы. Каждое из этих технических средств имеет свои преимущества и недостатки.

Охлаждение компрессора с помощью CO_2 в текущем состоянии более или менее эффективно, но высокая стоимость установки за счет рабочих давлений до 120 бар делают эту технологию менее интересной. Другой недостаток охлаждающей системы с CO_2 возникает из-за физических свойств данного охладителя и требует дополнительной мощности для охлаждения, чтобы управлять данным процессом. Этот факт в значительной степени уменьшает степень эффективности.

Представляется, что эффект Пельтье перспективен, так как эффект охлаждения в высокой степени зависит от свойств материала. Недавно прошедшие испытания материалы на основе пористых материалов или наноструктур показывают значительное улучшение степени производительности. Кроме того, технологии Пельтье не нуждаются в любого рода охладителях, не имеют движущихся частей, кроме вентиляторов, а общее проектирование блока охлаждения вполне осуществимо.

Техника абсорбции является очень рациональным путем для охлаждения, но она рентабельна в комбинации с регенератором тепла, который делает эту систему охлаждения выполнимой лишь в очень немногих случаях.

А.2.2 Эффект Пельтье

Принципы эффекта Пельтье представлены на рисунке А.2.

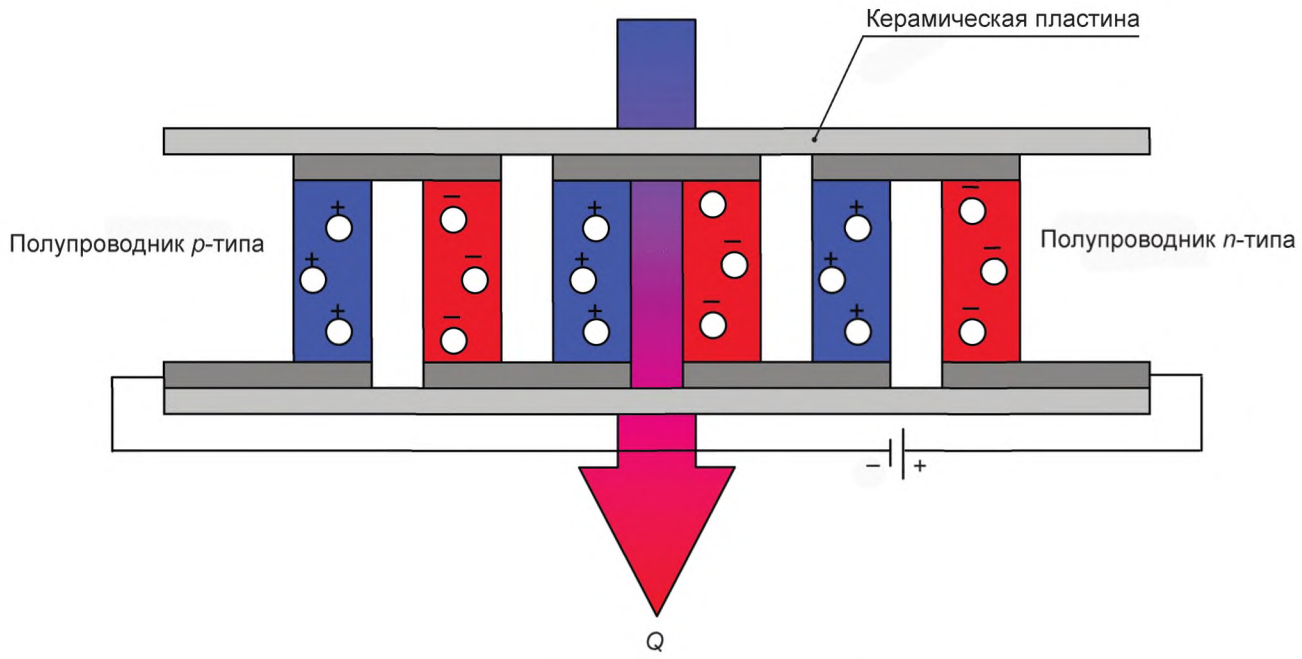


Рисунок А.2 — Принципы эффекта Пельтье

Термоэлектрическое охлаждение использует эффект Пельтье, чтобы создать тепловой поток между соединениями двух различных типов материалов. Охладитель Пельтье, нагреватель или термоэлектрический тепловой насос — это полупроводниковый тепловой насос в активном состоянии, который переносит тепло с одной стороны прибора на другую сторону при градиенте температур (от холодного к горячему), потребляя электрическую энергию. Такое устройство также называется элементом Пельтье, диодом Пельтье, тепловым насосом Пельтье, рефрижератором в твердом активном состоянии или термоэлектрическим охладителем (ТЭО). Простое подсоединение его к напряжению постоянного тока приведет к тому, что одна сторона будет охлаждаться, а другая сторона — нагреваться. Эффективность насоса при удалении тепла с холодной стороны полностью зависит от количества поступающего тока и от того, насколько полно будет отведено тепло с горячей стороны.

