

Черкез Р.Г., Максимук Н.В., Феняк П.П.

Институт термоэлектричества НАН и МОН Украины, ул. Науки, 1,
Черновцы, 58029, Украина

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОНИЦАЕМЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ СИЛИЦИДОВ *Mg* И *Mn*

Представлены результаты компьютерного проектирования проницаемых термоэлементов на основе силицидов магния и марганца. Определены оптимальные концентрации легирующих примесей для таких материалов и оптимальные теплофизические параметры, при которых реализуется максимальная термодинамическая эффективность проницаемых термоэлементов. Рассчитаны энергетические характеристики одно- и двухсегментных проницаемых термоэлементов в оптимальных условиях работы для разных значений температур теплоносителя. Показано, что КПД проницаемого термоэлемента зависит от геометрии веток (высоты, диаметра и числа каналов) и достигает максимального значения 4 % и 7 % для одно- и двухсегментного вариантов соответственно.

Ключевые слова: компьютерное проектирование, проницаемые структуры, рекуператоры тепла, эффективность.

Results of computer design of permeable thermoelements based on Mg and Mn silicides are presented. Optimal concentrations of doping impurities for such materials and optimal thermophysical parameters whereby maximum thermodynamic efficiency of permeable thermoelements is accomplished are determined. The energy characteristics of single- and double-segment permeable thermoelements are calculated under optimal operating conditions for different values of heat carrier temperatures. It is shown that the efficiency of a permeable thermoelement depends on the geometry of legs (the height, the diameter and number of channels) and reaches maximum value of 4 % and 7 % for single- and double-segment variants, respectively.

Key words: computer design, permeable structures, heat recuperators, efficiency.

Введение

В связи с повышением спроса на энергоносители, последнее десятилетие все большее внимание привлекает рекуперация отходов промышленного тепла, например, двигателей внутреннего сгорания с помощью термоэлектричества. Характерные значения температур таких источников тепла достигают 700 – 800 К. Однако, сдерживающим фактором на пути широкого внедрения термоэлектрических рекуператоров является недостаточно высокая эффективность существующих термоэлектрических материалов. Кроме того, подавляющее большинство термоэлектрических материалов, использующихся в данное время для создания термоэлектрических преобразователей, содержит дефицитные и токсичные компоненты. С учетом этого, разработка и исследование высокоэффективных, дешевых, экологически безопасных термоэлектрических материалов и преобразователей энергии на их основе представляется актуальной задачей.

Одним из перспективных способов повышения эффективности термоэлектрических преобразователей и расширения возможности их внедрения на практике является

использование материалов на основе силицидов магния и марганца, которые соответствуют ряду требований: дешевизна исходных компонентов, высокая механическая прочность и, особенно, экологическая безопасность.

Анализ известных исследований показывает, что КПД термоэлектрических модулей из однородных материалов на основе легированных твердых растворов n -Mg-Si и p -Mn-Si при температуре горячей стороны 773 К и холодной – 320 К находится на уровне $\sim 4\%$ [1]. Использование двухсекционных структур на основе силицидов магния и марганца достигается повышение эффективности модулей в 1.3 – 1.5 раз. В работе [1] показано, что для материалов $Mg_2(Si_{0.3}Sn_{0.7})_{1-x}Sb_x$ n -типа проводимости и $Mn(Al_xSi_{1-x})_{1.8}$ p -типа проводимости можно ожидать лучшие значения КПД.

Вместе с тем, в последнее время существенно повысился интерес к изучению термоэлементов, подводение и отвод тепла в которых осуществляется не только через поверхности спаев, но и за счет использования развитой поверхности теплообмена в объеме материала веток термоэлемента [2]. В таких случаях термоэлементы создаются проницаемыми для потоков газов или жидкостей, что позволяет повысить эффективность термоэлектрического преобразования энергии на 30 % уже для существующих низкотемпературных генераторных материалов на основе Bi_2Te_3 [3]. Исследование таких проницаемых термоэлементов из перспективных материалов на основе силицидов магния и марганца не проводилось.

Целью данной работы являются расчеты и исследование эффективности проницаемых генераторных термоэлементов из оптимальных материалов на основе силицидов магния и марганца.

