

УДК 621.382.53

## Новые термоэлектрические охладители Пельтье для глубокого охлаждения

В. Г. Охрем

Харьковский национальный технический университет (Харьковский политехнический институт)  
Черновицкий факультет, г. Черновцы, Украина

*Предложены и исследованы модели термоэлектрических охладителей, работающих на эффекте Пельтье, с составными ветвями и вспомогательным термоэлементом, а также охладителей с дополнительными проводящими элементами, которые более просты в конструктивном отношении и не уступают по глубине охлаждения двухкаскадным холодильникам.*

Термоэлектрические охлаждающие устройства эффективно используются для снижения рабочей температуры разного рода микросенсоров, микроэлектронных приборов и др. Они применяются в метрологии, медицине и других областях.

В наиболее распространенных охладителях основным является термопарный элемент, который состоит из двух ветвей  $p$ - и  $n$ -типа проводимости, коммутационной перемычки и термостатированных токоподводов.

При соответствующем направлении тока перемычка вследствие действия эффекта Пельтье охлаждается. Величина максимального снижения температуры  $(\Delta T)_{\max}$  определяется параметром термоэлектрической эффективности, температурой термостата  $T_0$  и величиной оптимального тока, и получить больший перепад температуры, чем  $(\Delta T)_{\max}$ , при помощи термопарного элемента невозможно.

Для достижения дополнительного охлаждения используется метод каскадирования [1, 2]. При каскадировании горячие торцы верхних термоэлементов охлаждаются термоэлементами, которые расположены ниже, что приводит к большему снижению температуры, чем при использовании одного термоэлемента или каскада. При увеличении числа каскадов можно в принципе получить сколь угодно низкое охлаждение.

Основным недостатком каскадированных холодильников является большое количество паяных контактов и керамических прослоек. Паяные контакты влияют на термоэлектрические характеристики приборов, а керамические прослойки — на их тепловые процессы. Следует указать также на значительную трудоемкость изготовления таких приборов. Указанные недостатки

каскадированных термоэлектрических охладителей стимулировали автора на поиск путей их замены более простыми в конструктивном отношении, а, возможно, и более эффективными с точки зрения максимального снижения температуры.

### Термоэлектрический охладитель с составными ветвями для глубокого охлаждения

Рассматриваемый охладитель представляет собой устройство, состоящее из двух термоэлементов, — основного (рис. 1, слева) и вспомогательного (рис. 1, справа). Каждая из ветвей  $n$ - и  $p$ -типа проводимости основного термоэлемента разделена на две части:  $n$ -ветвь на части  $2n$  и  $3n$ , а  $p$ -ветвь — на  $2p$  и  $3p$ . Между частями  $2n$  и  $3n$  и, соответственно,  $2p$  и  $3p$  вставлены металлические пластины 8, которые через теплопроводящую керамическую прослойку 7 соединены с коммутационной перемычкой 5 дополнительного термоэлемента, ветви которого обозначены  $1n$  и  $1p$ . 6 — коммутационная перемычка основного термоэлемента. Охладитель работает следующим образом. Через термоэлементы пропускаются токи, которые вследствие действия эффекта Пельтье охлаждают перемычки 5 и 6. Отработанное в частях ветвей основного термоэлемента  $3n$  и  $3p$  тепло сбрасывается в термостат 4 не только через части ветвей  $2n$  и  $2p$ , но и через металлические пластины 8 на холодную пластину 5 вспомогательного термоэлемента, что является тепловой нагрузкой вспомогательного термоэлемента. Вследствие такого перераспределения отработанного

тепла глубина охлаждения основного термоэлемента увеличивается.

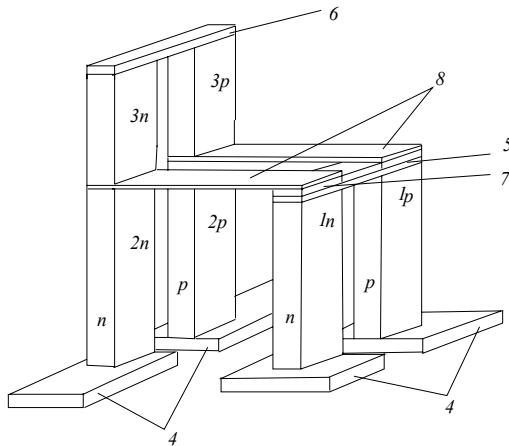


Рис. 1. Принципиальная схема охладителя с составными ветвями

На рис. 2 дана схема  $n$ -половины охладителя, который состоит из ветви  $1n$  и ветви, состоящей из частей  $2n$  и  $3n$ . Вторая половина представляет собой аналогичную конструкцию из термоэлектрика  $p$ -типа. Эти половины соединяются между собой коммутационными перемычками 5 (верхние торцы ветвей  $1n$  и  $1p$ ) и 6 (верхние торцы областей  $3n$  и  $3p$ ). В этом случае можно считать, что ток и температура одномерны, т.е. зависят только от координаты  $x$ . Токотководы 4 термостатированны при температуре  $T_0$ .

