

СТАЦІОНАРНИЙ ТЕМПЕРАТУРНИЙ РЕЖИМ ДВОКАСКАДНОГО АНІЗОТРОПНОГО ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ХОЛОДИЛЬНИКА

Уточнена модель анізотропного термоелектричного холодильника. Зроблено розрахунок максимального зниження температури двокаскадного анізотропного термоелектричного холодильника в стаціонарному режимі. Показано, що "каскадування" приводить до більш глибокого охолодження порівняно з класичним анізотропним термоелектричним холодильником.

The model of anisotropic thermoelectric cooler (ATC) has been made more exact. The calculation of two-stage ATC maximum temperature difference at stationary state has been done. It has shown that "staging" gives more deep cooling than in the classical case ATC.

Дослідження каскадування анізотропного термоелектричного холодильника (АТХ) [1,2], на нашу думку, не достатньо переконливі: покладені в їх основу фізичні моделі окремого і каскадового АТХ надто спрощені і далекі від справжньої ситуації. В зв'язку з чим виникає потреба в їх уточненні і одержанні більш реальних фізичних результатів.

В даній роботі детально розглянуто двокаскадний АТХ з точки зору максимального зниження температури. Принципова схема АТХ представлена на рис.1.

Він складається з окремих АТХ 1 і 2 зістикованих в тепловому відношенні так, що тепло, яке виділяється на нижній грані АТХ2 є тепловим навантаженням АТХ1. Електричного контакту між нижньою гранню АТХ2 і верхньою гранню АТХ1 немає. Разом з тим тепловий контакт між ними вважається ідеальним. В електричному відношенні АТХ1 і АТХ2 з'єднанні так як показано на рис.1.

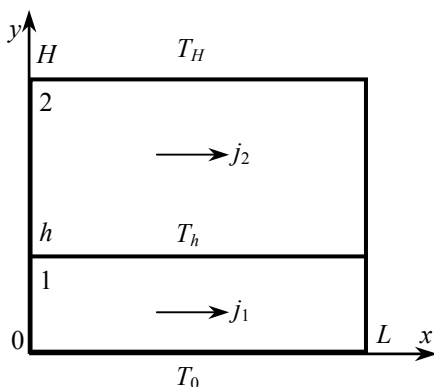


Рис.1. Принципова схема двокаскадного АТХ.

Указана тут модель відрізняється від описаної в [1] тим, що по-перше, замість умови $E=\text{const}$ (постійне електричне поле вздовж x) ми вважаємо, що $j=\text{const}$. На перший погляд умова $E=\text{const}$ більш строга. Однак, вона виконується при одновимірному розподілі температури, котрий має місце лише в середній частині зразка, а E вважається постійним вздовж всього зразка. Крім того, як показано в [3], розрахунки T_{min} мало відрізняються між собою для цих двох випадків. З іншого боку умову $j=\text{const}$ виконати легше: варто лише використати відповідні струмопідводи [4]. По-друге, каскадування, яке відоме з літератури [1,2] передбачає однаковість холодильних коефіцієнтів, що не витримує критики.

Вибираючи зразки АТХ 1 і 2 достатньо довгими, тобто поклавши $h/L \ll 1$ і $l/L \ll 1$, де h і $l=H-h$ – розміри зразків 1 і 2 вздовж осі y , L – вздовж x , можна вважати, що в середній частині АТХ температура залежатиме лише від y . Вважатимемо також, що кінетичні коефіцієнти матеріалів АТХ 1 і 2 не залежать від температури, – це припущення стверджується, якщо робочий інтервал температури не дуже широкий.

Узагальнене рівняння теплопровідності у стаціонарному випадку за умови, що густини струмів в зразках 1 і 2 постійні, запишемо у вигляді

$$\frac{d^2 T_i}{dy^2} + b_i = 0, \quad (1)$$

де $i=1$ або 2 – номер АТХ, $b_i = \rho_i j_i^2 / \chi_i$, ρ_i і χ_i – питомі електричний опір і теплопровідність, j_i – густина струму, T_i – температура.