Физическая модель и ее математическое описание

Физическая модель проницаемого термоэлемента в режиме генерации электрической энергии представлена на рис. 1. Термоэлемент состоит из веток n - и p -типов проводимости, физические свойства которых зависят от температуры. Подводение тепла осуществляется путем пропуска теплоносителя вдоль ветки через каналы (поры). Каждая ветка состоит из N_n и N_p – сегментов соответственно, контактное сопротивление соединения r_0 . Боковые поверхности веток адиабатически изолированы, температура теплоносителя на входе в термоэлемент T_m задана. Температура холодных спаев T_c термостатирована.

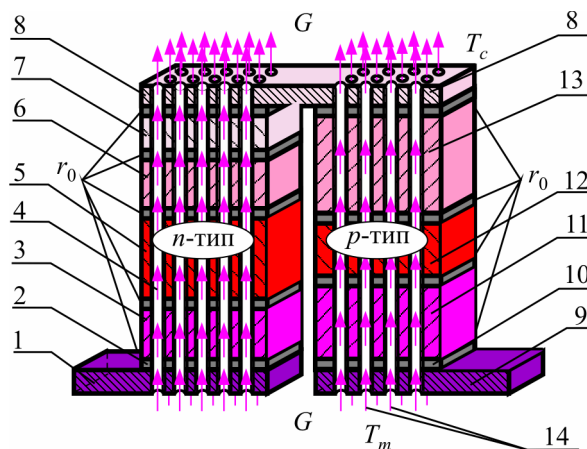


Рис. 1. Физическая модель проницаемого сегментного термоэлемента. 1, 8, 9 – коммутационные пластины; 2, 10 – коммутационные пластины; 3, 5, 6, 7 – сегменты (секции) ветки n -типа проводимости; 4 – поток теплоносителя; 11, 12, 13 – сегменты (секции) ветки p -типа проводимости; 14 – высокотеплопроводный диэлектрик.

Система дифференциальных уравнений, которая описывает распределение температур и тепловых потоков в стационарном одномерном случае, в бесконечно малой части dx каждого k -го сегмента веток n - и p -типов проводимости, в безразмерных координатах имеет вид [3]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dT}{dx} &= -\frac{\alpha_k j}{\kappa_k} T - \frac{j}{\kappa_k} q, \\ \frac{dq}{dx} &= \frac{\alpha_k^2 j}{\kappa_k} T + \frac{\alpha_k j}{\kappa_k} q + j\rho_k + \frac{\alpha_T \Pi_K^1 N_K l_k^2}{(S - S_K) j} (t - T), \\ \frac{dt}{dx} &= \frac{\alpha_T \Pi_K^1 N_K l_k}{Gc_p} (t - T), \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} k = 1, \dots, N_{n,p} \\ x_{k-1} \leq x \leq x_k \end{array} \quad (1)$$

где Π_K^1 – периметр канала; N_K – число каналов; S_K – площадь сечения всех каналов; S – сечение ветки вместе с каналами; l_k – высота k -го сегмента ветки; G – расход теплоносителя в каналах; c_p – удельная теплоемкость теплоносителя; t – температура теплоносителя в точке x ; T – температура ветки в точке x ; α_T – коэффициент теплоотдачи; α , κ , ρ – коэффициенты термоЭДС, теплопроводности и удельное сопротивление материала ветки.

Удельные потоки тепла q и приведенная плотность электрического тока j определяются соотношениями:

$$q = \frac{Q}{I}, \quad j = \frac{I}{S}, \quad (2)$$

где Q – мощность теплового потока, который проходит через ветку термоэлемента; I – электрический ток; $S_{n,p}$ – площадь поперечного сечения веток термоэлемента n - и p -типов проводимости.

Краевые условия, необходимые для решения (1) с учетом выделения тепла Джоуля-Ленца, обусловленного контактным сопротивлением r_0 в местах соединения сегментов веток, формулируются в виде:

$$\begin{aligned} T_{n,p}(0) &= T_C, & t_{n,p}(1) &= T_m, & q_{n,p}(1) &= 0, \\ T_{n,p}(x_k^+) &= T_{n,p}(x_k^-), & q_{n,p}(x_k^+) &= q_{n,p}(x_k^-) + \frac{r_0}{S_{n,p}} I, \end{aligned} \quad (3)$$

где индексы "-" и "+" обозначают значение функций, соответственно слева и справа от границы стыка сегментов x_k ; $k = 1, \dots, N$ – индекс, определяющий номер сегмента ветки.