В настоящее время наиболее распространенными материалами, используемыми в элементах Пельтье, являются теллурид висмута (Bi_2Te_3) и кремний-германий. Теллурид висмута, полупроводник *n*-типа, является эффективным

термоэлектрическим материалом за счет высокого коэффициента Зеебека α (напряжение на единицу разности температур) — 287 мкВ/°С.

Его термоэлектрическая энергия также сочетается с высокой электропроводностью 1,1 · 105 См/м и очень низкой теплопроводностью 1,20 Вт/(м · °С), аналогично с обычным стеклом. Для оценки материалов был введен термин «термоэлектрическая эффективность» (см. рисунок А.3), который представляет собой отношение между электропроводностью α и теплопроводностью λ.

$$ZT = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\lambda} K. \qquad (A.1)$$

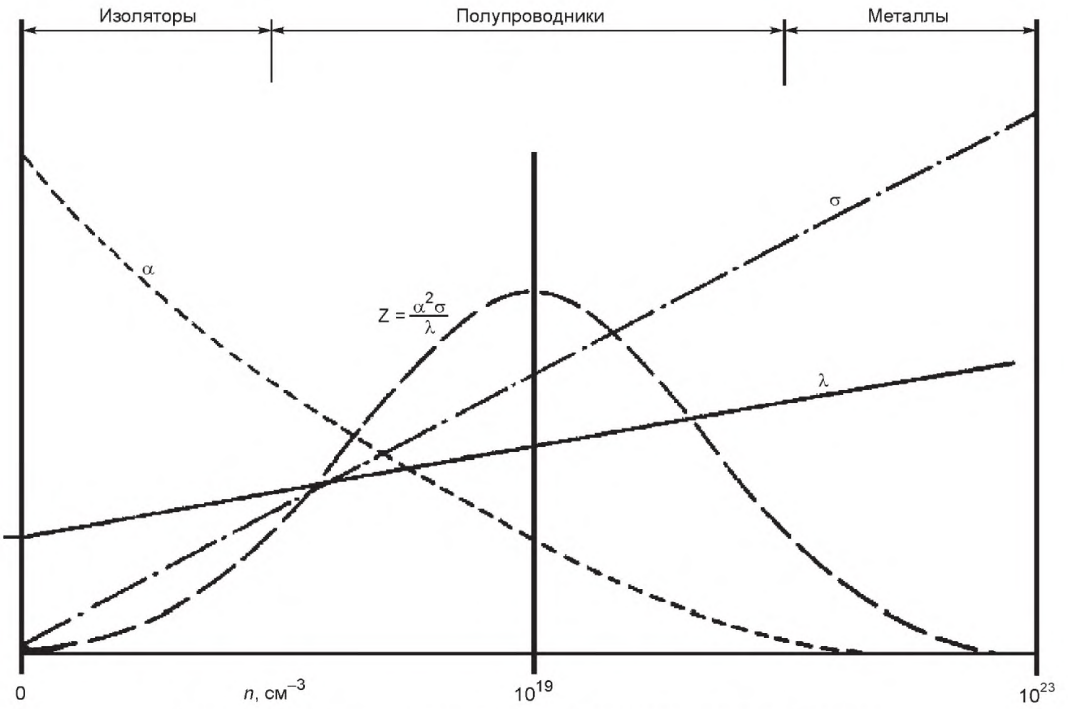
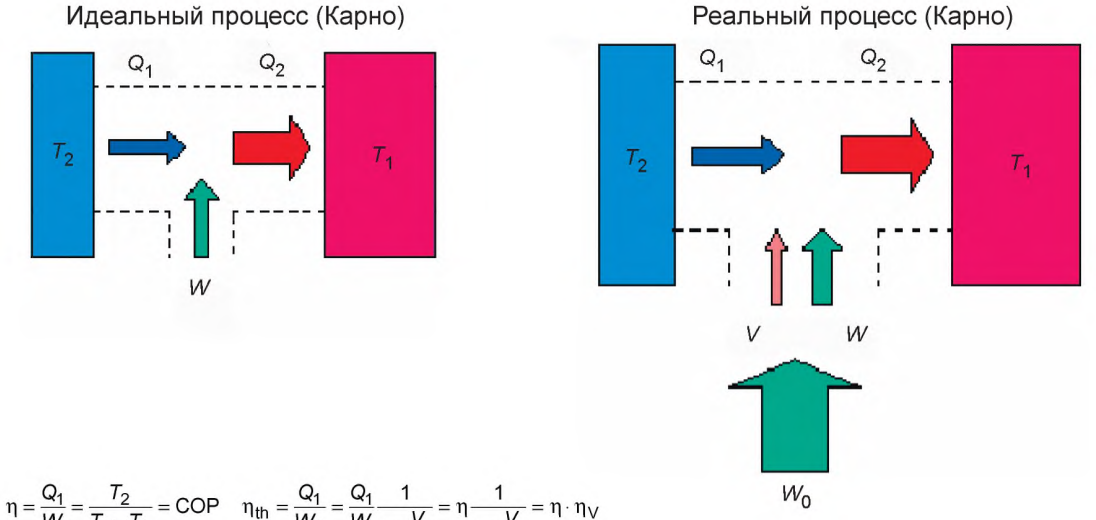