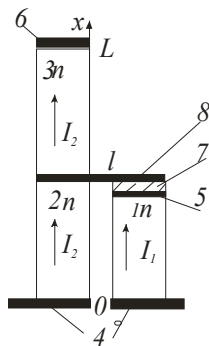


Рис. 2. Схема  $n$ -половины охладителя с составными ветвями

Пусть перемычки 6 и 8 имеют температуры  $T_L$  и  $T_l$ , соответственно, а  $I_1$  и  $I_2$  — токи вдоль соответствующих ветвей. Проведем расчет распределения температур в областях 1, 2, 3, а также температур  $T_l$  и  $T_L$  при заданной холодопроизводительности  $Q_L$ , пренебрежении толщинами деталей 5—8 и при двух условиях: 1) кинетические коэффициенты материалов, из которых изготовлены ветви термоэлементов, не зависят от температуры; 2) кинетические коэффициенты материалов ветвей зависят от температуры.

При выполнении первого условия распределения температур в областях 1—3 описываются уравнениями теплопроводности

$$\chi_{ki} \frac{\partial^2 T_{ki}}{\partial x^2} + \rho_{ki} j_{ki}^2 = 0. \quad (1)$$

Граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} T_{1i}(0) &= T_0, & T_{1i}(l) &= T_l; \\ T_{2i}(0) &= T_0, & T_{2i}(l) &= T_l; \\ T_{3i}(l) &= T_l, & T_{3i}(L) &= T_L. \end{aligned} \quad (2)$$

Решения задачи:

$$\begin{aligned} T_{1i} &= \frac{\rho_{1i} j_{1i}^2}{2\chi_{1i}} x(l-x) + \frac{T_l - T_0}{l} x + T_0; \\ T_{2i} &= \frac{\rho_{2i} j_{2i}^2}{2\chi_{2i}} x(l-x) + \frac{T_l - T_0}{l} x + T_0; \end{aligned} \quad (3)$$

$$T_{3i} = \frac{\rho_{2i} j_{2i}^2}{2\chi_{2i}} x(L+l-x) + \frac{T_L - T_l}{L-l} x - \frac{T_L l - T_l L}{L-l} - \frac{\rho_{2i} j_{2i}^2}{2\chi_{2i}} L l.$$

В выражениях (1)—(3) первый индекс означает номер области, а второй —  $i = n$  или  $p$ -материал;  $\rho_{1i}$ ,  $\rho_{2i}$  — удельные сопротивления и  $\chi_{1i}$ ,  $\chi_{2i}$  — теплопроводности материалов ветвей;  $j_{1i}$ ,  $j_{2i}$  — плотности токов в ветвях;  $L$ ,  $l$  — геометрические размеры термоэлементов (см. рис. 2). Материалы областей 2 и 3 выбраны одинаковыми.

Температуры  $T_L$ ,  $T_l$  вычислены при условиях, что задана холодопроизводительность  $Q_L$  и что тепло, которое выделяется на нижних торцах областей 3, является тепловой нагрузкой областей 1 и 2. Эти условия представляются выражениями

$$\begin{aligned} Q_L &= S_{2n} \left( -\chi_{2n} \frac{dT_{3n}}{dx} \Big|_{x=L} + \alpha_{2n} j_{2n} T_L \right) + \\ &+ S_{2p} \left( -\chi_{2p} \frac{dT_{3p}}{dx} \Big|_{x=L} + \alpha_{2p} j_{2p} T_L \right); \\ &S_{2n} \left( -\chi_{2n} \frac{dT_{3n}}{dx} \Big|_{x=l} + \alpha_{2n} j_{2n} T_l \right) + \\ &+ S_{2p} \left( -\chi_{2p} \frac{dT_{3p}}{dx} \Big|_{x=l} + \alpha_{2p} j_{2p} T_l \right) = \\ &= S_{2n} \left( -\chi_{2n} \frac{dT_{2n}}{dx} \Big|_{x=l} + \alpha_{2n} j_{2n} T_l \right) + \\ &+ S_{2p} \left( -\chi_{2p} \frac{dT_{2p}}{dx} \Big|_{x=l} + \alpha_{2p} j_{2p} T_l \right) + \\ &+ S_{1n} \left( -\chi_{1n} \frac{dT_{1n}}{dx} \Big|_{x=l} + \alpha_{1n} j_{1n} T_l \right) + \\ &+ S_{1p} \left( -\chi_{1p} \frac{dT_{1p}}{dx} \Big|_{x=l} + \alpha_{1p} j_{1p} T_l \right). \end{aligned}$$