В случае поиска оптимальных значений концентрации легирующих примесей, которые определяют концентрации носителей тока в сегментах веток, необходимо задать зависимости параметров материалов α , κ , ρ от температуры и концентрации носителей тока (или примесей) C_k : $\alpha_k = \alpha_k(C_k, T)$, $\rho_k = \rho_k(C_k, T)$, $\kappa_k = \kappa_k(C_k, T)$.

Цель проектирования проницаемого сегментного генераторного термоэлемента – определение таких согласованных параметров (приведенной плотности тока j в ветках, расхода теплоносителя в каналах G , концентрации легирующих примесей в материалах каждого сегмента C_k), при которых КПД термоэлемента достигает максимального значения.

КПД определим через отношение электрической мощности P , генерируемой термоэлементом к изменению энтальпии теплоносителя:

$$\eta = \frac{P}{\sum_{n,p} Gc_p (T_m - T_C)}. \quad (4)$$

Максимум КПД удобно свести к достижению минимума функционала:

$$J = \ln \left[\sum_{n,p} \{ Gc_p (T_m - T_c) \} \right] - \ln \left[\sum_{n,p} \left\{ Gc_p (T_m - t(0)) + q(0) \frac{j(S - S_K)}{l} - I \left(\frac{r_0}{S_n} + \frac{r_0}{S_p} \right) \right\} \right]. \quad (5)$$

Для решения задачи использован принцип максимума Понтрягина [4], что дает необходимые условия оптимальности:

1) оптимальные значения удельной плотности тока в ветках термоэлемента j должны удовлетворять равенствам

$$-\left[\frac{\partial J}{\partial j} \right]_{n,p} + \sum_{n,p} \int_0^1 \left[\psi_1^k \frac{\partial f_1^k}{\partial j_k} + \psi_2^k \frac{\partial f_2^k}{\partial j_k} + \psi_3^k \frac{\partial f_3^k}{\partial j_k} \right] dx = 0, \quad (6)$$

где $(f_1^k, f_2^k, f_3^k)_{n,p}$ – правые части уравнений (1); $\psi = (\psi_1^k, \psi_2^k, \psi_3^k)_{n,p}$ – вектор-функция импульсов [3, 4], которая определяется из решения вспомогательной системы дифференциальных уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_1}{dx} &= \frac{\alpha_k j_k}{\kappa_k} R_1 \psi_1 - \left(\frac{\alpha_k j_k}{\kappa_k} R_2 - \frac{\alpha_e I_k}{(S - S_K) j_k} \right) \psi_2 + \frac{\alpha_T \Pi_K^1 N_K}{Gc_p} \psi_3, \\ \frac{d\psi_2}{dx} &= \frac{j_k}{\kappa_k} \psi_1 - \frac{\alpha_k j_k}{\kappa_k} \psi_2, \\ \frac{d\psi_3}{dx} &= -\frac{\alpha_T \Pi_K^1 N_K I_k}{(S - S_K) j_k} \psi_2 - \frac{\alpha_T \Pi_K^1 N_K}{Gc_p} \psi_3, \end{aligned} \right\}_{n,p} \quad (7)$$

где

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= 1 + \frac{d \ln \alpha}{dT} T - \frac{d \ln \kappa}{dT} \left(T + \frac{q}{\alpha} \right), \\ R_2 &= R_1 + \frac{\kappa}{\alpha^2 \sigma} \frac{d \ln \sigma}{dT} + \frac{d \ln \kappa}{dT} \left(T + \frac{q}{\alpha} \right), \end{aligned} \right\}_{n,p}$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} \psi_1^{n,p}(1) &= 0, \\ \psi_2^{n,p}(0) &= \frac{j(S - S_K)}{l} \frac{1}{\sum_{n,p} \left\{ Gc_p (T_m - t(0)) + q(0) \frac{j(S - S_K)}{l} - I \left(\frac{r_0}{S_n} + \frac{r_0}{S_p} \right) \right\}}, \\ \psi_3^{n,p}(0) &= \frac{Gc_p}{\sum_{n,p} \left\{ Gc_p (T_m - t(0)) + q(0) \frac{j(S - S_K)}{l} - I \left(\frac{r_0}{S_n} + \frac{r_0}{S_p} \right) \right\}}; \end{aligned} \quad (8)$$