Рисунок А.3 — График зависимости Z от числа носителей заряда



$$\eta = \frac{Q_1}{W} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \text{COP} \qquad \eta_{th} = \frac{Q_1}{W_0} = \frac{Q_1}{W} \frac{1}{1 + \frac{V}{W}} = \eta \frac{1}{1 + \frac{V}{W}} = \eta \cdot \eta_V$$

Рисунок А.4 — Влияние термоэлектрической эффективности ZT на коэффициент полезного действия элемента Пельтье

Объединение двух уравнений приводит к следующей формуле:

$$\eta_{Th} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{\sqrt{1 + Z\frac{T_1 + T_2}{2} - \frac{T_2}{T_1}}}{\sqrt{1 + Z\frac{T_1 + T_2}{2}} + 1}. \quad (A.2)$$

Рисунок А.4 показывает значимость термоэлектрической эффективности (ZT) для элемента Пельтье. Как было упомянуто выше, сегодня исследовательская деятельность направлена на поиск новых материалов для увеличения эффективности.

Эффективная охлаждающая способность элемента Пельтье описана также с помощью следующей формулы, представленной на рисунке А.5:

$$Q_{cPe} = \alpha \cdot I \cdot T_c - \frac{1}{2} I^2 \cdot R_{Pe} - \left(\frac{\lambda_{Pe} \cdot S_{Pe}}{x_{Pe}} \right) (T_{4h} - T_{4c}), \text{ Вт.}$$

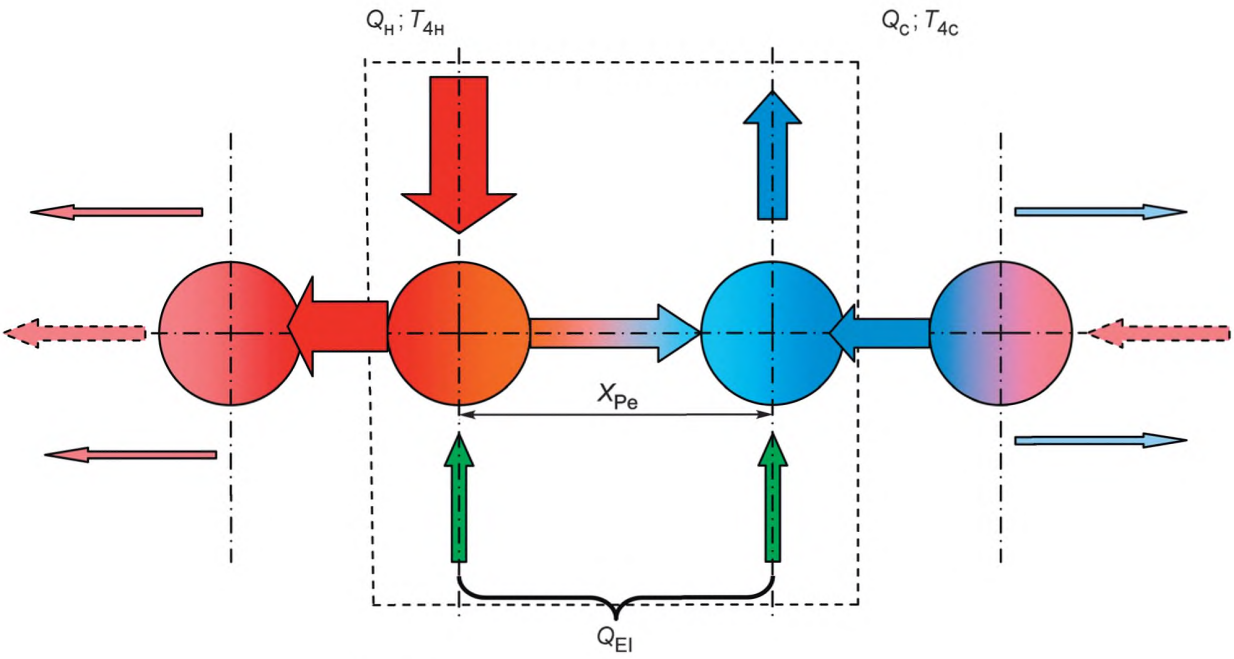


Рисунок А.5 — Границы разделов термодинамической установки элемента Пельтье

Охлаждающая способность одного элемента Пельтье Q_{cPe} зависит от различных факторов. Член формулы $\alpha \cdot I \cdot T_c$ — это максимальная охлаждающая способность, основанная на эффекте Пельтье, в то время как α — это коэффициент Зеебека.

Член формулы $\frac{1}{2} I^2 \cdot R_{Pe}$ представляет собой джоулево тепло, член формулы $\frac{\lambda_{Pe} \cdot A_{Pe}}{x_{Pe}} (T_{4h} - T_{4c})$ — это теплопроводность между горячей и холодной сторонами через элемент Пельтье.

А.2.3 Термоэлектрические системы охлаждения

Термоэлектрическая система охлаждения переносит тепло Q_c от одного рабочего вещества к другому, при этом данные рабочие вещества могут быть газообразными или жидкими. Для лучшей теплопередачи радиаторы соединены с каждой стороны с элементом Пельтье. Материал, используемый для соединения, называется термоинтерфейсным слоем.