Далее принято, что  $\chi_{1n} = \chi_{2n} = \chi_n$ ,  $\chi_{1p} = \chi_{2p} = \chi_p$ ,  $\rho_{1p} = \rho_{2p} = \rho_p$ ,  $\rho_{1n} = \rho_{2n} = \rho_n$ , термоЭДС  $\alpha_{1p} = \alpha_{2p} = \alpha_p$ ,  $\alpha_{1n} = \alpha_{2n} = \alpha_n$ , площади поперечного сечения частей ветвей основного термоэлемента одинаковы и составляют, соответственно,  $S_{2n}$  и  $S_{2p}$ . Используя выражения (3) и указанные условия, а также соотношения  $j_{2n} = I_2/S_{2n}$ ,  $j_{2p} = -I_2/S_{2p}$  и  $j_{1n} = I_1/S_{1n}$ ,  $j_{1p} = -I_1/S_{1p}$ , получим для температур  $T_L$  и  $T_I$

$$T_L = \frac{1}{2} \left( \frac{\rho_n}{S_{2n}} + \frac{\rho_p}{S_{2p}} \right) I_2^2 (L - l)^2 + (\chi_n S_{2n} + \chi_p S_{2p}) T_I - Q_L (L - l) = \frac{\chi_n S_{2n} + \chi_p S_{2p} + \Delta \alpha I_2 (L - l)}{2 \left( \frac{\rho_n}{S_{2n}} + \frac{\rho_p}{S_{2p}} \right) I_2^2 (L - l)^2 + (\chi_n S_{2n} + \chi_p S_{2p}) T_I - Q_L (L - l)},$$

$$T_I = \frac{U}{V}.$$

Здесь

$$U = \frac{\chi_n S_{1n} + \chi_p S_{1p} + \chi_n S_{2n} + \chi_p S_{2p}}{I} T_0 + \frac{1}{2} \left( \frac{\rho_n}{S_{2n}} + \frac{\rho_p}{S_{2p}} \right) I_2^2 L + \frac{1}{2} \left( \frac{\rho_n}{S_{1n}} + \frac{\rho_p}{S_{1p}} \right) I_1^2 l + \frac{1}{2} \left( \frac{\rho_n}{S_{2n}} + \frac{\rho_p}{S_{2p}} \right) I_2^2 (L - l) - Q_L + (\chi_n S_{2n} + \chi_p S_{2p}) \frac{1}{\chi_n S_{2n} + \chi_p S_{2p} + \Delta \alpha I_2 (L - l)};$$

$$V = \frac{\chi_n S_{2n} + \chi_p S_{2p}}{L - l} + \Delta \alpha I_1 + \frac{\chi_n S_{2n} + \chi_p S_{2p} + \chi_n S_{1n} + \chi_p S_{1p}}{I} - \frac{1}{L - l} \frac{(\chi_n S_{2n} + \chi_p S_{2p})^2}{\chi_n S_{2n} + \chi_p S_{2p} + \Delta \alpha I_2 (L - l)},$$

где  $S_{1n}$ ,  $S_{1p}$  — площади поперечного сечения ветвей  $p$ - и  $n$ -типа проводимости вспомогательного термоэлемента;

$$\Delta \alpha = \alpha_p - \alpha_n.$$

Выражения для холодопроизводительности  $Q_L$  и теплопроизводительности  $Q_0$  имеют вид

$$Q_L = \frac{1}{2} \left( \frac{\rho_n}{S_{2n}} + \frac{\rho_p}{S_{2p}} \right) I_2^2 (L - l) + (\chi_n S_{2n} + \chi_p S_{2p}) \frac{T_I - T_L}{L - l} - \Delta \alpha I_2 T_L;$$

$$Q_0 = -\frac{1}{2} \left( \frac{\rho_n}{S_{2n}} + \frac{\rho_p}{S_{2p}} \right) I_2^2 L - \frac{1}{2} \left( \frac{\rho_n}{S_{1n}} + \frac{\rho_p}{S_{1p}} \right) I_1^2 l + \frac{\chi_n S_{1n} + \chi_p S_{1p} + \chi_n S_{2n} + \chi_p S_{2p}}{I} (T_0 - T_I) - \Delta \alpha (I_1 + I_2) T_0.$$