2) оптимальные значения расхода теплоносителя G в каналах

$$-\left[\frac{\partial J}{\partial G} \right]_{n,p} + \sum_{n,p} \int_0^1 \left[\psi_1^k \frac{\partial f_1^k}{\partial G} + \psi_2^k \frac{\partial f_2^k}{\partial G} + \psi_3^k \frac{\partial f_3^k}{\partial G} \right] dx = 0; \quad (9)$$

3) оптимальные значения легирующих примесей в материале каждого сегмента C_k определяются из соотношений

$$\int_0^1 \left[\psi_1^k \frac{\partial f_1^k}{\partial C_k} + \psi_2^k \frac{\partial f_2^k}{\partial C_k} + \psi_3^k \frac{\partial f_3^k}{\partial C_k} \right]_{n,p} dx = 0, \quad k=1, \dots, N_{n,p}. \quad (10)$$

В случае проектирования термоэлемента для фиксированных материалов в сегментах условия оптимальности (10) не принимаются во внимание.

На основе полученных соотношений с использованием метода последовательных приближений, численного метода Рунге-Кутты для решения систем дифференциальных уравнений (1) и (7) с предельными условиями (3) и (8), метода Ньютона для решения систем интегрально-дифференциальных уравнений (6), (9), (10) была разработана компьютерная программа проектирования проницаемого сегментного термоэлемента. Результаты компьютерных исследований термоэлемент представлены ниже.

Результаты компьютерного исследования энергетических характеристик проницаемого сегментного генераторного термоэлемента на основе силицидов Mg и Mn

Технологии изготовления материалов на основе силицидов магния и марганца и результаты экспериментальных исследований их термоэлектрических свойств приведены в ряде научных работ [5-12]. Анализ источников литературы показал, что по величине параметра добротности наиболее целесообразным для создания генераторных термоэлементов является использование материалов:

– $Mg_2(Si_{0.3}Sn_{0.7})_{1-x}Sb_x$ ($0 \leq x \leq 0.04$) для веток n -типа проводимости, который получен путем двухступенной твердофазной реакции в сочетании с искровым плазменным спеканием [6]. Максимальная добротность этого легированного сурьмой силицида $ZT \approx 1.0$ при 640 К для состава $x = 0.025$.

– $Mn(Al_xSi_{1-x})_{1.80}$ ($0 \leq x \leq 0.003$) для веток p -типа проводимости, получено с помощью индукционной плавки с дальнейшим горячим прессованием [7]. Максимальная добротность такого силицида марганца легированного алюминием $ZT \approx 0.65$ при 850 К для состава $x = 0.0015$.

Указанные материалы были выбраны для компьютерных исследований энергетических характеристик проницаемых термоэлементов. Экспериментальные зависимости их параметров α , κ , σ были аппроксимированы в виде полиномиальных зависимостей от температуры T и параметра легирования C (для ветки n -типа проводимости легирования силицидом сурьмы ($0 \leq x \leq 0.04$) и легирование алюминием ($0 \leq x \leq 0.003$) для ветки p -типа проводимости).

Расчеты проницаемого сегментного термоэлемента проведены при условиях: коэффициент теплообмена $\alpha_T = 0.01$ Вт/см²·К, площадь поперечного сечения ветки вместе с каналами $S = 1$ см², контактное сопротивление в местах соединения сегментов веток составляет $r_0 = 5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см².

Полученные оптимальные параметры термоэлемента и энергетические характеристики двухсегментного проницаемого термоэлемента с диаметром каналов $d_k = 0.1$ см, с числом каналов $N_k = 25$ шт. на 1 см² в зависимости от высоты ветки приведены в таблице 1. Результаты расчета приведены для случая, когда температура теплоносителя на входе в термоэлемент $T_m = 900$ К, а температура холодных спаев $T_c = 300$ К. Видно, что температура горячих спаев термоэлемента при оптимальных условиях работы составляет $T_n(1) = 495$ К.