Как показано на рисунке А.6, среда 2 при температуре T_7 проходит через радиатор термоэлектрической системы охлаждения (Пельтье), который имеет температуру T_6 и охлаждается с помощью конвекции. Тепло передается через радиатор по закону проводимости при данном градиенте температуры между T_6 и T_5. Затем поток тепла проходит через термоинтерфейсный слой за счет явления проводимости. Элемент Пельтье отвечает за основной температурный градиент.

На горячей стороне элемента Пельтье поток тепла проходит через термоинтерфейсный слой и радиатор за счет явления проводимости, и в результате тепло отводится рабочим веществом I на горячей стороне путем конвекции (см. рисунок А.6).

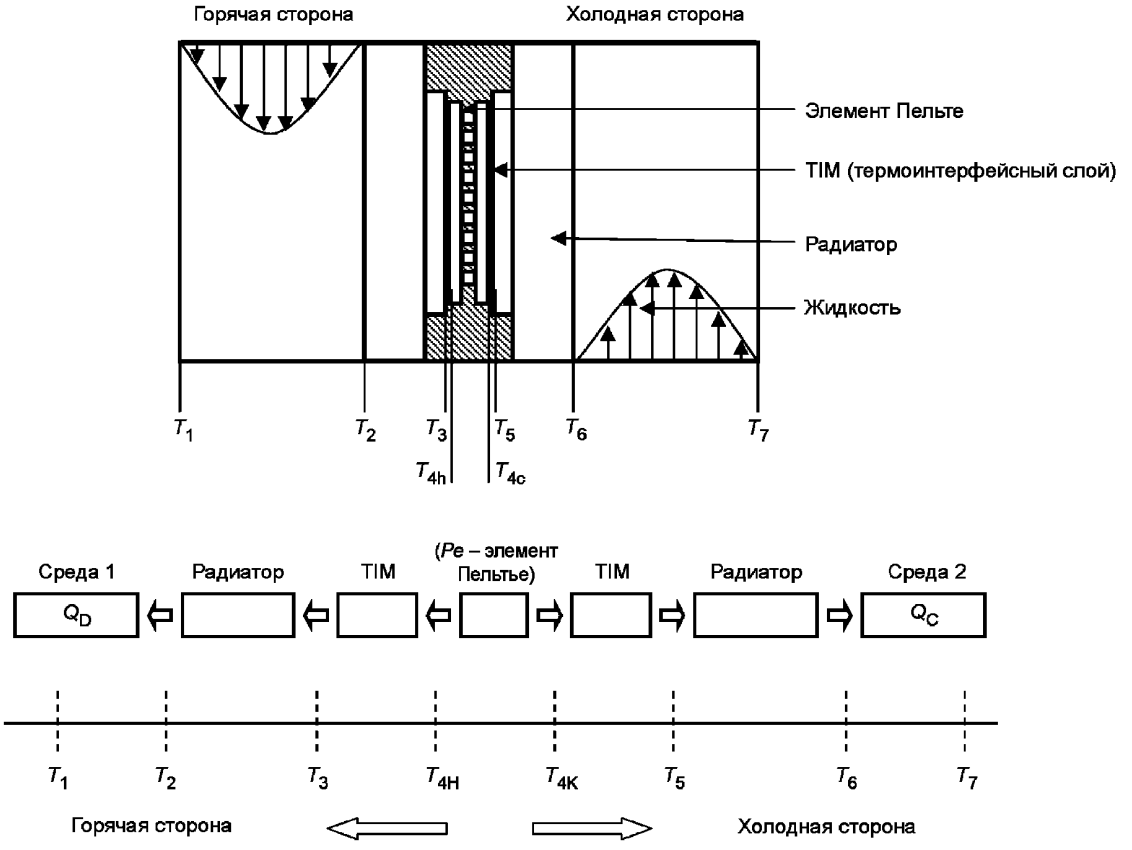


Рисунок А.6 — Тепловое сопротивление термоэлектрической системы охлаждения

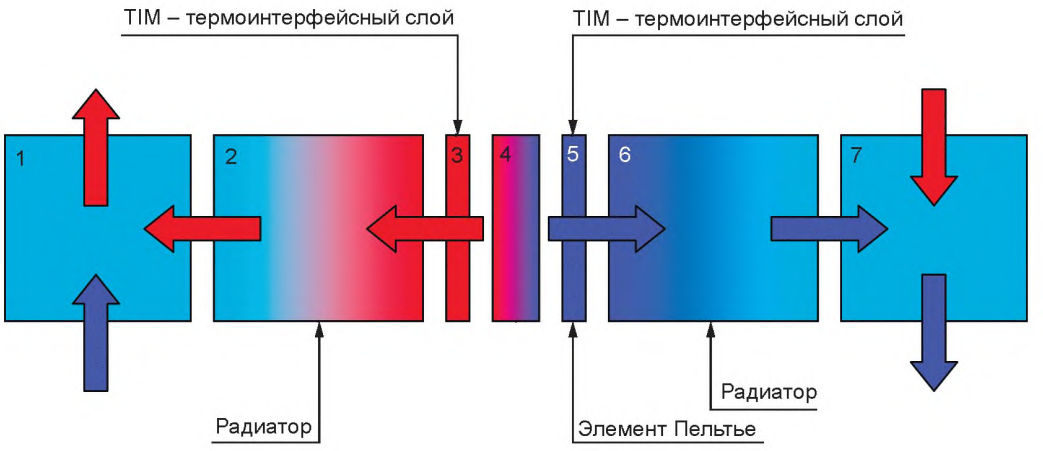
Полное тепловое сопротивление, которое уменьшает общий поток тепла, есть сумма каждого сопротивления любого описываемого процесса согласно рисунку А.7.