Граничні умови

$$\begin{aligned} T_1(0) &= T_0, \quad T_1(h) = T_h, \\ T_2(h) &= T_h, \quad T_2(H) = T_H. \end{aligned} \quad (2)$$

Загальний розв'язок рівняння (1) матиме вигляд

$$T_i(y) = -\frac{1}{2}b_i y^2 + A_i y + B_i, \quad (3)$$

де A_i і B_i – постійні інтегрування. Використавши граничні умови (2) і вираз (3), знайдемо

$$\begin{aligned} T_1(y) &= -\frac{1}{2}b_1 y^2 + \left(\frac{1}{2}b_1 h - \frac{T_0 - T_h}{h} \right) y + T_0, \\ T_2(y) &= -\frac{1}{2}b_2 y^2 + \left(\frac{1}{2}b_2 (H+h) - \frac{T_h - T_H}{l} \right) y + \\ &+ T_h - \frac{1}{2}b_2 H h - \frac{T_h - T_H}{l} h. \end{aligned}$$

Температури T_h і T_H знайдемо, виходячи з умов

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2}b_1 h^2 - T_0 + T_h - a_1 h T_h &= \\ = K \left(\frac{1}{2}b_1 l^2 - T_h + T_H - a_2 l T_h \right), \\ \frac{1}{2}b_2 l^2 + T_h - T_H + a_2 l T_H &= 0, \end{aligned}$$

де $a_i = \alpha_i j_i / \chi_i$, α_i – поперечна термоерс, $K = \chi_2 h / \chi_1 l$. Ці умови означають, відповідно, неперервність теплового потоку на стику зразків 1 і 2 і адиабатичну ізоляцію верхньої грані зразка 2. З них знайдемо

$$T_H = \frac{1}{1 - a_2 l} \left(T_h + \frac{1}{2} b_2 l^2 \right), \quad (4)$$

$$T_h = \frac{\frac{1}{2} K b_2 l^2 + (1 - a_2 l) \left(T_0 + \frac{1}{2} K b_2 l^2 + \frac{1}{2} b_1 h^2 \right)}{1 - a_1 h (1 - a_2 l) - a_2 l (1 + K a_2 l)}. \quad (5)$$

Розглянемо далі два випадки.

1) $\alpha_1 > 0$, $\alpha_2 > 0$. Для того, щоб було охолодження, тобто $T_H < T_0$, потрібно в (4) і (5) покласти $j_1 < 0$ і $j_2 < 0$, тобто спрямувати струми в від'ємному напрямку осі x . В цьому випадку можна говорити про "паралельне" з'єднання АТХ1 і АТХ2. Чисельно покладемо далі: $K \ll 1$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$, $\rho_1 = \rho_2 = \rho$, $\chi_1 = \chi_2 = \chi$. Тоді для T_H одержимо

$$T_H = \frac{T_0 + \frac{1}{2} \rho I_1^2 / (\chi c^2)}{1 + \alpha I_1 / (\chi c)} + \frac{\frac{1}{2} \rho I_2^2 / (\chi c)}{1 + \alpha I_1 / (\chi c)},$$

де I_1 та I_2 – сили струмів в АТХ1 і АТХ2, відповідно, c – товщина холодильників. В останньому виразі знехтовано величинами другого порядку малості: $\alpha I_1 / (\chi c)$, $\alpha I_2 / (\chi c)$ і $[\alpha I_2 / (\chi c)]^2 K$. Подальші дослідження повинні полягати в тому, щоб підібрати оптимальні струми I_1 та I_2 , які, взагалі кажучи, мають бути різними. Однак, для чисельної оцінки покладемо $I_1 = I_2 = I$. Покладемо також: $\alpha = 10^{-4}$ В/К, $\chi = 10^{-2}$ Вт/(см·К), $\rho = 10^{-3}$ Ом·см, $c = 1$ см, $I = 10$ А, $T_0 = 300$ К, одержимо $T_H = 239$ К. Для однокаскадного АТХ у відповідності з формулою $T_{\min} = T_0 - Z T_0^2 / 2$, де $Z = \alpha^2 / (\chi \rho) = 10^{-3}$ К⁻¹, одержуємо $T_{\min} = 255$ К. Отже охолодження стає більш глибоким.

2) $\alpha_1 < 0$, $\alpha_2 > 0$. В цьому випадку потрібно змінити напрямок струму в АТХ1 на протилежний. Тут доречно говорити про "послідовне" з'єднання АТХ1 і 2. Залишивши величини кінкоєфіцієнтів, розміри і силу струму тими ж, що і в першому випадку, одержимо також $T_H \approx 239$ К.

На закінчення зауважимо, що приведені розрахунки не є вичерпними, а покликані лише проілюструвати, що каскадування в випадку АТХ приводить до більш глибокого охолодження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Осинов Э.В.* Твердотельная криогеника. - Киев: Наукова думка, 1977.
2. *Анатычук Л.И.* Термоэлементы и термоэлектрические устройства. - Киев: Наукова думка, 1979.
3. *Harman T.C., Honig J.M.* Thermoelectric and Thermomagnetic Effects and Applications. - New-York, 1967.
4. *Охрем В.Г., Охрем Е.А.* Стационарные эффекты охлаждения анизотропного термоэлектрического холодильника // Инженерно физический журнал. - 2000. - 73, № 3.