При этом температура теплоносителя на выходе из термоэлемента приближается к температуре холодных спаев и находится на уровне $t_n(0) = 317$ К, то есть энтальпия теплоносителя уменьшается на величину перепада температур $(900 - 330) = 570$ К, что приближается к имеющемуся изменению температур $(T_m - T_c) = 600$ К. Это свидетельствует о более полном

использовании тепловой энергии теплоносителя в сравнении с классическими термодарными элементами, где полезно используется только половина имеющегося перепада температур [2].

Таблица 1

Оптимальные параметры и энергетические характеристики двухсегментного проницаемого термоэлемента на основе силицидов Mg и Mn

l , см	КПД _{max}	$t_n(0)$, К	$T_n(1)$, К	P , Вт	G_{opt} , г·см/с	j_{opt} , А/см	$C_1^{n_{opt}}$	$C_2^{n_{opt}}$	C_1^p	C_2^p
0.6	0.019	373.4	391.0	0.339	0.0150	4.29	0.00409	0.0229	0.00159	0.00187
0.7	0.023	371.3	409.0	0.426	0.0156	5.08	0.00394	0.0229	0.00161	0.00188
0.8	0.026	369.2	424.9	0.503	0.0158	5.82	0.00374	0.0229	0.00164	0.00189
0.9	0.030	366.4	438.3	0.565	0.0158	6.47	0.00352	0.0229	0.00166	0.00190
1.0	0.033	363.2	449.3	0.612	0.0157	7.03	0.00328	0.0228	0.00169	0.00190
1.1	0.035	359.6	458.3	0.647	0.0153	7.51	0.00303	0.0228	0.00171	0.00191
1.2	0.037	356.0	465.5	0.670	0.0149	7.93	0.00278	0.0228	0.00173	0.00191
1.3	0.039	352.3	471.3	0.685	0.0145	8.30	0.00254	0.0228	0.00175	0.00192
1.4	0.041	348.8	476.0	0.692	0.0141	8.62	0.00231	0.0228	0.00177	0.00192
1.5	0.043	345.4	479.7	0.695	0.0136	8.91	0.00209	0.0228	0.00178	0.00193
1.6	0.044	342.5	482.9	0.697	0.0132	9.26	0.00185	0.0228	0.00180	0.00194
1.7	0.045	339.6	485.4	0.693	0.0128	9.51	0.00164	0.0228	0.00182	0.00194
1.8	0.046	336.9	487.5	0.687	0.0124	9.73	0.00145	0.0228	0.00183	0.00194
1.9	0.047	334.3	489.1	0.678	0.0120	9.91	0.00128	0.0228	0.00185	0.00195
2.0	0.048	332.0	490.4	0.668	0.0116	10.08	0.00112	0.0228	0.00186	0.00195
2.1	0.049	329.8	491.5	0.657	0.0113	10.23	0.00097	0.0228	0.00187	0.00196
2.2	0.049	327.8	492.4	0.645	0.0109	10.36	0.00083	0.0228	0.00188	0.00196
2.3	0.050	326.0	493.2	0.633	0.0106	10.48	0.00070	0.0228	0.00189	0.00196
2.4	0.050	324.3	493.8	0.620	0.0103	10.59	0.00058	0.0228	0.00190	0.00196
2.5	0.051	322.8	494.3	0.608	0.0100	10.69	0.00047	0.0228	0.00191	0.00197
2.6	0.051	321.4	494.7	0.596	0.0097	10.78	0.00037	0.0228	0.00192	0.00197
2.7	0.052	320.1	495.0	0.583	0.0094	10.86	0.00027	0.0228	0.00192	0.00197
2.8	0.052	318.9	495.3	0.571	0.0091	10.94	0.00019	0.0228	0.00193	0.00197
2.9	0.052	317.8	495.6	0.559	0.0089	11.01	0.00010	0.0228	0.00194	0.00198
3.0	0.053	316.8	495.8	0.547	0.0087	11.07	0.00003	0.0228	0.00194	0.00198

Зависимости максимального КПД η и соответствующей удельной электрической мощности W проницаемого сегментного генераторного термоэлемента при оптимальных значениях j , G и параметра легирования C в сегментах веток, от общей высоты веток l приведены на рис. 2. Видно, что КПД с увеличением высоты ветки возрастает и достигает насыщения вблизи значения 5.5 %, а соответствующая удельная мощность P имеет экстремум при высоте ветки $l \sim 1.5$ см.