$$R_1 = \frac{T_2 - T_1}{Q_D}\ ^\circ C/Вт; \qquad R_5 = \frac{T_5 - T_{4K}}{Q_C}\ ^\circ C/Вт;$$

$$R_2 = \frac{T_3 - T_2}{Q_D}\ ^\circ C/Вт; \qquad R_6 = \frac{T_6 - T_5}{Q_C}\ ^\circ C/Вт;$$

$$R_3 = \frac{T_{4H} - T_3}{Q_D}\ ^\circ C/Вт; \qquad R_7 = \frac{T_7 - T_6}{Q_C}\ ^\circ C/Вт.$$

$$R_{общее} = \sum_{i=1}^{7} R_i. \qquad (А.3)$$



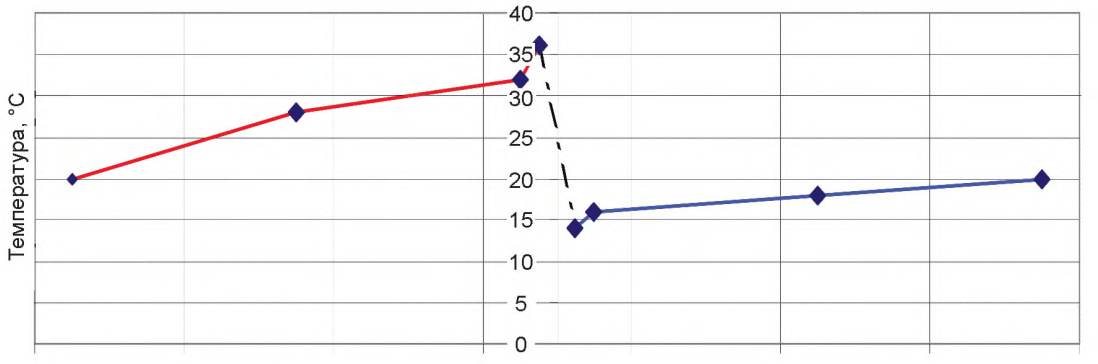


Рисунок А.7 — Обычная температурная кривая термоэлектрической системы охлаждения

Для оценки эффективности термоэлектрической системы охлаждения используется COP.

$$COP = \frac{Q_C}{Q_E}. \qquad (A.4)$$

Он представляет собой отношение между оптимальной охлаждающей способностью и полной электрической энергией, применяемой к термоэлектрической системе охлаждения.

А.2.4 Тепловое сопротивление

А.2.4.1 Сопротивление между жидкостью и радиатором

Теплопередача от жидкости к радиатору — это в основном функция скорости и конфигурация радиатора и может выражаться как коэффициент обратной теплопередачи α, Вт/(м^2 · °С). Оптимизация теплового сопротивления также влияет на работу вентилятора и потребление им энергии, на шумовое излучение и полученный скачок давления в радиаторе. Уменьшение теплового сопротивления между радиатором и жидкостью, особенно воздушного потока, является существенным для эффективной работы термоэлектрической системы охлаждения (см. рисунок А.8).