Зная  $Q_L$  и  $Q_0$ , можно рассчитать холодильный коэффициент по формуле

$$\varepsilon = \frac{Q_L}{Q_0 - Q_L}.$$

Приведем результаты числовых расчетов минимальной температуры  $T_L$  (при условии  $Q_L = 0$ ), оптимальных токов  $I_1$  и  $I_2$ , площадей поперечных сечений ветвей, значения  $l$  при заданном  $L$ . Числовые расчеты проведены с помощью математического пакета *Maple*. При расчетах приняты такие значения материальных и размерных констант:  $\rho_p = \rho_n = 10^{-3}$  Ом·см,  $\chi_n = \chi_p = 1,6 \cdot 10^{-2}$  Вт/см·К,  $\Delta \alpha = 3,9 \cdot 10^{-4}$  В/К, длина основного термоэлемента  $L = 0,5$  см. Площади поперечных сечений вспомогательного термоэлемента изменялись в пределах  $S_{1n} = S_{1p} = 0,06 \text{—} 0,08$  см<sup>2</sup>, а рабочего —  $S_{2n} = S_{2p} = 0,02$  см<sup>2</sup>.

Глубина охлаждения основного термоэлемента увеличивается с уменьшением  $l$  и при  $l = 0,1$  см составляет 199 К. Расчеты показывают, что дальнейшее уменьшение этой величины не приводит к увеличению глубины охлаждения.

При  $L = 0,5$  см,  $l = 0,1$  см,  $S_{1n} = S_{1p} = 0,07$  см<sup>2</sup> и  $S_{2n} = S_{2p} = 0,02$  см<sup>2</sup> получено:  $I_1 = 33,5$  А,  $I_2 = 2$  А,  $T_L = 199$  К, а при  $S_{1n} = S_{1p} = 0,08$  см<sup>2</sup> и прочих равных условиях  $I_1 = 38$  А,  $I_2 = 2$  А,  $T_L = 199$  К, т. е. глубина охлаждения больше не увеличивается. Увеличение поперечного сечения вспомогательного термоэлемента приводит к увеличению потребляемой им электрической мощности без увеличения глубины охлаждения. Отсюда можно сделать вывод, что оптимальными параметрами в данном случае являются:  $l = 0,1$  см,  $S_{1n} = S_{1p} = 0,07$  см<sup>2</sup>,  $I_1 = 33,5$  А,  $I_2 = 2$  А,  $T_L = 199$  К.

Из приведенных числовых значений видно, что вспомогательный термоэлемент существенно увеличивает глубину охлаждения основного термоэлемента. Увеличение поперечного сечения ветвей вспомогательного термоэлемента усиливает эффект охлаждения (рассмотренный охладитель дает температуру 199 К, а оптимизированный термоэлемент Пельтье, изготовленный из того же материала, — 232 К), однако сила тока через него увеличивается. Таким образом, рассмотренный термоэлектрический охладитель при независимом питании термоэлементов дает более глубокое охлаждение, чем отдельный оптимизированный термоэлемент.

Учтена также зависимость кинетических коэффициентов от температуры. Строго и последовательно такой учет можно провести лишь при помощи специальной составленной компьютерной программы с использованием экспериментальных зависимостей кинетических коэффициентов от температуры. Однако ввиду того, что в температурном интервале 200—300 К указанные зависимости близки к линейным, расчет минимальной температуры  $T_L$  можно приближенно сделать аналитически. Считается, что кинетические коэффициенты материалов ветвей имеют вид:  $\chi_i = \chi_{0i} + \chi_{1i} T$ ,

$\alpha_i = \alpha_{0i} + \alpha_{1i}T$ , где  $i$ , как и выше, означает тип проводимости, а константы, входящие в эти выражения, определяются из экспериментальных зависимостей, которые взяты из работы [2].

Аналитические выражения, которые были использованы для расчетов, получены следующим образом. Распределения температур в ветвях были найдены при помощи выражений (1), (2), в которых использованы средние значения кинетических коэффициентов, найденные из экспериментальных зависимостей [2]. Зависимость кинетических коэффициентов от температуры учтена при написании выражений для нулевой холодопроизводительности и условия сшивания на границе  $x = l$ . Эти условия имеют такой вид:

$$\begin{aligned}
 & -(\chi_{0n} + \chi_{1n}T_L) \frac{dT_{3n}}{dx} \Big|_{x=L} S_{2n} - (\chi_{0p} + \chi_{1p}T_L) \frac{dT_{3p}}{dx} \Big|_{x=L} \times \\
 & \quad \times S_{2p} - (\alpha_{0p} - \alpha_{0n} + (\alpha_{1p} - \alpha_{1n})T_L) T_L l_2 = 0; \\
 & -(\chi_{0n} + \chi_{1n}T_l) \frac{dT_{3n}}{dx} \Big|_{x=l} S_{2n} - (\chi_{0p} + \chi_{1p}T_l) \frac{dT_{3p}}{dx} \Big|_{x=l} S_{2p} = \\
 & = -(\chi_{0n} + \chi_{1n}T_l) \frac{dT_{2n}}{dx} \Big|_{x=l} S_{2n} - (\chi_{0p} + \chi_{1p}T_l) \frac{dT_{2p}}{dx} \Big|_{x=l} S_{2p} - \\
 & -(\chi_{0n} + \chi_{1n}T_l) \frac{dT_{1n}}{dx} \Big|_{x=l} S_{1n} - (\chi_{0p} + \chi_{1p}T_l) \frac{dT_{3p}}{dx} \Big|_{x=l} S_{1p} - \\
 & \quad - (\alpha_{0p} - \alpha_{0n} + (\alpha_{1p} - \alpha_{1n})T_l) T_l l_1.
 \end{aligned}$$

Из экспериментальных зависимостей кинетических коэффициентов от температуры было найдено:  $\chi_{0n} = 2,6 \cdot 10^{-2}$  Вт/(К·см),  $\chi_{0p} = 2,45 \cdot 10^{-2}$  Вт/(К·см),  $\chi_{1n} = -0,37 \cdot 10^{-4}$  Вт/(К·см),  $\chi_{1p} = -0,35 \cdot 10^{-4}$  Вт/(К·см),  $\alpha_{0n} = -1,1 \cdot 10^{-4}$  В/К,  $\alpha_{0p} = 0,59 \cdot 10^{-4}$  В/К,  $\alpha_{1n} = -0,3 \cdot 10^{-6}$  В/К,  $\alpha_{1p} = -0,47 \cdot 10^{-6}$  В/К. При указанных выше средних значениях материальных констант, высот ветвей  $l$  и  $L$ , поперечных сечений и токов было найдено, что  $T_L = 212$  К, а  $T_l = 248$  К. Вычисления проведены с помощью математического пакета *Maple*.

Из сравнения результатов расчетов при помощи двух моделей видно, что в случае зависимости кинетических коэффициентов от температуры глубина охлаждения на 13 К меньше, нежели когда коэффициенты постоянны. Этот результат, по мнению автора, ближе к действительности.

Отметим, что по глубине охлаждения рассмотренная модель не уступает стандартному двухкаскадному охладителю. Он может использоваться для глубокого охлаждения разного рода микроэлектронных устройств.

**Термоэлектрический охладитель с ветвями p- и n-типа проводимости L-образной или тавровой формы**

Охладитель с ветвями L-подобной формы представлен на рис. 3. Он состоит из двух ветвей p- и n-типа

проводимости 1 и 2, которые имеют одинаковую L-подобную форму, проводящей коммутационной пластины 3 с контактами 4, дополнительной коммутационной пластины 5 с контактами 6 и термостатированных при температуре  $T_0$  токоподводов 7. При помощи токоподводов 7 к ветвям прикладывается напряжение, которое вырабатывает токи через коммутационные пластины. Охлаждение пластины 5 из-за действия эффекта Пельтье приводит к ответвлению через нее части отработанного в верхней половине охладителя тепла, вследствие чего эффект охлаждения усиливается.

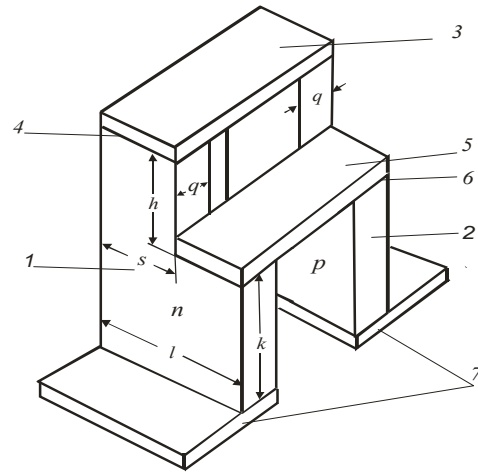


Рис. 3. Схема термоэлектрического охладителя с ветвями p- и n-типа проводимости L-подобной форм

Схема термоэлектрического охладителя с ветвями p- и n-типа проводимости тавровой формы дана на рис. 4. Вместо одной дополнительной коммутационной пластины этот охладитель имеет две дополнительные коммутационные пластины. Через каждую из них ответвляется часть отработанного в верхней половине охладителя тепла, что приводит к увеличению глубины охлаждения верхней коммутационной пластины.

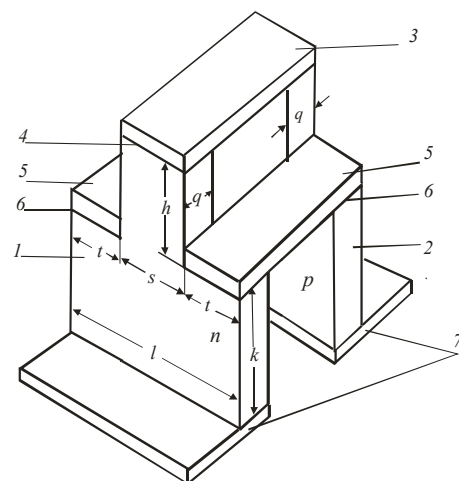


Рис. 4. Тавровый термоэлектрический охладитель

На рис. 4 обозначения те же, что и на рис. 3; кроме того, обозначены размеры ветвей на обоих рисунках.

Возможны также термоэлектрические охладители с ветвями одинаковой ступенчатой формы, которые

имеют три и более дополнительные коммутационные пластины.

По сравнению с каскадированными охладителями описанные термоохладители при прочих равных условиях являются более технологичными вследствие значительно меньшего количества структурных элементов. Это означает, что существенно уменьшается число коммутационных элементов, а число ветвей уменьшается до двух. Вследствие этого должны увеличиться их прочность и уменьшиться габариты и масса.

Основная идея, на которой основан эффект усиления термоэлектрического охлаждения, состоит в том, что через холодные площадки нижних коммутационных пластин ответвляется часть отработанного в верхней области охладителя тепла. Так, указанное тепло отбирается одной холодной дополнительной коммутационной пластиной (см. рис. 3) или двумя (см. рис. 4) и вместе с теплом, которое стекает в термостат, минуя указанные холодные пластины, является тепловой нагрузкой нижней части охладителя.

Будем считать, что температура и плотность тока одномерны. Очевидно, что это приближение будет тем лучше выполняться, чем большим будет различие между поперечными сечениями верхней и нижней частей указанных ветвей

(см. рис. 3 и 4). При условиях одномерности температуры и электрического тока, а также постоянства кинетических коэффициентов температура в каждой из частей ветви удовлетворяет уравнению

$$\chi \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho j^2 = 0,$$

где  $\chi$  и  $\rho$  — удельные теплопроводность и электрическое сопротивление, соответственно;

$j$  — плотность электрического тока, которая при условии его одномерности является постоянной.

Линейные размеры ветвей  $p$ - и  $n$ -типа проводимости выбираются одинаковыми, площади поперечного сечения различны. На рис. 5 представлена схема одной из ветвей, которая применена для расчета распределения температур. Ветвь разбита на две части 1 и 2, распределения температур в которых при условиях, что температура зависит только от  $x$ , а плотность тока постоянна, при граничных условиях

$$T_1(l) = T_l, \quad T_1(L) = T_L, \quad T_2(0) = T_0, \quad T_2(l) = T_l$$

имеют вид

$$T_1(x) = \frac{\rho j^2}{2\chi} x(l-x) - \frac{\Delta T}{l} x + T_0; \quad (4)$$

$$T_2(x) = \frac{\rho j^2}{2\chi} (L+l-x) - \frac{T_l - T_L}{L-l} x - \frac{T_L l - T_l L}{L-l} - \frac{\rho j^2}{2\chi} Ll, \quad (5)$$

где  $\Delta T = T_0 - T_l$ .

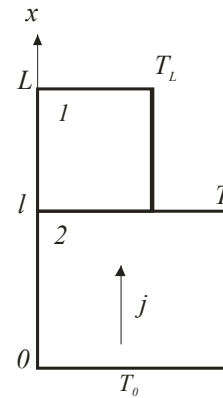


Рис. 5. Схема L-подобной ветви, примененная при расчете распределения температуры в частях ветви 1 и 2.

$L$  и  $l$  — линейные размеры,  $T_L$  и  $T_l$  — соответствующие температуры; температура нижней грани ветви —  $T_0$

Необходимо рассчитать температуру  $T_l$  и минимально возможную температуру верхней коммутационной пластины  $T_L$ , подобрав оптимальные геометрические размеры охладителя и оптимальный ток, считая, что ветви  $n$ - и  $p$ -типа проводимости имеют L-подобную форму.

Для расчетов глубины охлаждения использовано условие адиабатической изоляции верхней коммутационной пластины охладителя, которое имеет вид

$$\begin{aligned} & \left( -\chi_n \frac{\partial T_{2n}(L)}{\partial x} + \alpha_n j_n T_L \right) S_{2n} + \\ & + \left( -\chi_p \frac{\partial T_{2p}(L)}{\partial x} + \alpha_p j_p T_L \right) S_{2p} = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

и условие каскадирования

$$\begin{aligned} & \left( -\chi_n \frac{\partial T_{2n}(l)}{\partial x} + \alpha_n j_n T_l \right) S_{2n} + \\ & + \left( -\chi_p \frac{\partial T_{2p}(l)}{\partial x} - \alpha_p j_p T_l \right) S_{2p} = \\ & = \left( -\chi_n \frac{\partial T_{1n}(l)}{\partial x} + \alpha_n j_n T_l \right) S_{1n} + \\ & + \left( -\chi_p \frac{\partial T_{1p}(l)}{\partial x} - \alpha_p j_p T_l \right) S_{1p}. \end{aligned} \quad (7)$$

В приведенных выражениях приняты обозначения:

$\rho_n, \rho_p$  и  $\chi_n, \chi_p$  — удельные электрические сопротивления и теплопроводности материалов  $p$ - и  $n$ -ветвей, соответственно;

$\alpha_n$  и  $\alpha_p$  — коэффициенты их термоЭДС;

$S_{1p}, S_{2p}$  и  $S_{1n}, S_{2n}$  — площади поперечных сечений областей 1 и 2  $p$ - и  $n$ -ветвей;

$j_p$  и  $j_n$  — плотности токов в ветвях.

Совместное рассмотрение уравнений (6) и (7) с учетом выражений для распределения температур в ветвях (4) и (5) приводит к следующим выражениям для искомым температур:

$$T_L = \frac{\frac{1}{2} \left( \frac{\rho_n}{S_{1n}} + \frac{\rho_p}{S_{1p}} \right) I^2 \frac{S_{2n}}{S_{1n}} (L-l) + (\chi_n S_{2n} + \chi_p S_{2p}) \frac{T_l}{L-l}}{\frac{(\chi_n S_{2n} + \chi_p S_{2p})}{L-l} + \Delta\alpha I \frac{S_{2n}}{S_{1n}}};$$

$$T_l = \left\{ \frac{\chi_n S_{2n} + \chi_p S_{2p}}{L-l} \left( \frac{\chi_n S_{2n} + \chi_p S_{2p}}{L-l} + \Delta\alpha I \frac{S_{2n}}{S_{1n}} \right) / \right.$$

$$\left. / \frac{\chi_n S_{2n} + \chi_p S_{2p}}{L-l} \left[ \frac{\chi_n S_{1n} + \chi_p S_{1p}}{l} + \Delta\alpha I \right] + \right.$$

$$\left. + \Delta\alpha I \frac{S_{2n}}{S_{1n}} \left[ \frac{\chi_n S_{1n} + \chi_p S_{1p}}{l} + \Delta\alpha I \left( 1 - \frac{S_{2n}}{S_{1n}} \right) \right] \right\} \times$$

$$\times \left[ \frac{S_{1n}}{S_{2n}} \frac{L-l}{l} T_0 + \right.$$

$$\left. + \frac{l^2}{2} \left( \frac{\rho_n}{S_{1n}} + \frac{\rho_p}{S_{1p}} \right) \frac{\chi_n S_{2n} + \chi_p S_{2p}}{L-l} \left( 2 \frac{S_{2n}}{S_{1n}} (L-l) - l \right) + \right.$$

$$\left. + \Delta\alpha I \frac{S_{2n}}{S_{1n}} \frac{l^2}{2} \left( \frac{\rho_n}{S_{1n}} + \frac{\rho_p}{S_{1p}} \right) \left( \frac{S_{2n}}{S_{1n}} (L-l) + l \right) / \right.$$

$$\left. / \frac{\chi_n S_{2n} + \chi_p S_{2p}}{L-l} \left( \frac{\chi_n S_{1n} + \chi_p S_{1p}}{l} + \Delta\alpha I \frac{S_{2n}}{S_{1n}} \right) \right],$$

где  $I$  — сила тока в части ветви 2 (см. рис. 5), т. е. во внешней цепи охладителя, которую можно контролировать амперметром;

$$\Delta\alpha = \alpha_p - \alpha_n.$$

При написании последних двух выражений учтено соотношение  $S_{2p}/S_{1p} = S_{2n}/S_{1n}$ , которое вытекает из условия  $j_p S_{2p} = j_n S_{2n}$  с учетом того, что  $j_n = I/S_{1n}$  и  $j_p = I/S_{1p}$ . Числовые расчеты проведены при условиях:

$$\rho_{1p} = \rho_{2p} = \rho_p, \quad \rho_{1n} = \rho_{2n} = \rho_n;$$

$$\chi_{1n} = \chi_{2n} = \chi_n, \quad \chi_{1p} = \chi_{2p} = \chi_p,$$

а также  $\rho_p = \rho_n = 10^{-3}$  Ом·см,  $\chi_n = \chi_p = 1,8 \cdot 10^{-2}$  Вт/см·К,  $\Delta\alpha = 4,4 \cdot 10^{-4}$  В/К.

При условии, что  $L = 1$  см, подбирались величины  $l$ ,  $S_{1n}$ ,  $S_{2n}$ ,  $S_{1p}$ ,  $S_{2p}$  и сила тока  $I$  так, чтобы  $T_L$  была минимальной. При  $S_{1n} = S_{1p} =$

$= 0,03$  см<sup>2</sup>,  $S_{2n} = S_{2p} = 0,01$  см<sup>2</sup> и токе  $I = 2,6$  А,  $l = 0,52$  см,  $T_0 = 300$  К было найдено  $T_l = 233$  К,  $T_L = 200$  К.

При условиях, что  $L = 0,5$  см,  $S_{1n} = S_{1p} = 0,1$  см<sup>2</sup>,  $S_{2n} = S_{2p} = 0,033$  см<sup>2</sup> и токе  $I = 15,5$  А,  $l = 0,25$  см, получается  $T_l = 242$  К,  $T_L = 198$  К. Числовые расчеты проведены при помощи математического пакета *Maple*.

Из приведенных данных видно, что площадь поперечного сечения верхней части в три раза меньше площади поперечного сечения нижней части охладителя, а высота нижней части в два раза меньше высоты верхней части ветви. Следует отметить, что  $T_L$  и  $T_l$  очень чувствительны к выбору материальных и размерных констант.

Описанные в статье результаты являются продолжением работ [3, 4].

Отметим, наконец, следующее важное обстоятельство. Приведенная в работе теория является приближенной. Конечно, возможно и создание более точной теории, например, в случае двухмерных температуры и плотности тока. Однако результаты расчетов могут быть получены только в численном виде, что требует создания специально разработанной компьютерной программы. Поэтому в защиту приведенной в работе теории автор выдвигает требование: теория будет тем точнее выполняться, чем больше будет разница между площадями поперечных сечений верхней и нижней частей ветви, они должны отличаться примерно в 9—10 раз.

*Автор признателен академику*

*Л. И. Анатычуку и доктору физ.-мат. наук О. Я.*

*Лусте за критические замечания,*

*советы и содержательные дискуссии*

*по изложенным в данной работе вопросам.*

#### Л и т е р а т у р а

1. Термоэлементы и термоэлектрические устройства: Справочник/ Л. И. Анатычук — Киев: Наук. думка, 1979. — 768 с.
2. Вайнер А. Л. Каскадные термоэлектрические источники холода. — М., 1976
3. Термоэлектричний охолоджувач. Деклараційний патент № 9240, Україна, 7 Н01L35/00/ Л. И. Анатычук, В. Г. Охрем. Заяв. 01.03.2005. Опубл. 15.09.2005. Бюл. № 9.
4. Термоэлектричний охолоджувач. Деклараційний патент № 9884, Україна, 7 Н01L35/00// Л. И. Анатычук, В. Г. Охрем. Заяв. 15.04.2005. Опубл. 17.10.2005. Бюл. № 10.

*Статья поступила в редакцию 17 января 2006 г.*

## Peltier thermoelectric coolers for deep cooling

*V. G. Okhrem*

Chernivtsi faculty of Kharkiv National technical University (KhPI), Chernivtsi, Ukraine

*Models of thermoelectric coolers working on Peltier effect with compound branches and auxiliary thermoelement have been suggested, as and investigated well as models of coolers with auxiliary*

---

*conducting elements which are simpler in structure as compared to two-cascade refrigerators and which are as deep cooling as the later.*