При такой высоте (1.5 см) максимальное значение КПД (для односегментного проницаемого термоэлемента) составляет приблизительно 3.2 %, что соответствует значению КПД классического термодарного термоэлемента ($\eta_0 = 3.2$ %) в аналогичных условиях работы. При этом, значение удельной мощности не превышает 0.52 Вт/см² для ветки из 1 сегмента и 0.7 Вт/см² для ветки из 2 сегментов.

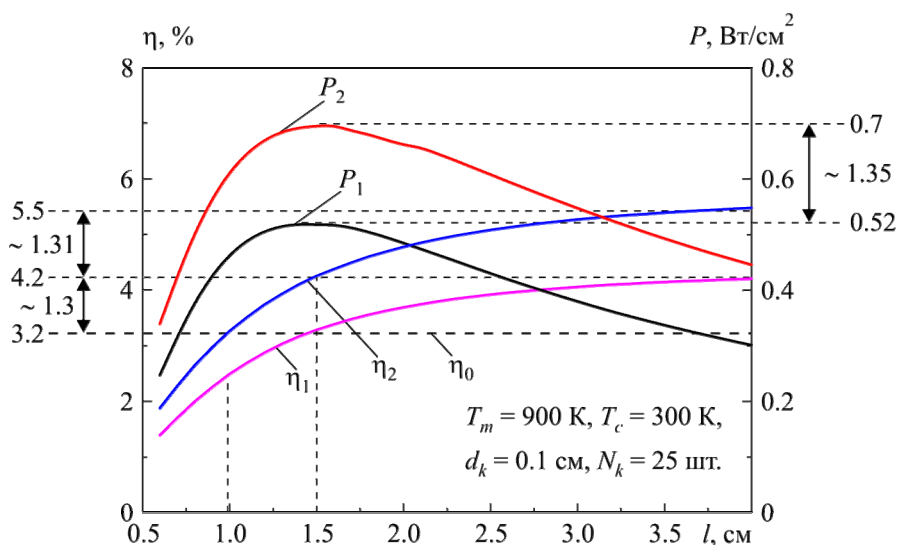


Рис. 2. Зависимость энергетических характеристик проницаемого сегментного термоэлемента на основе силицидов Mg и Mn от длины ветки l . 1 – односегментные проницаемые термоэлементы; 2 – двухсегментные проницаемые термоэлементы.

Результаты расчетов показывают, что с увеличением числа сегментов ветки наблюдается насыщение, как по величине удельной мощности, так и по КПД. Таким образом, существует оптимальное количество сегментов ветки: 2 – 3 шт. Дальнейшее увеличение количества сегментов не приводит к существенному улучшению энергетических характеристик преобразования энергии, что характерно и для классических сегментных термоэлементов [13].

Результаты исследований зависимости энергетических характеристик проницаемого сегментного генераторного термоэлемента от диаметра каналов d_k для одно- (индекс 1) и двухсегментных веток (индекс 2) при условии оптимальных значений j , G и концентраций легирующих примесей в сегментах ветки приведены на рис. 3.