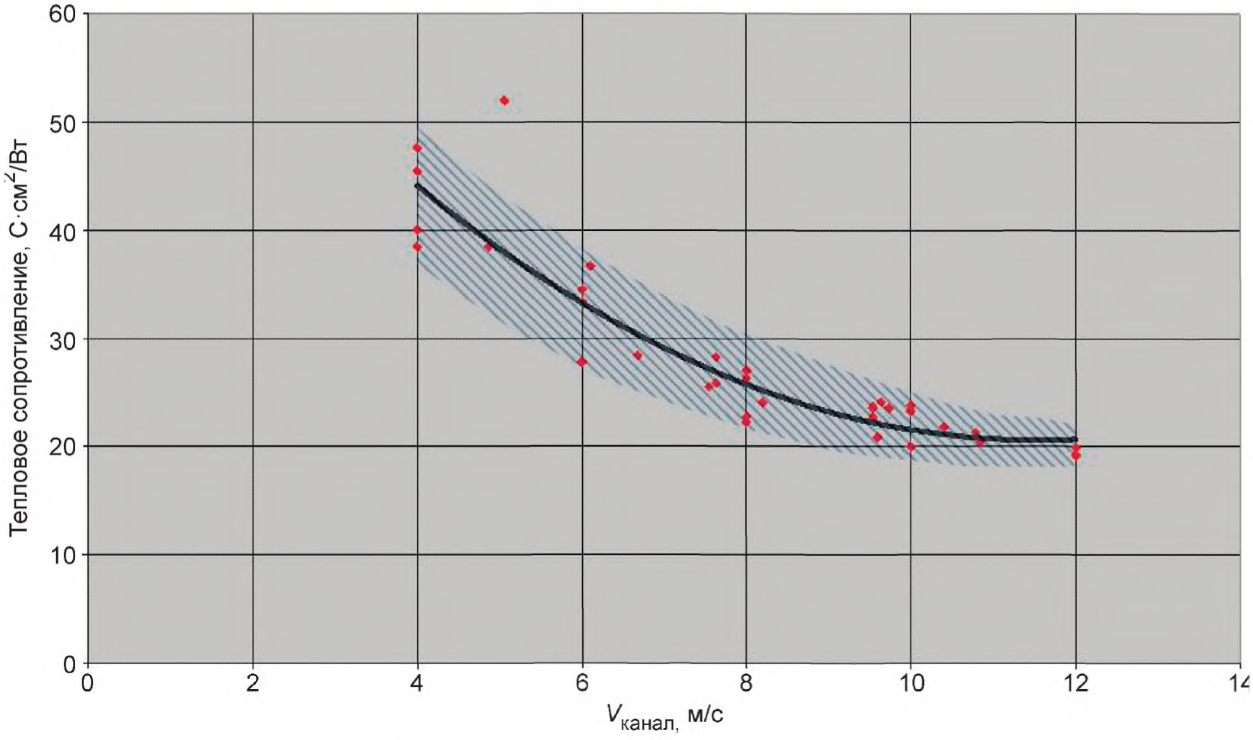


Рисунок А.8 — Пример теплового сопротивления между воздухом и радиатором как функция скорости воздушного потока

А.2.4.2 Сопротивление радиатора

Тепловое сопротивление радиатора зависит от конфигурации радиатора и материала, из которого он изготовлен. С помощью текущего программного обеспечения для моделирования можно прогнозировать распределение температуры и тепловых сопротивлений при заданных тепловых потоках и граничных условиях. На рисунке А.9 приведены некоторые примеры стандартного радиатора для различных граничных условий.

Следующие условия характеризуют хороший теплоотвод:

Большая поверхность радиатора. Именно на поверхности радиатора имеет место теплоотдача. Следовательно, радиатор должен быть сконструирован так, чтобы иметь большую поверхность; эта цель может быть достигнута при использовании большого количества мелких охлаждающих ребер или путем увеличения размера самого радиатора.

Хорошая аэродинамика. Радиатор должен быть сконструирован таким образом, чтобы воздух мог легко и быстро проходить через радиатор и достигать всех ребер охлаждения. Особенно радиаторы, имеющие очень большое количество мелких ребер, с малыми расстояниями между ребрами не могут обеспечить хороший поток воздуха. Должен быть найден компромисс между большой площадью (много ребер с небольшими промежутками между ними) и хорошими аэродинамическими свойствами.

Хороший теплообмен в радиаторе. Большие охлаждающие ребра бессмысленны, если тепло не может дойти до них, поэтому радиатор должен быть сконструирован так, чтобы предусмотреть хороший теплообмен между источником тепла и ребрами. Более толстые ребра имеют лучшую термическую проводимость; поэтому опять должен быть найден компромисс между большой площадью (много тонких ребер) и хорошей теплоотдачей (более толстые ребра).

Абсолютная ровность контактной поверхности. Часть радиатора, которая контактирует с источником тепла, должна быть абсолютно ровной. Ровная контактная поверхность позволяет использовать более тонкий слой термопасты, которая уменьшает тепловое сопротивление между радиатором и источником тепла.

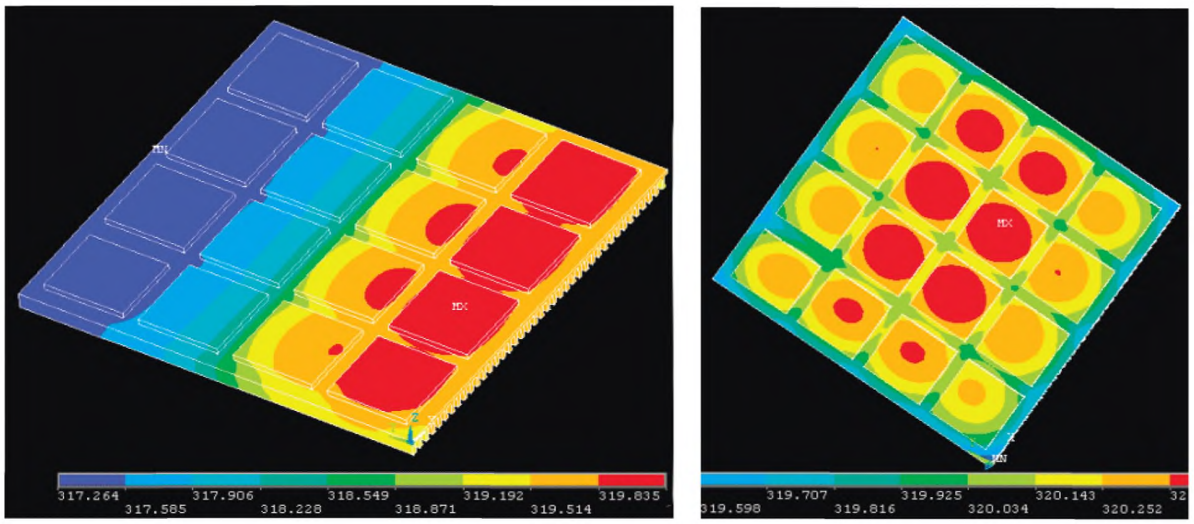


Рисунок А.9 — Распределение температуры общего теплоотвода при заданных граничных условиях