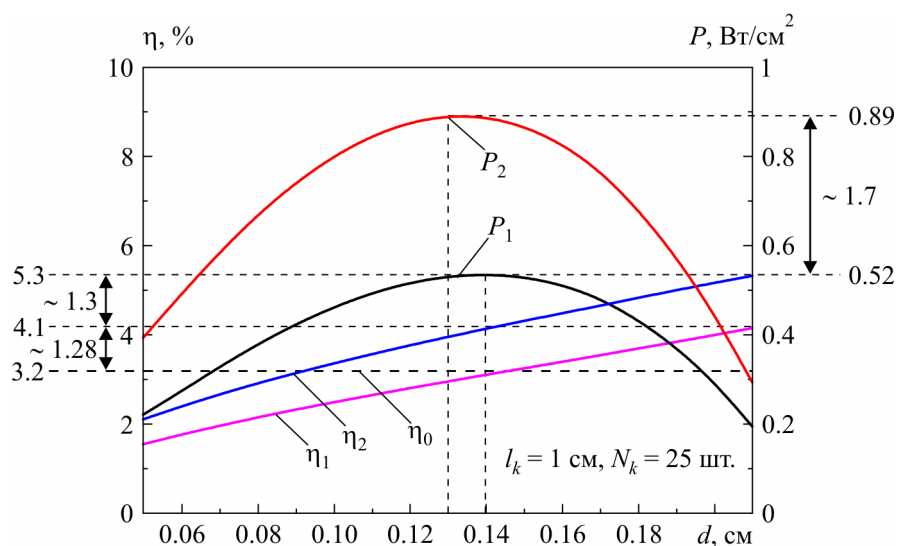


Рис. 3. Зависимость энергетических характеристик проницаемого сегментного термоэлемента от диаметра каналов d_k . 1 – односегментные проницаемые термоэлементы; 2 – двухсегментные проницаемые термоэлементы.

Видно, что увеличение диаметра каналов улучшает КПД преобразования энергии. При этом электрическая мощность в режиме максимума КПД имеет экстремум в случае $d_k = 0.14$ см,

при котором значение КПД составляет 3.2 % для односегментного термоэлемента и 4 % для двухсегментного. Полученные результаты показывают, что для практических применений рациональный диаметр каналов проницаемого сегментного термоэлемента будет находиться в пределах от 1 до 2 см.

Влияние числа каналов N_k на энергетические характеристики проницаемого термоэлемента в оптимальных условиях при j , G и C_k для разного количества сегментов веток N показано на рис. 4.

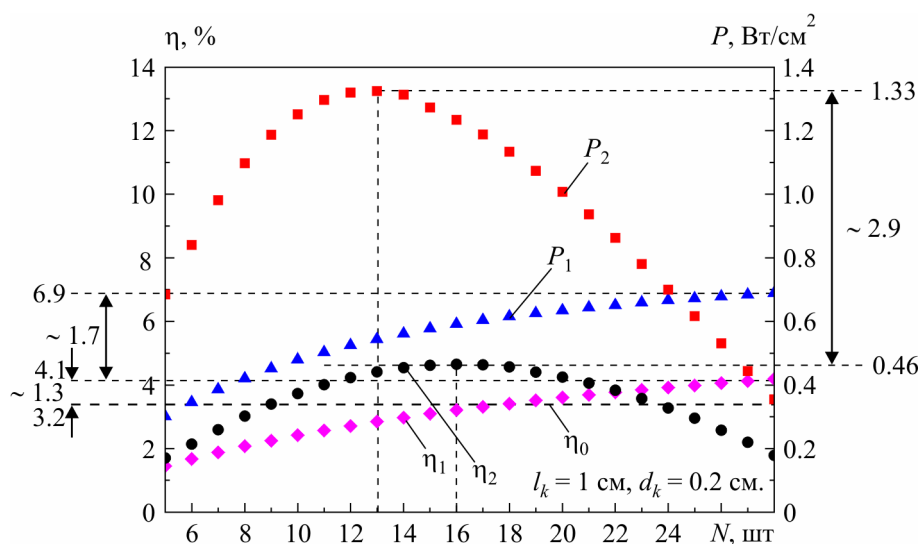


Рис. 4. Зависимость энергетических характеристик проницаемого сегментного термоэлемента от числа каналов N_k . 1 – односегментные проницаемые термоэлементы; 2 – двухсегментные проницаемые термоэлементы.

Видно, что КПД возрастает с увеличением количества каналов, выходя на насыщение. При этом удельная электрическая мощность имеет максимум, который наблюдается при 13 каналах на 1 см^2 . Поэтому, рациональное число каналов на единицу площади будет в пределах 10 – 24 шт на 1 см^2 . Существенный рост КПД, в зависимости от числа сегментов веток термоэлемента N , также наблюдается только для варианта использования 2 сегментов. Дальнейшее наращивание количества сегментов не дает существенного повышения КПД и удельной мощности.

Сопоставление эффективности проницаемого термоэлемента с КПД классического термоэлемента η_0 , который работает в аналогичных условиях, свидетельствует о возможности повышения эффективности преобразования энергии на 30 – 40 %.

Выводы

1. Представлена методика расчетов и проектирования проницаемого генераторного термоэлемента из сегментных материалов на основе силицидов магния и марганца.
2. Определено влияние конструкционных параметров (диаметра каналов и их числа, высоты веток и количества сегментов) в оптимальных условиях работы по КПД на основные характеристики преобразования энергии. Найдены оптимальные значения таких параметров, которые дают возможность установить необходимые материаловедческие и технологические требования для создания проницаемого термоэлемента.
3. Показано, что при использовании материалов на основе силицидов магния и марганца для проницаемого сегментного термоэлемента при начальной температуре теплоносителя 900 К

и термостатированных холодных спаев на уровне 300 К, оптимальное количество сегментов ветки составляет 2 шт. Сравнение проницаемых термоэлементов по термодинамической эффективности преобразования энергии с традиционными термоэлементами показало возможность ее повышения на 30 – 40 %.

Литература

1. Билинский-Слотило В.Р. Проектирование термоэлектрических генераторных модулей из материалов на основе силицидов *Mg* и *Mn* / В.Р. Билинский-Слотило, Л.Н. Вихор, В.Я. Михайловский // Термоэлектричество. – 2013. – № 1. – С. 68 – 75.
2. Анатычук Л.И. Проницаемый термоэлемент в режиме генерации электрической энергии / Л.И. Анатычук, Р.Г. Черкез // Термоэлектричество. – 2003. – № 2. – С. 35 – 46.
3. Анатычук Л.И. Проницаемый сегментный термоэлемент в режиме генерации электрической энергии / Л.И. Анатычук, Р.Г. Черкез // Термоэлектричество. – 2010. – № 3. – С. 5 – 12.
4. Математическая теория оптимальных процессов / [Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф.]. – М.:Наука, 1976. – 392 с.
5. Zh. Du, T. Zhu, and X. Zhao, Enhanced Thermoelectric Properties of $Mg_2Si_{0.58}Sn_{0.42}$ Compounds by Bi Doping, *Materials Letters* 66 (1), 76 (2012).
6. W. Liu, Q. Zhang, X. Tang X et al., Thermoelectric Properties of Sb-Doped $Mg_2Si_{0.3}Sn_{0.7}$, *Journal of Electronic Materials* 40 (5), 1062 (2011).
7. W. Luo, H. Li, F. Fu et al., Improved Thermoelectric Properties of Al-Doped Higher Manganese Silicide Prepared by a Rapid Solidification Method, *Journal of Electronic Materials* 40 (5), 1233 (2011).
8. A.J. Zhou, T.J. Zhu, X.B. Zhao et al., Improved Thermoelectric Performance of Higher Manganese Silicides with Ge Additions, *Journal of Electronic Materials* 39 (9), 2002 (2010).
9. M.J. Yang, L.M. Zhang, L.Q. Han et al., Simple Fabrication of Mg_2Si Thermoelectric Generator by Spark Plasma Sintering, *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences* 16, 277 (2009).
10. T. Sakamoto, T. Iida, A. Matsumoto et al., Thermoelectric Characteristics of a Commercialized Mg_2Si Source Doped with Al, Bi, Ag, and Cu, *Journal of Electronic Materials* 39 (9), 1708 (2010).
11. T. Sakamoto, T. Iida, Sh. Kurosaki et al., Thermoelectric Behavior of Sb- and Al-Doped *n*-Type Mg_2Si Device Under Large Temperature Differences, *Journal of Electronic Materials* 40 (5), 629 (2011).
12. R. Song, Y. Liu, and T. Aizawa, Solid State Synthesis and Thermoelectric Properties of Mg-Si-Ge System, *Journal of Materials Science & Technology* 21 (5), 618 (2005).
13. L.I. Anatyshuk, L.N. Vikhor, Generator Modules of Segmented Thermoelements, *Energy Conversion and Management* 50 (9), 2366 – 2372 (2009).

Поступила в редакцию 20.12.2013.