А.2.4.3 Сопротивление термоинтерфейсного слоя (см. рисунок А.10)

Поверхность радиатора никогда не бывает полностью ровной; если радиатор помещается непосредственно на элемент Пельтье, будут крошечные (невидимые) промежутки между двумя приборами. Так как воздух плохо проводит тепло, эти промежутки оказывают негативный эффект на теплоотдачу. Таким образом, интерфейсный слой с высокой термической проводимостью необходим для того, чтобы заполнить эти зазоры и таким образом улучшить теплопроводность между элементом Пельтье и радиатором.

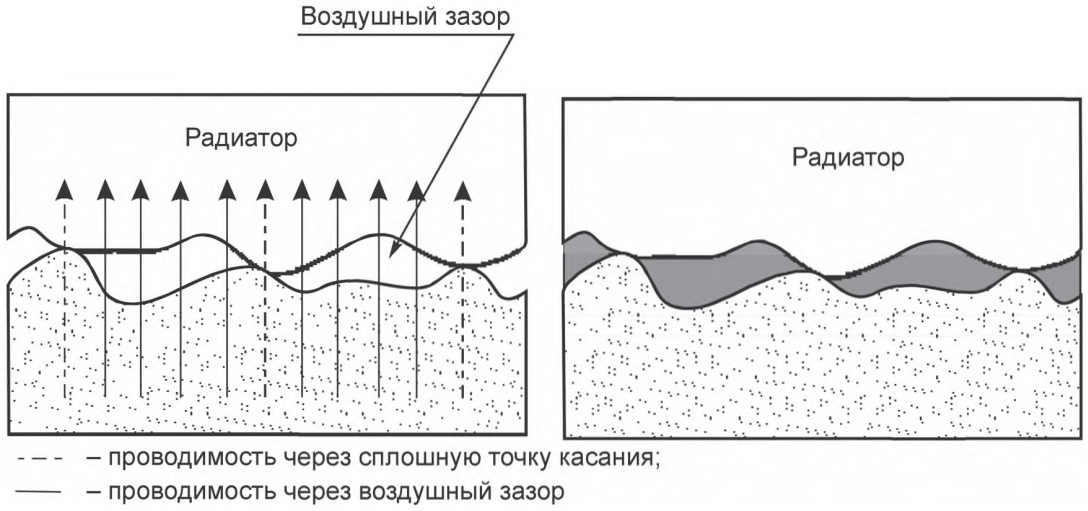


Рисунок А.10 — Графическое изображение значения слоя термоинтерфейса (TIM)

Самой распространенной является термопаста белого цвета, обычно силиконовая смазка, заполненная оксидом алюминия, оксидом цинка или нитридом бора. Некоторые сорта слоя термоинтерфейса используют тонкоизмельченное или пылевидное серебро.

Другие типы термоинтерфейсных материалов — это материалы с обратимыми фазами. Они твердые при комнатной температуре и жидкие (ведут себя как смазка) при рабочей температуре. С ними легко работать, и они не создают беспорядок.

Как показано на рисунке А.10, слой термоинтерфейса очень важен. Монтаж радиаторов на устройство Пельтье является важным шагом и требует много опыта.

А.2.4.4 Тепловое сопротивление элемента Пельтье

Элемент Пельтье нагнетает тепло с холодной стороны на горячую сторону. На основе градиента температуры между горячей и холодной сторонами образуется обратный поток тепла через элемент Пельтье.

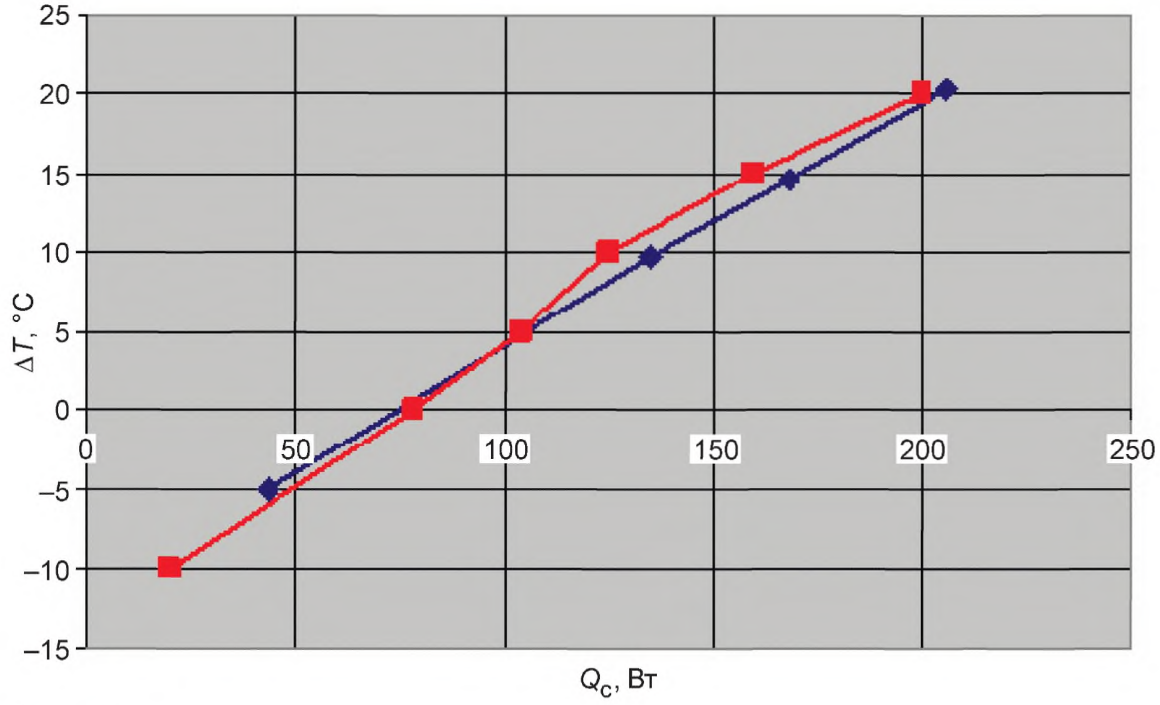
Тепловая проводимость между горячей и холодной сторонами через элемент Пельтье может быть описана с помощью $\frac{\lambda_{Pe} \cdot A_{Pe}}{x_{Pe}}(T_{4h} - T_{4c})$ [см. формулу (А.3)], она снижает эффективную мощность охлаждения элемента Пельтье.

Данное тепловое сопротивление является функцией констант материала и относится к упомянутой выше термоэлектрической эффективности ZT.

Для более детального рассмотрения данной, в высшей степени сложной темы см. статью Лона Э. Белла в журнале «Наука», т. 321, с. 1457–1461, озаглавленную «Охлаждение, отопление, вырабатывание электроэнергии и регенерация излишков тепла с помощью термоэлектрических систем».

А.2.5 Условия эксплуатации

Контролировать термоэлектрические системы охлаждения очень трудно. Оптимизированные термоэлектрические системы охлаждения должны работать эффективно за счет установки напряжения, применяемого к элементам Пельтье, и широкого диапазона мощностей вентиляторов. Эффективная охлаждающая способность термоэлектрической системы охлаждения — это функция температуры окружающей среды и температуры внутренней поверхности, как показано на рисунке А.11.



Обозначения:

■ – калориметрические измерения;

◆ – термодинамические измерения

Рисунок А.11 — Зависимость эффективной охлаждающей способности Q_C от разности температур ΔT между температурой воздуха внутри корпуса и температурой окружающей среды

Зависимость эффективной охлаждающей способности приводит к использованию регулируемой циркуляции, где в качестве параметра интенсивности входящего потока используется температура окружающей среды, в качестве контрольной переменной — напряжение на элементах Пельтье и напряжение на вентиляторах, а в качестве целевого параметра — температура внутренней поверхности, что обеспечивает целевую функцию оптимизации коэффициента полезного действия (COP).

Для реализации экономичной регулируемой циркуляции все зависимости между данными параметрами при заданных условиях должны быть известны. Это не тривиальный вопрос и требует большого опыта поставленной задачи.

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочного международного стандарта национальному стандарту

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочного международного стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование соответствующего национального стандарта
IEC 62194:2005	—	*
* Соответствующий национальный стандарт отсутствует.		

Библиография

МЭК/ТС 62610-1 IEC/TS 62610-1: Mechanical structures for electronic equipment — Thermal management for cabinets in accordance with IEC 60297 and IEC 60917 — Part 1: Design guide: Interface dimensions and provisions for electrical thermoelectrical cooling systems (Peltier effect) (Механические конструкции для электронного оборудования. Управление температурными режимами шкафов в соответствии с требованиями серий МЭК 60297 и МЭК 60917. Часть 1. Руководство по проектированию: размеры интерфейса и обеспечение термоэлектрическими системами охлаждения) (электротермический эффект Пельтье)

УДК 621.396:69:006.354 ОКС 31.240 ОКП 348420 Э02 IDT

Ключевые слова: конструкции несущие базовые, средства радиоэлектронные, шкафы, серии МЭК 60917 и МЭК 60297, управление температурным режимом, метод оценки термоэлектрических систем охлаждения, эффект Пельтье, руководство по проектированию

Редактор *О.И. Любушкин*
Корректор *Г.В. Яковлева*
Компьютерная верстка *Ю.В. Поповой*

Сдано в набор 21.06.2016. Подписано в печать 30.08.2016. Формат 60 × 84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,26.

Набрано в ИД «Юриспруденция», 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, 11.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

Издано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995, Москва, Гранатный пер., 4.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru