

Розглянути можливості побудови двокаскадних ТЕП підвищеної надійності при використанні одних і тих же варіантів сполучень параметрів первинних матеріалів в каскадах однакової ефективності при послідовному електричному з'єднанні каскадів. Наведені дані розрахунків основних параметрів і показників надійності двокаскадного ТЕП при використанні різних варіантів сполучень параметрів (1–5) в каскадах для перепадів температури ΔT від $\Delta T=60$ К до $\Delta T=90$ К і режимів від Q_{0max} до λ_{min}

Ключові слова: надійність, термоелектричні охолоджувачі, каскади, матеріали, ефективність, температура

Рассмотрены возможности построения двухкаскадных ТЭУ повышенной надежности при использовании одних и тех же вариантов сочетаний параметров исходных материалов в каскадах одинаковой эффективности при последовательном электрическом соединении каскадов. Приведены данные расчетов основных параметров и показателей надежности двухкаскадного ТЭУ при использовании различных вариантов сочетаний параметров (1–5) в каскадах для перепадів температури ΔT от $\Delta T=60$ К до $\Delta T=90$ К и режимов от Q_{0max} до λ_{min}

Ключевые слова: надежность, термоэлектрические охладители, каскады, материалы, эффективность, температура

ВЫБОР СОЧЕТАНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ОХЛАДИТЕЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ

В. П. Зайков

Старший научный сотрудник, кандидат технических наук, начальник сектора Научно-исследовательский институт "ШТОРМ" ул. Терешковой, 27, г. Одесса, Украина, 65076

В. И. Мещеряков

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой*

E-mail: gradan@ua.fm

Ю. И. Журавлев

Аспирант*

E-mail: zhuravlov.y@ya.ru

*Кафедра информатики

Одесский государственный экологический университет ул. Львовская, 15, г. Одесса, Украина, 65016

1. Введение

Анализ мирового рынка термоэлектрических модулей [1] демонстрирует непрерывный рост и расширение области использования от специальных приложений до медицины, компьютерной техники, автомобилестроения, холодильного оборудования, кондиционирования и т. п. [2, 3]. Наряду с несомненными преимуществами: высокой надежностью, отсутствием движущихся частей, малыми инерционностью и массогабаритными параметрами, термоэлектрические охлаждающие устройства обладают более низкой холодопроизводительностью по сравнению с компрессионными системами [4], что и определяет область их рационального использования.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Создание термоэлектрических материалов для термоэлектрических устройств (ТЭУ) потребовало

концептуальных исследований [5], формирования и анализа микроструктур твердых расплавов полупроводниковых материалов, в том числе и методами горячей экструзии [6, 7], что позволило получить полупроводниковые материалы с повышенной эффективностью [8–10]. Перспективными представляется разработки [11], где показано, что можно в несколько раз повысить термоэлектрическую добротность объемного термоэлектрического материала за счет туннелирования электронов от частицы к частице через вакуумные зазоры, прилегающие к физическому контакту, что сохраняет электропроводность, но снижает теплопроводность материала. Новым быстроразвивающимся направлением является разработка материалов и термоэлектрических охлаждающих устройств на тонких пленках [12, 13], что позволяет встраивать термоэлектрические модули непосредственно в процессорные элементы. На качество термоэлектрических устройств оказывают влияние также технология изготовления и сборки термоэлектрических модулей [14, 15].

Вместе с тем, существенного прорыва в повышении эффективности термоэлектрических материалов до на-

стоящего времени достичь не удалось, а объемные охладители имеют лучшие характеристики по сравнению с тонкопленочными термоэлектрическими устройствами [13].

Важнейшей интеграционной характеристикой термоэлектрических охладителей является надежность [16], а повышение показателей надежности ТЭУ в первую очередь связано с повышением качества исходных материалов, а именно, их эффективности [17]. Усредненная эффективность термоэлектрических материалов в модуле в настоящее время не превышает $\bar{Z}_M=2,4-2,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$ для условий серийного производства. В этом случае представляет интерес рассмотреть и оценить возможность выбора варианта сочетаний параметров исходных материалов, обеспечивающего повышение показателей надежности ТЭУ при заданной эффективности исходных термоэлектрических материалов.

3. Цель и задачи исследования

Целью работы является повышение показателей надежности двухкаскадного ТЭУ путем использования различных сочетаний параметров исходных материалов термоэлементов.

При традиционном подходе к построению каскадных ТЭУ (КТЭУ) в каждом каскаде используется один и тот же исходный материал с одинаковой эффективностью при $T=300 \text{ K}$ [18] и одинаковыми усредненными параметрами, такими как: коэффициент термоЭДС $\bar{\epsilon}$ и электропроводностью $\bar{\sigma}$ с учетом температурной зависимости.

В то же время представляет интерес рассмотреть несколько вариантов построения КТЭУ.

Вариант 1 – использование в каждом каскаде исходных материалов с одинаковыми параметрами ($\bar{\epsilon}$ и $\bar{\sigma}$) для всех возможных вариантов сочетания.

Вариант 2 – использование в каждом каскаде исходных материалов с различными параметрами, а именно, коэффициентом термоЭДС $\bar{\epsilon}$ и электропроводностью $\bar{\sigma}$ в различных сочетаниях.

Таким образом, с целью повышения показателей надежности, рассмотрена возможность использования одних и тех же исходных материалов в каскадах двухкаскадного ТЭУ, отличающихся коэффициентом термоЭДС $\bar{\epsilon}$ и электропроводностью $\bar{\sigma}$ для перепадов температуры от $\Delta T=60 \text{ K}$ до $\Delta T=90 \text{ K}$ и различных режимов работы, чему и посвящена настоящая статья.

Для достижения этой цели необходимо определить основные параметры и показатели надежности для следующих режимов:

1. $Q_{0\max}$ – максимальной холодопроизводительности;

2. $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\max}$ – максимальной холодопроизводительности при заданном токе;

3. $\left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{\max}$ – максимального холодильного коэффициента;

4. λ_{\min} – минимальной интенсивности отказов.

4. Разработка КТЭУ повышенной надежности

Для построения КТЭУ повышенной надежности воспользуемся различными вариантами сочетаний усредненных параметров исходных материалов, приведенных в табл. 1 при $T=300 \text{ K}$; $\bar{Z}_M=2,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$; $I/s=10$; $\Delta T=0$.

Таблица 1

Варианты сочетаний усредненных параметров исходных термоэлектрических материалов

Варианты сочетаний	Коэффициент термоЭДС $\bar{\epsilon}$, мкВ/град	Электропроводимость $\bar{\sigma}$, См/см	Коэффициент теплопроводности $\bar{\alpha} \cdot 10^3$, Вт/смК	Величина термоэлектрической мощности охлаждения γ , Вт
1	250	50	14,3	0,310
2	210	800	14,7	0,320
3	200	900	15,0	0,325
4	180	1200	16,0	0,350
5	165	1500	17,0	0,370

4. 1. Определение основных параметров и показателей надежности при построении КТЭУ

Для определения основных параметров и показателей надежности двухкаскадных ТЭУ воспользуемся моделью взаимосвязи показателей надежности и основных значимых параметров [19].

Относительную величину интенсивности отказов $\lambda_{\Sigma}/\lambda_0$ можно представить в виде:

$$\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_0} = \frac{n_1 B_1^2 (\Theta_1 + C_1) \left(B_1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \Theta_1 \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \Theta_1 \right)^2} K_{T_1} + \frac{n_2 B_2^2 (\Theta_2 + C_2) \left(B_2 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \Theta_2 \right)^2}{\left(1 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \Theta_2 \right)^2} K_{T_2}, \quad (1)$$

где $\lambda_0 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ 1/час}$ – номинальная интенсивность отказов, 1/час; $B_1 = \frac{I}{I_{\max 1}}$ – относительный рабочий ток первого каскада, отн. ед.; $I_{\max 1} = \frac{e_1 T_0}{R_1}$ – максимальный рабочий ток первого каскада, А; $e_1, R_1 = \frac{1}{\sigma_1 s}$ – ко-

эффициент термоЭДС первого каскада, В/К и электрическое сопротивление, Ом ветви термоэлемента первого каскада; σ_1 – электропроводность ветви термоэлемента первого каскада, См/см; I/s – отношение

высоты к площади поперечного сечения ветви термоэлемента, см⁻¹; T_0 – температура теплопоглощающей стороны первого каскада, К; $\Theta_1 = \frac{\Delta T_1}{\Delta T_{\max 1}}$ – относительный перепад температуры первого каскада, отн. ед.;

$\Delta T_1 = T_1 - T_0$ – рабочий перепад температуры первого каскада, К; T_1 – промежуточная температура, К; I – величина рабочего тока, А; $\Delta T_{max1} = 0,5 \bar{Z}_1 T_0$ – максимальный перепад температуры первого каскада, К; \bar{Z}_1 – усредненная термоэлектрическая эффективность

материала первого каскада, 1/К; $C_1 = \frac{Q_0}{n_1 I_{max1}^2 R_1} = \frac{Q_0}{n_1 \gamma_1}$ –

относительная тепловая нагрузка первого каскада, отн. ед.; Q_0 – величина тепловой нагрузки, Вт; n_1, n_2 – количество термоэлементов первого и второго каска-

дов, шт.; $B_2 = \frac{I}{I_{max2}}$ – относительный рабочий ток

второго каскада, отн. ед.; $I_{max2} = \frac{e_2 T_1}{R_2}$ – максимальный

рабочий ток второго каскада, А; $e_2, R_2 = \frac{1}{\sigma_2 s}$ – коэффи-

циент термоЭДС, В/К и электрическое сопротивление, Ом ветви термоэлемента второго каскада; σ_2 – электропроводность ветви термоэлемента второго каскада, См/см; $\Delta T_2 = T - T_1$ – рабочий перепад температуры второго каскада, К; T – температура тепло выделяющего спая второго каскада, К; $\Delta T_{max2} = 0,5 \bar{Z}_2 T_1$ –

максимальный перепад температуры во втором каскаде, К; \bar{Z}_2 – усредненная термоэлектрическая эффективность материала второго каскада, 1/К; K_{T1}, K_{T2} – коэффициент значимости с учетом влияния пониженных температур соответственно первого и второго каска-

дов, отн. ед. [20]; $C_2 = \frac{Q_0 + W_1}{n_2 I_{max2}^2 R_2} = \frac{Q_0 + W_1}{n_2 \gamma_2}$ –

относительная тепловая нагрузка второго каскада, отн. ед.;

– мощность потребления первого каскада, Вт:

$$W_1 = 2n_1 I_{max1}^2 R_1 B_1 \left(B_1 + \frac{\Delta T_{max1}}{T_0} \Theta_1 \right) = 2n_1 \gamma_1 B_1 \left(B_1 + \frac{\Delta T_{max1}}{T_0} \Theta_1 \right); \quad (2)$$

– мощность потребления второго каскада, Вт:

$$W_2 = 2n_2 I_{max2}^2 R_2 B_2 \left(B_2 + \frac{\Delta T_{max2}}{T_{01}} \Theta_2 \right) = 2n_2 \gamma_2 B_2 \left(B_2 + \frac{\Delta T_{max2}}{T_{01}} \Theta_2 \right). \quad (3)$$

Холодопроизводительность Q_0 КТЭУ определяется первым каскадом и может быть представлена в виде:

$$Q_0 = n_1 I_{max1}^2 R_1 (2B_1 - B_1^2 - \Theta_1) = n_1 \gamma_1 (2B_1 - B_1^2 - \Theta_1). \quad (4)$$

Отношение количества термоэлементов в смежных каскадах $\frac{n_2}{n_1}$ можно представить в виде:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{I_{max1}^2 R_1}{I_{max2}^2 R_2} \frac{2B_1 \left(1 + \frac{\Delta T_{max1}}{T_0} \Theta_1 \right) + B_1^2 - \Theta_1}{2B_2 - B_2^2 - \Theta_2} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \frac{2B_1 \left(1 + \frac{\Delta T_{max1}}{T_0} \Theta_1 \right) + B_1^2 - \Theta_1}{2B_2 - B_2^2 - \Theta_2}. \quad (5)$$

Вероятность безотказной работы P КТЭУ можно представить в виде:

$$P = \exp \left[- \sum_{i=1}^N \lambda_i t \right], \quad (6)$$

где $t = 10^4$ час – назначенный ресурс, N – количество каскадов.

4. 2. Расчет режима Q_{0max} ($B_1=1,0$)

Результаты расчетов основных значимых параметров и показателей надежности двухкаскадного ТЭУ при следующих исходных данных: $T=300$ К; $\Delta T=60$ К, 70 К, 80 К, 90 К; $\lambda_0=3 \cdot 10^{-8}$ 1/сек; $t=10^4$ час; $Q_0=2,0$ Вт; $(1/s)_1 = (1/s)_2 = 10$ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные значимые параметры и показатели надежности двухкаскадного ТЭУ для режима Q_{0max}

Вариант сочетания	I, А	B_2 , отн. ед.	γ_1 , Вт	γ_2 , Вт	n_1+n_2	$\frac{n_2}{n_1}$	n_1 , шт.	n_2 , шт.	Е, отн. ед.	$\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_0}$	P
$T_1=267$ К; $\Delta T=60$ К; $\Theta_1=0,42$; $\Theta_2=0,39$											
1	3,77	0,98	0,204	0,246	81,6	3,80	17,0	64,6	0,0476	78,45	0,9767
2	4,55	0,95	0,204	0,256	79,2	3,66	16,9	62,2	0,0498	71,9	0,9787
3	4,80	0,96	0,209	0,260	77,7	3,71	16,5	61,2	0,0490	70,5	0,9791
4	5,50	0,93	0,219	0,275	73,4	3,68	15,7	57,7	0,0513	61,0	0,9819
5	6,40	0,94	0,226	0,288	70,2	3,62	15,2	55,0	0,0507	60,2	0,9821
$T_1=262$ К; $\Delta T=70$ К; $\Theta_1=0,55$; $\Theta_2=0,47$											
1	3,75	0,99	0,187	0,241	119,0	4,00	23,8	95,2	0,0326	117,0	0,9655
2	4,40	0,95	0,186	0,246	117,1	3,91	23,9	93,2	0,0345	103,3	0,9695
3	4,70	0,94	0,190	0,253	113,9	3,89	23,3	90,6	0,0345	99,3	0,9707
4	5,30	0,91	0,196	0,265	109,2	3,83	22,6	86,6	0,0365	86,4	0,9744
5	6,10	0,92	0,208	0,278	103,9	3,88	21,3	82,6	0,0361	84,0	0,9751
$T_1=256$ К; $\Delta T=80$ К; $\Theta_1=0,70$; $\Theta_2=0,57$											
1	3,60	0,96	0,165	0,230	217,8	4,39	40,4	177,4	0,020	197,5	0,9425
2	4,34	0,95	0,168	0,233	215,2	4,43	39,6	175,6	0,020	189,7	0,9447
3	4,56	0,93	0,170	0,239	210,7	4,39	39,1	171,6	0,020	174,4	0,9490
4	5,20	0,92	0,178	0,249	201,9	4,41	37,3	164,6	0,020	163,8	0,9521
5	5,90	0,918	0,185	0,262	195,6	4,36	35,9	156,5	0,020	154,9	0,9546
$T_1=250$ К; $\Delta T=90$ К; $\Theta_1=0,89$; $\Theta_2=0,68$											
1	3,50	0,95	0,148	0,219	773,0	5,29	122,9	650,1	0,0056	691,5	0,8126
2	4,20	0,96	0,150	0,280	766,1	5,32	121,2	644,9	0,0056	699,0	0,8108
3	4,40	0,935	0,153	0,228	743,6	5,31	118,0	625,6	0,0058	627,9	0,8283
4	5,00	0,90	0,159	0,240	708,5	5,24	113,5	595,0	0,00604	544,4	0,8493
5	5,60	0,88	0,167	0,250	683,2	5,12	111,4	571,5	0,0062	500,0	0,8607

Для определения термоэлектрической мощности охлаждения каждого каскада γ_1 и γ_2 можно воспользоваться соотношением:

$$\gamma_i = \epsilon_i^2 \sigma_i T_{i-1}^2 S / I_{\max}^2 R_i \quad (7)$$

С ростом перепада температуры ΔT величина термоэлектрической мощности охлаждения первого γ_1 и второго γ_2 каскадов уменьшается и для различных вариантов сочетаний параметров исходных материалов (1–5) при $T = 300 \text{ K}$, $\bar{Z} = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$, $1/S = 10$ (рис. 1) и не зависят от режима работы.

При заданном перепаде температуры ΔT :

- величина термоэлектрической мощности охлаждения γ_i в каскадах увеличивается от варианта (1) до (5) – рис. 1;

- величина относительного рабочего тока в первом каскаде B_1 остается постоянной, а величина относительного рабочего тока во втором каскаде B_2 уменьшается (рис. 2) для всех вариантов сочетаний параметров исходного материала (1–5);

- промежуточная температура T_1 уменьшается и практически не зависит от варианта сочетания параметров исходных материалов (1–5) и режима работы (рис. 3);

- величина относительного перепада температуры в каскадах Θ_1 и Θ_2 увеличивается и не зависит от варианта сочетаний параметров (1–5) (рис. 4) и режима работы. При постоянном перепаде температуры ΔT величины Θ_1 и Θ_2 остаются постоянными и не зависят от варианта сочетания (1–5) (рис. 4);

- величина отношения количества термоэлементов

в смежных каскадах $\left(\frac{n_2}{n_1} \right)$ увеличивается и практически не зависит от варианта сочетаний параметров исходных материалов (1–5), а зависит от токового режима работы (рис. 5);

- холодильный коэффициент E уменьшается и практически не зависит от варианта сочетания параметров исходных материалов (1–5) для всех режимов работы (рис. 6). При заданном перепаде температуры ΔT холодильный коэффициент E увеличивается от

режима работы $Q_{0\max}$ до $\left(\frac{Q_0}{I^2} \right)$ (рис. 6) и не зависит от варианта сочетания параметров исходного материала (1–5);

- суммарное количество термоэлементов в каскадах n_1+n_2 увеличивается (рис. 7). При заданном перепаде температуры ΔT суммарное количество термоэлементов n_1+n_2 уменьшается от варианта (1) до (5) (рис. 7);

- суммарная интенсивность отказов λ_Σ увеличивается для любого режима и для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1–5) (рис. 8). При заданном перепаде температуры ΔT суммарная интенсивность отказов λ_Σ уменьшается от варианта (1) до (5) (рис. 8) для различных режимов работы;

- вероятность безотказной работы P уменьшается для любого режима и для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1–5) (рис. 9). При заданном перепаде температуры ΔT вероятность безотказной работы P увеличивается от варианта (1) до (5) (рис. 9).

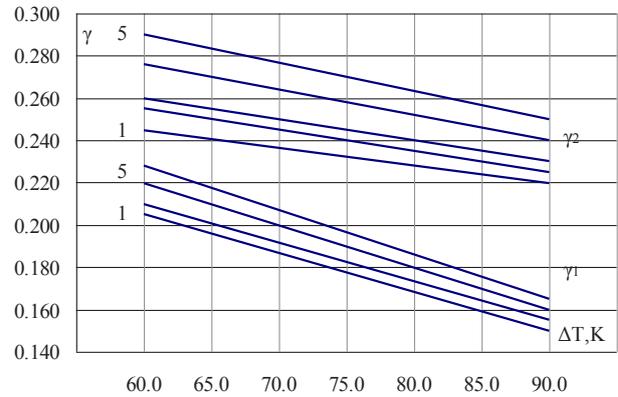


Рис. 1. Зависимость термоэлектрической мощности охлаждения в каскадах γ_1 и γ_2 двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных вариантов сочетания параметров исходных материалов (1–5) при $T=300 \text{ K}$; $\bar{Z}_M=2,4-2,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$; $1/S=10$ для

режимов $Q_{0\max}$; $\left(\frac{Q_0}{I} \right)_{\max}$; $\left(\frac{Q_0}{I^2} \right)_{\max}$; λ_{\min}

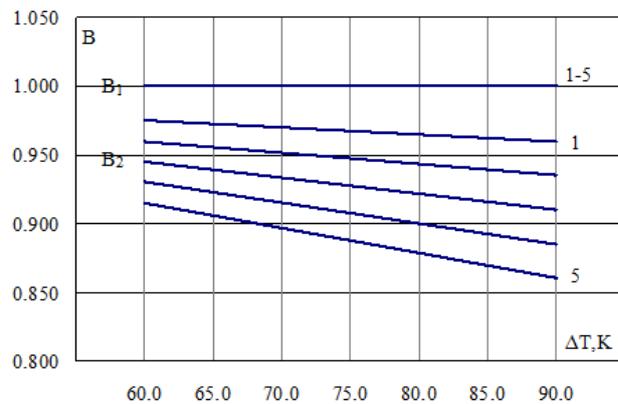


Рис. 2. Зависимость относительного рабочего тока первого и второго каскада B_1 и B_2 двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных вариантов сочетания параметров исходных материалов (1–5) при $T=300 \text{ K}$; $\bar{Z}_M=2,4-2,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$; $1/S=10$ для режима $Q_{0\max}$

Таким образом, при построении двухкаскадного ТЭУ повышенной надежности в режиме $Q_{0\max}$ необходимо использовать исходные материалы с повышенной электропроводностью – вариант сочетания (5) по сравнению с традиционным вариантом (3) при одной и той же эффективности. Это позволяет при заданном перепаде температуры ΔT и величине тепловой нагрузки Q_0 :

- уменьшить суммарное количество термоэлементов n_1+n_2 в среднем на 7 %;

- увеличить холодильный коэффициент E в среднем на 4 %;

- уменьшить суммарную величину интенсивности отказов λ_Σ в среднем на 15 % и тем самым увеличить вероятность безотказной работы P .

При этом величина рабочего тока I увеличивается в среднем на 30 %.

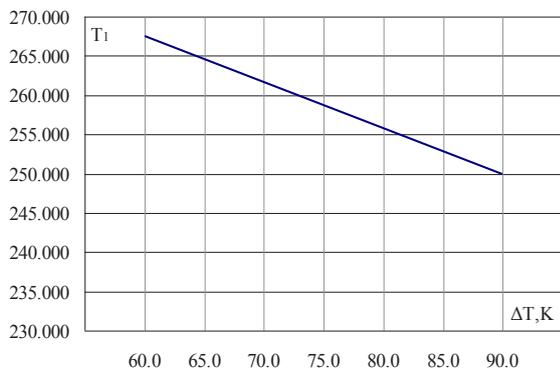


Рис. 3. Зависимость промежуточной температуры T_1 двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных вариантов сочетания параметров исходных материалов (1–5) при $T=300$ К; $\bar{Z}_M=2,4-2,5 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\frac{1}{S}=10$ для всех режимов работы

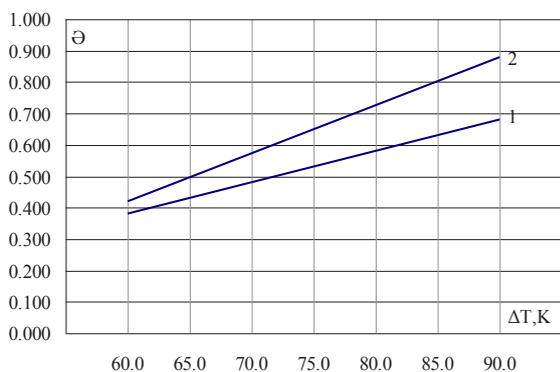


Рис. 4. Зависимость относительного перепада температуры в каскадах $\Theta_1 - 1$ и $\Theta_2 - 2$ двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных вариантов сочетания параметров исходных материалов (1–5) при $T=300$ К; $\bar{Z}_M=2,4-2,5 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\frac{1}{S}=10$ для всех режимов работы

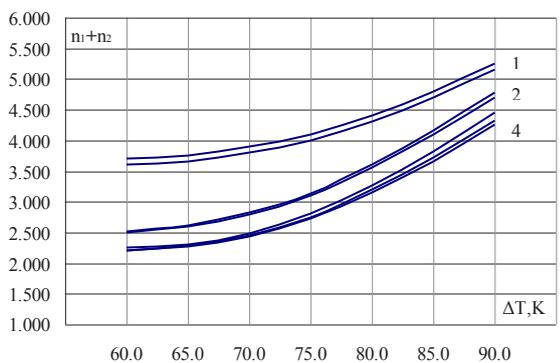


Рис. 5. Зависимость отношения количества термоэлементов в смежных каскадах $\frac{n_2}{n_1}$

двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных вариантов сочетания параметров исходных материалов (1–5) при $T=300$ К; $\bar{Z}_M=2,4-2,5 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $Q_0=2,0$ Вт для режимов

$$1 - Q_{0max}; 2 - \left(\frac{Q_0}{I}\right)_{max}; 3 - \left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{max}; 4 - \lambda_{min}$$

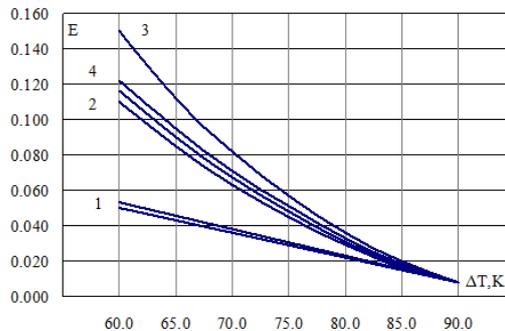


Рис. 6. Зависимость холодильного коэффициента E двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных вариантов сочетания параметров исходных материалов (1–5) при $T=300$ К; $\bar{Z}_M=2,4-2,5 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $Q_0=2,0$ Вт, $\frac{1}{S}=10$ для режимов 1 – Q_{0max} ;

$$2 - \left(\frac{Q_0}{I}\right)_{max}; 3 - \left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{max}; 4 - \lambda_{min}$$

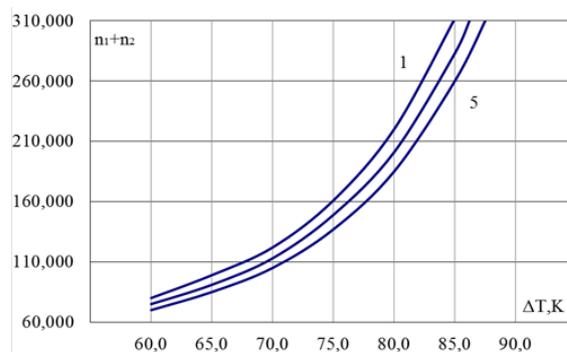


Рис. 7. Зависимость суммарного количества термоэлементов в каскадах (n_1+n_2) двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных вариантов сочетания параметров исходных материалов (1–5) при $T=300$ К; $\bar{Z}_M=2,4-2,5 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $Q_0=2,0$ Вт, $\frac{1}{S}=10$ в режиме Q_{0max}

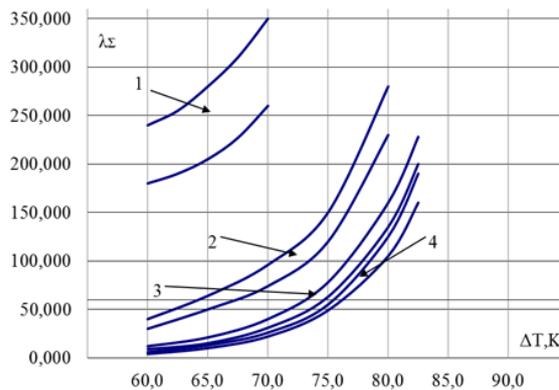


Рис. 8. Зависимость суммарной интенсивности отказов $\lambda_{\Sigma} \cdot 10^8, \frac{1}{\text{час}}$ двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных вариантов сочетания параметров исходных материалов (1–5) при $T=300$ К; $\bar{Z}_M=2,4-2,5 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $Q_0=2,0$ Вт, $\frac{1}{S}=10$ для режимов

$$1 - Q_{0max}; 2 - \left(\frac{Q_0}{I}\right)_{max}; 3 - \left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{max}; 4 - \lambda_{min}$$

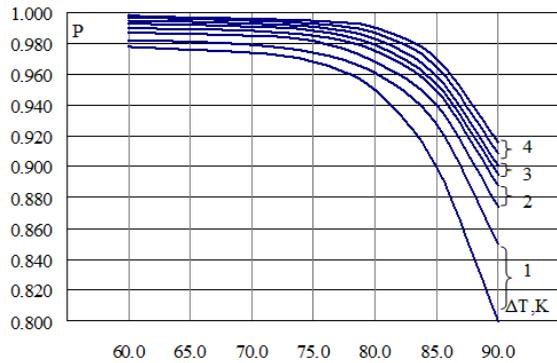


Рис. 9. Зависимость вероятности безотказной работы P двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных вариантов сочетания параметров исходных материалов (1–5) при T=300 К; Z_M=2,4–2,5·10⁻³ 1/К;

$$Q_0=2,0 \text{ Вт}, \frac{1}{S}=10 \text{ для режимов } 1 - Q_{0\text{max}}; 2 - \left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\text{max}}; \\ 3 - \left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{\text{max}}; 4 - \lambda_{\text{min}}$$

4. 3. Расчет режима $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\text{max}}$ (B=√Θ)

Результаты расчетов основных значимых параметров и показателей надежности двухкаскадного ТЭУ при следующих исходных данных: T=300 К; ΔT=60 К, 70 К, 80 К, 90 К; λ₀=3·10⁻⁸ 1/сек; t=10⁴ час; Q₀=2,0 Вт; (1/S)₁=(1/S)₂=10 приведены в табл. 3.

C ростом перепада температуры ΔT:

- величина термоэлектрической мощности охлаждения в каскадах γ₁ и γ₂ уменьшается и не зависит от режима работы для различных вариантов сочетаний исходных материалов (1–5) (рис. 1). При заданном перепаде температуры величина термоэлектрической мощности охлаждения в каскадах γ₁ и γ₂ увеличивается от варианта (1) до (5) (рис. 1);

- величина относительного рабочего тока в первом каскаде В₁ и величина относительного рабочего тока во втором каскаде В₂ увеличивается для всех вариантов сочетаний параметров (1–5) (рис. 10). При заданном перепаде температуры ΔT величина относительного рабочего тока первого каскада В₁ остается постоянной и не зависит от варианта сочетания, а величина относительного рабочего тока второго каскада В₂ уменьшается от варианта (1) до (5) (рис. 10);

- промежуточная температура T₁ уменьшается и практически не зависит от варианта сочетания параметров исходных материалов (1–5) и режима работы (рис. 3);

- величина относительного перепада температуры в каскадах Θ₁ и Θ₂ увеличивается и не зависит от варианта сочетания параметров (1–5) (рис. 4). При заданном перепаде температуры ΔT величины Θ₁ и Θ₂ остаются постоянными и не зависят от варианта сочетания (1–5) (рис. 4);

- величина отношения количества термоэлементов в смежных каскадах $\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$ увеличивается и практически не зависит от варианта сочетания параметров исходных материалов (1–5) (рис. 5, п. 2), а зависит от токового режима работы;

- холодильный коэффициент E уменьшается и практически не зависит от варианта сочетания параметров исходных материалов (1–5) для всех режимов работы (рис. 6, п. 2). При заданном перепаде температуры ΔT холодильный коэффициент E увеличивается от режима Q_{0max}

до $\left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{\text{max}}$ и практически не зависит от варианта сочетания параметров исходного материала (1–5) (рис. 6, п. 2);

- суммарное количество термоэлементов (n₁+n₂) увеличивается (рис. 11). При заданном перепаде температуры ΔT суммарное количество термоэлементов (n₁+n₂) уменьшается от варианта (1) до (5) (рис. 11);

- суммарная интенсивность отказов λ_Σ увеличивается для любого режима работы, в том числе и для $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\text{max}}$ и для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1–5) (рис. 8, п. 2).

При заданном перепаде температуры ΔT суммарная интенсивность отказов λ_Σ уменьшается от варианта (1) до (5) (рис. 8, п. 2);

- вероятность безотказной работы P уменьшается для любого режима рабо-

Основные значимые параметры и показатели надежности

двухкаскадного ТЭУ для режима $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\text{max}}$

Вариант сочетания	I, А	B ₂ отн. ед.	γ ₁ , Вт	γ ₂ , Вт	n ₁ +n ₂	n ₂ /n ₁	n ₁ , шт.	n ₂ , шт.	E, отн. ед.	$\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_0}$	P
T ₁ =267 К ΔT=60 К; Θ ₁ =0,42; Θ ₂ =0,39											
1	2,45	0,65	0,64	0,204	0,246	75,0	2,49	21,5	53,5	0,116	12,7
2	2,90	0,65	0,62	0,204	0,256	74,6	2,47	21,5	53,1	0,120	11,7
3	3,15	0,65	0,62	0,209	0,260	73,2	2,50	20,9	52,3	0,120	11,4
4	3,60	0,65	0,61	0,219	0,275	69,9	2,51	19,9	50,0	0,120	10,5
5	4,17	0,65	0,61	0,226	0,288	66,4	2,44	19,3	47,1	0,120	10,1
T ₁ =262 К ΔT=70 К; Θ ₁ =0,55; Θ ₂ =0,47											
1	2,80	0,74	0,73	0,187	0,241	107,7	2,85	28,0	79,7	0,064	32,2
2	3,27	0,74	0,70	0,186	0,246	109,1	2,88	28,1	81,0	0,0657	29,3
3	3,50	0,74	0,70	0,190	0,253	106,7	2,88	27,5	79,2	0,0655	28,6
4	3,90	0,74	0,67	0,196	0,265	105,4	2,95	26,7	78,7	0,0675	25,3
5	4,50	0,74	0,68	0,208	0,278	97,1	2,87	25,1	72,0	0,0670	24,6
T ₁ =256 К ΔT=80 К; Θ ₁ =0,70; Θ ₂ =0,57											
1	3,0	0,84	0,80	0,165	0,230	201,8	3,56	44,3	157,5	0,030	90,8
2	3,6	0,84	0,80	0,168	0,233	199,3	3,60	43,4	155,9	0,030	89,8
3	3,8	0,84	0,77	0,170	0,239	199,9	3,66	42,9	157,0	0,030	81,2
4	4,4	0,84	0,77	0,178	0,249	192,0	3,68	41,0	151,0	0,030	77,9
5	5,0	0,84	0,77	0,185	0,262	182,5	3,63	39,4	143,1	0,030	74,3
T ₁ =250 К ΔT=90 К; Θ ₁ =0,89; Θ ₂ =0,68											
1	3,30	0,94	0,90	0,148	0,219	744,0	4,88	126,5	617,5	0,0065	536,6
2	4,00	0,94	0,905	0,150	0,220	737,8	4,91	124,8	613,0	0,00647	540,8
3	4,20	0,94	0,88	0,153	0,228	722,3	4,94	121,5	600,7	0,00667	487,9
4	4,75	0,94	0,85	0,159	0,240	704,3	4,98	117,8	586,5	0,00688	431,4
5	5,30	0,94	0,83	0,162	0,250	662,4	4,77	114,8	547,6	0,0070	396,6

ты и для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1–5) (рис. 9, п. 2). При заданном перепаде температуры ΔT вероятность безотказной работы P увеличивается от варианта (1) до (5) (рис. 9, п. 2).

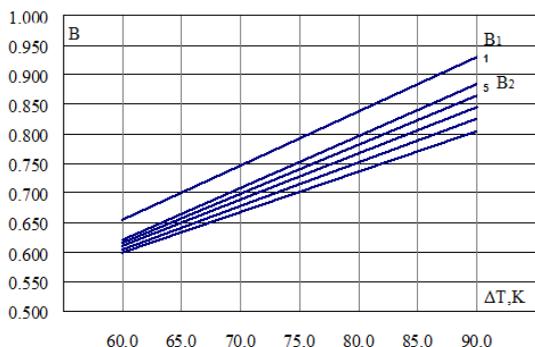


Рис. 10. Зависимость относительного рабочего тока в каскадах B_1 и B_2 двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных вариантов сочетания параметров исходных материалов (1–5) при $T=300\text{ K}$;

$\bar{Z}_M=2,4-2,5 \cdot 10^{-3}\text{ 1/K}$; $Q_0=2,0\text{ Вт}$, $1/S=10$ в режиме $(\frac{Q_0}{I})_{\max}$

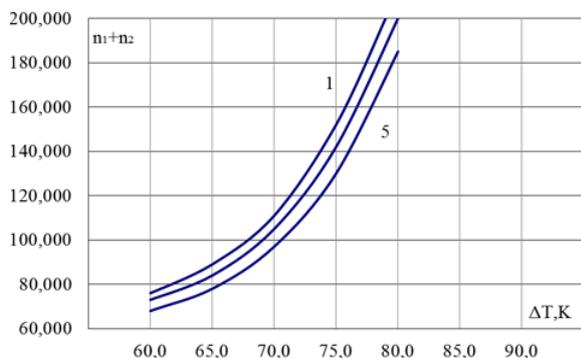


Рис. 11. Зависимость суммарного количества термоэлементов (n_1+n_2) двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных вариантов сочетания параметров исходных материалов (1–5) при

$T=300\text{ K}$; $\bar{Z}_M=2,4-2,5 \cdot 10^{-3}\text{ 1/K}$; $Q_0=2,0\text{ Вт}$, $1/S=10$ в режиме $(\frac{Q_0}{I})_{\max}$

Таким образом, при построении двухкаскадного ТЭУ повышенной надежности в режиме $(\frac{Q_0}{I})_{\max}$

можно использовать в каскадах исходные материалы, отличающиеся повышенной электропроводностью (варианты сочетаний параметров (5) по сравнению с традиционным (3) при одной и той же термоэлектрической эффективности). Это позволяет при заданном перепаде температур ΔT и холодопроизводительности Q_0 :

- уменьшить суммарное количество термоэлементов (n_1+n_2) в среднем на 7 %;
- увеличить холодильный коэффициент E в среднем на 2 %;
- уменьшить интенсивность отказов λ_{Σ} в среднем на 13 % и тем самым увеличить вероятность безотказной работы P ;

– при этом величина рабочего тока I увеличивается в среднем на 30 %.

4. 4. Расчет режима $(\frac{Q_0}{I^2})_{\max}$

Результаты расчетов основных параметров и показателей надежности двухкаскадного ТЭУ при следующих исходных данных: $T=300\text{ K}$; $\Delta T=60\text{ K}$, 70 K , 80 K , 90 K ; $\lambda_0=3 \cdot 10^{-8}\text{ 1/сек}$; $t=10^4\text{ час}$; $Q_0=2,0\text{ Вт}$; $(1/S)_1=(1/S)_2=10$ приведены в табл. 4.

С ростом перепада температуры ΔT :

– величина термоэлектрической мощности охлаждения в каскадах γ_1 и γ_2 уменьшается и не зависит от режима работы для различных вариантов сочетаний параметров исходных материалов (1–5) (рис. 1). При заданном перепаде температуры ΔT величина термоэлектрической мощности охлаждения в каскадах γ_1 и γ_2 увеличивается от варианта (1) до (5) (рис. 1);

– величина относительного рабочего тока в первом и во втором каскадах B_1 и B_2 увеличивается для всех вариантов сочетаний параметров (1–5) (рис. 12).;

При заданном перепаде температуры ΔT величина относительного рабочего тока первого каскада B_1 остается постоянной и не зависит от варианта сочетания, а величина B_2 уменьшается от варианта (1) до (5) (рис. 12):

– промежуточная температура T_1 уменьшается и практически не зависит от варианта сочетаний параметров исходных материалов (1–5) и режима работы (рис. 3);

– величина относительного перепада температуры в каскадах Θ_1 и Θ_2 увеличивается и не зависит от варианта сочетания параметров (1–5) (рис. 4). При заданном перепаде температуры ΔT величины Θ_1 и Θ_2 остаются постоянными и не зависят от варианта сочетания (1–5) (рис. 4);

– величина отношения количества термоэлементов в смежных каскадах $(\frac{n_2}{n_1})$ увеличивается и практически не зависит от варианта сочетания параметров исходных материалов (1–5) (рис. 5, п. 3), а зависит от токового режима работы;

– холодильный коэффициент E уменьшается и практически не зависит от варианта сочетания параметров исходных материалов (1–5) для всех режимов работы (рис. 6, п. 3). При заданном перепаде температуры ΔT

– уменьшаются относительные рабочие токи в каскадах B_1 и B_2 (рис. 12).

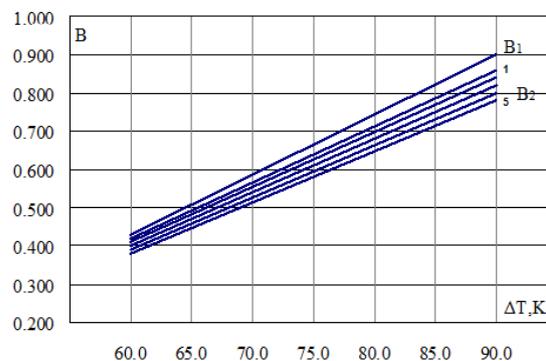


Рис. 12. Зависимость относительного рабочего тока в каскадах B_1 и B_2 двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных вариантов сочетания параметров исходных материалов (1–5) при $T=300\text{ K}$;

$\bar{Z}_M=2,4-2,5 \cdot 10^{-3}\text{ 1/K}$; $Q_0=2,0\text{ Вт}$, $1/S=10$ в режиме $(\frac{Q_0}{I^2})_{\max}$

Таблица 4

Основные значимые параметры и показатели надежности

двухкаскадного ТЭУ для режима $(\frac{Q_0}{T^2})_{\max}$

Вариант сочетания	I, А	V ₂ , отн. ед.	γ ₁ , Вт	γ ₂ , Вт	n ₁ +n ₂	n ₂ /n ₁	n ₁ , шт.	n ₂ , шт.	E, отн. ед.	$\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_0}$	P
T ₁ =267 К; ΔT=60 К; Θ ₁ =0,42; Θ ₂ =0,39											
1	1,58	0,42	0,41	0,204	0,246	128,5	2,18	40,4	88,1	0,15	3,28
2	1,90	0,42	0,40	0,204	0,256	129,2	2,20	40,4	88,8	0,15	3,11
3	2,00	0,42	0,40	0,209	0,260	126,8	2,23	39,3	87,5	0,15	3,05
4	2,30	0,42	0,39	0,219	0,275	123,4	2,30	37,4	86,0	0,15	2,81
5	2,70	0,42	0,39	0,226	0,288	115,3	2,18	36,3	79,0	0,15	2,71
T ₁ =262 К; ΔT=70 К; Θ ₁ =0,55; Θ ₂ =0,47											
1	2,06	0,55	0,54	0,187	0,241	149,0	2,45	43,2	105,8	0,080	12,7
2	2,43	0,55	0,52	0,186	0,246	152,9	2,52	43,4	109,5	0,081	11,9
3	2,60	0,55	0,52	0,190	0,253	149,3	2,52	42,4	106,9	0,081	11,6
4	2,93	0,55	0,50	0,196	0,265	150,4	2,65	41,2	109,2	0,081	10,6
5	3,37	0,55	0,51	0,208	0,278	135,8	2,51	38,7	97,1	0,081	10,3
T ₁ =256 К; ΔT=80 К; Θ ₁ =0,70; Θ ₂ =0,57											
1	2,50	0,70	0,67	0,165	0,231	239,6	3,15	57,7	181,9	0,034	52,8
2	3,00	0,70	0,67	0,168	0,233	237,8	3,20	56,6	181,2	0,034	52,0
3	3,20	0,70	0,65	0,170	0,239	239,5	3,28	56,0	183,5	0,0343	48,8
4	3,65	0,70	0,64	0,178	0,349	233,9	3,37	53,5	180,4	0,0344	45,7
5	4,20	0,70	0,64	0,185	0,262	219,4	3,26	51,5	167,9	0,0344	43,9
T ₁ =250 К; ΔT=90 К; Θ ₁ =0,89; Θ ₂ =0,68											
1	3,10	0,89	0,847	0,148	0,219	770,9	4,59	138,0	632,9	0,00700	439,5
2	3,80	0,89	0,855	0,150	0,220	762,7	4,60	136,2	626,5	0,00696	446,7
3	4,00	0,89	0,830	0,154	0,228	752,2	4,67	132,7	619,5	0,00714	404,7
4	4,50	0,89	0,800	0,159	0,240	741,4	4,77	128,5	612,9	0,00730	359,8
5	5,00	0,89	0,790	0,162	0,250	691,2	4,48	126,1	565,1	0,00736	339,2

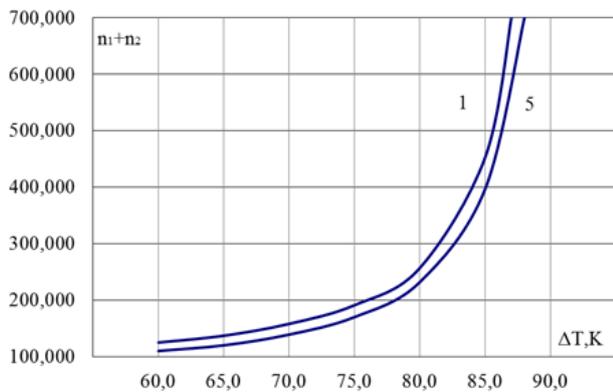


Рис. 13. Зависимость суммарного количества термоэлементов (n_1+n_2) двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных вариантов сочетания параметров исходных материалов (1–5) при $T=300\text{ К}$; $\bar{Z}_M = 2,4-2,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К}$; $Q_0 = 2,0 \text{ Вт}$, $\frac{1}{s} = 10 \text{ в режиме } (\frac{Q_0}{T^2})_{\max}$

– холодильный коэффициент E увеличивается от режима $Q_{0\max}$ до $(\frac{Q_0}{T^2})_{\max}$ и практически не зависит от варианта сочетаний параметров исходного материала (1–5) (рис. 6 п. 3);

– суммарное количество термоэлементов (n_1+n_2) увеличивается (рис. 13) для различных вариантов со-

четаний параметров исходного материала (1 – 5). При заданном перепаде температуры ΔT суммарное количество термоэлементов (n_1+n_2) уменьшается от варианта (1) до (5) (рис. 13);

– суммарная интенсивность отказов λ_{Σ} увеличивается для любого режима работы, в том числе и для $(\frac{Q_0}{T^2})_{\max}$ и

различных сочетаний параметров исходного материала (1–5) (рис. 8, п. 3). При заданном перепаде температуры ΔT суммарная интенсивность отказов λ_{Σ} уменьшается от варианта (1) до (5) (рис. 8, п. 3);

– вероятность безотказной работы P уменьшается для любого режима работы и для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1–5) (рис. 9, п. 3). При заданном перепаде температуры ΔT вероятность безотказной работы P увеличивается от варианта (1) до (5) (рис. 9, п. 3).

Таким образом, при построении двухкаскадного ТЭУ повышенной на-

дежности в режиме $(\frac{Q_0}{T^2})_{\max}$ можно

использовать одни и те же исходные материалы с повышенной электропроводностью (вариант (5) по сравнению с (3) при одной и той же термоэлектрической эффективности, что позволяет при заданном перепаде температуры ΔT и холодопроизводительности Q_0 :

– уменьшить суммарное количество термоэлементов (n_1+n_2) на 5,9 %;

– уменьшить интенсивность отказов λ_{Σ} в среднем на 12,1 %;

– увеличить вероятность безотказной работы P .

При этом холодильный коэффициент E практически не изменяется, увеличивается отношение количество термоэлементов в смежных каскадах в среднем на 2,2 %, относительный рабочий ток V_1 практически не изменяется, а V_2 уменьшается на 2,7 %, увеличивается величина рабочего тока I на 30 %.

4. 5. Расчет режима минимальной интенсивности отказов λ_{\min}

Результаты расчетов основных параметров и показателей надежности двухкаскадного ТЭУ при следующих основных данных: $T=300 \text{ К}$; $\Delta T=60 \text{ К}$, 70 К , 80 К , 90 К ; $\lambda_0=3 \cdot 10^{-8} \text{ 1/сек}$; $t=10^4 \text{ час}$; $Q_0=2,0 \text{ Вт}$; $(\frac{1}{s})_1 = (\frac{1}{s})_2 = 10$ приведены в табл. 5.

С ростом перепада температуры ΔT :

– величина термоэлектрической мощности охлаждения в каскадах γ_1 и γ_2 уменьшается и не зависит от режима работы для различных вариантов сочетаний параметров исходных материалов (1–5) (рис. 1). При заданном перепаде температуры ΔT величина термоэлектрической мощности охлаждения в каскадах γ_1 и γ_2 увеличивается от варианта (1) до варианта (5) (рис. 1).

Таблица 5

Основные значимые параметры и показатели надежности двухкаскадного ТЭУ для режима λ_{min}

Вариант сочетания	I, А	B ₂ , отн. ед.	γ_1 , Вт	γ_2 , Вт	n_1+n_2	n_2/n_1	n_1 , шт.	n_2 , шт.	E, отн. ед.	$\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_0}$	P
T ₁ =267 К; ΔT=60 К; Θ ₁ =0,42; Θ ₂ =0,39											
1	1,28	0,34	0,33	0,204	0,246	226,8	2,32	68,3	158,5	0,125	2,31
2	1,53	0,34	0,32	0,204	0,256	229,5	2,37	68,1	161,4	0,125	2,25
3	1,65	0,34	0,32	0,209	0,260	221,1	2,34	66,2	154,9	0,125	2,20
4	1,87	0,34	0,32	0,219	0,275	220,9	2,49	63,3	157,6	0,122	2,05
5	2,18	0,34	0,32	0,226	0,288	200,7	2,28	61,2	139,5	0,123	1,99
T ₁ =262 К; ΔT=70 К; Θ ₁ =0,55; Θ ₂ =0,47											
1	1,73	0,46	0,45	0,187	0,241	224,4	2,37	66,6	157,8	0,072	9,23
2	2,00	0,46	0,44	0,186	0,246	235,1	2,51	67,0	168,1	0,071	8,77
3	2,17	0,46	0,44	0,190	0,253	231,2	2,54	65,4	165,8	0,071	8,53
4	2,46	0,46	0,42	0,196	0,265	236,9	2,73	63,5	173,4	0,070	7,98
5	2,83	0,46	0,43	0,208	0,278	210,7	2,53	59,7	151,0	0,070	7,64
T ₁ =256 К; ΔT=80 К; Θ ₁ =0,70; Θ ₂ =0,57											
1	2,20	0,62	0,59	0,165	0,231	314,3	3,04	77,9	236,4	0,032	41,9
2	2,70	0,62	0,59	0,168	0,233	313,7	3,10	76,5	237,2	0,032	41,1
3	2,80	0,62	0,57	0,170	0,239	312,0	3,26	75,6	326,4	0,032	38,6
4	3,20	0,62	0,57	0,178	0,249	308,3	3,27	72,2	236,1	0,032	36,9
5	3,70	0,62	0,57	0,185	0,262	294,7	3,24	69,47	225,1	0,032	35,7
T ₁ =250 К; ΔT=90 К; Θ ₁ =0,89; Θ ₂ =0,68											
1	2,90	0,82	0,78	0,148	0,219	923,0	4,30	174,2	748,8	0,0068	382,1
2	3,46	0,82	0,78	0,150	0,220	910,6	4,30	171,8	738,8	0,0069	386,5
3	3,60	0,82	0,77	0,153	0,218	903,2	4,40	167,4	736,4	0,0068	356,8
4	4,10	0,82	0,74	0,159	0,240	898,0	4,54	162,1	735,9	0,0070	321,0
5	4,60	0,82	0,73	0,162	0,250	830,0	4,25	158,1	671,9	0,0070	300,4

– величина относительного рабочего тока в каскадах V₁ и V₂ увеличивается для всех вариантов сочетаний исходного материала (1–5) (рис. 14). При заданном перепаде температуры ΔT величина относительного рабочего тока первого каскада V₁ остается постоянной и не зависит от варианта сочетания параметров, а величина V₂ уменьшается от варианта (1) до (5) (рис. 14);

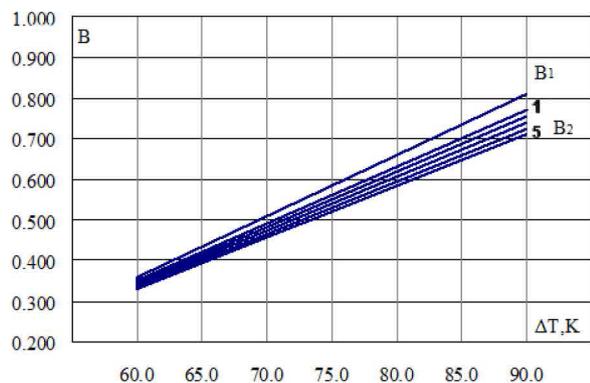


Рис. 14. Зависимость относительного рабочего тока В в каскадах V₁ и V₂ двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных вариантов сочетания параметров исходных материалов (1–5) при T=300К; $\bar{Z}_M=2,4-2,5 \cdot 10^{-3}$ 1/К; Q₀=2,0 Вт, $1/S=10$ в режиме λ_{min}

– промежуточная температура T₁ уменьшается и практически не зависит от варианта сочетания параметров исходных материалов (1–5) для всех режимов (рис. 3);

– величина относительного перепада температуры в каскадах Θ₁ и Θ₂ увеличивается и не зависит от варианта сочетания параметров (1–5) (рис. 4). При заданном перепаде температуры ΔT величины Θ₁ и Θ₂ остаются постоянными и не зависят от варианта сочетания (1–5) (рис. 4);

– величина отношения количества термоэлементов в смежных каскадах $(\frac{n_2}{n_1})$ увеличи-

вается и практически не зависит от варианта сочетания параметров исходных материалов (1–5), а зависит от токового режима работы (рис. 5п. 4);

– холодильный коэффициент E уменьшается и практически не зависит от варианта сочетания параметров исходных материалов (1–5) для всех режимов работы (рис. 6, п. 4). При заданном перепаде температуры ΔT холодильный коэффициент E увеличивается

от режима Q_{0max} до $(\frac{Q_0}{I^2})_{max}$ и практиче-

ски не зависит от варианта сочетания параметров исходного материала (1–5) (рис. 6 п. 4);

– суммарное количество термоэлементов (n₁+n₂) увеличивается (рис. 15) для различных вариантов сочетания параметров исходного материала (1–5). При заданном перепаде температуры ΔT суммарное количество термоэлементов (n₁+n₂) уменьшается от варианта (1) до (5) (рис. 15);

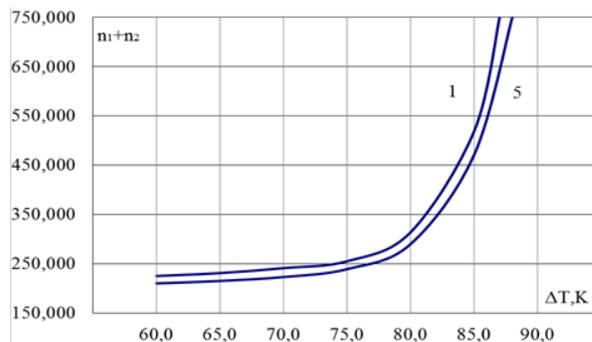


Рис. 15. Зависимость суммарного количества термоэлементов (n₁+n₂) двухкаскадного ТЭУ от общего перепада температуры ΔT для различных вариантов сочетания параметров исходных материалов (1–5) при T=300 К; $\bar{Z}_M=2,4-2,5 \cdot 10^{-3}$ 1/К; Q₀=2,0 Вт, $1/S=10$ в режиме λ_{min}

– суммарная интенсивность отказов λ_Σ увеличивается для любого режима работы, в том числе для различных сочетаний параметров исходного материала (1–5) (рис. 8, п. 4). При заданном перепаде температуры суммарная интенсивность отказов λ_Σ уменьшается от варианта (1) до (5) (рис. 8, п. 4);

– вероятность безотказной работы P уменьшается для любого режима работы и для различных вариантов сочетаний параметров исходного материала (1–5) (рис. 9, п. 4). При заданном перепаде температуры ΔT вероятность безотказной работы P увеличивается от варианта (1) до (5) (рис. 9, п. 4).

5. Обсуждение результатов сравнительного анализа

Таким образом, при построении двухкаскадного ТЭУ повышенной надежности в режиме λ_{\min} можно использовать одни и те же исходные материалы с повышенной электропроводностью (вариант (5) по сравнению с (3)) при одной и той же термоэлектрической эффективности, что позволяет при заданном перепаде температуры ΔT и холодопроизводительности Q_0 :

- уменьшить суммарное количество термоэлементов ($n_1 + n_2$) в среднем на 5,2 %;
- уменьшить интенсивность отказов λ_{Σ} в среднем на 11,2 %, при этом увеличить вероятность безотказной работы P .

При этом:

- холодильный коэффициент E практически не изменяется;
- увеличивается отношение количества термоэлементов в смежных каскадах $\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$ в среднем на 3 %;

– относительный рабочий ток V_1 и V_2 практически не изменяется;

- увеличивается рабочий ток I в среднем на 31 %.

6. Выводы

Сравнительный анализ результатов расчетов показателей надежности двухкаскадных ТЭУ, собранных

из различных исходных материалов (варианты сочетаний параметров (1–5) в соответствии с табл. 1) показал возможность уменьшения интенсивности отказов λ и увеличения вероятности безотказной работы P для сочетаний (4, 5) по сравнению с (3):

- для режима $Q_{0\max}$ в среднем на 15 %;
- для режима $\left(\frac{Q_0}{I}\right)_{\max}$ в среднем на 13 %;
- для режима $\left(\frac{Q_0}{I^2}\right)_{\max}$ в среднем на 12 %;

– для режима λ_{\min} в среднем на 11 % при одной и той же эффективности исходных материалов и в зависимости от перепада температуры ΔT .

Использование сочетаний (1, 2) по сравнению с (3) является нерациональным, так как при этом увеличивается интенсивность отказов λ и уменьшается вероятность безотказной работы ТЭУ.

С ростом термоэлектрической мощности охлаждения γ_1 и γ_2 в каскадах увеличивается холодопроизводительность Q_0 , либо уменьшается количество термоэлементов n_1 и n_2 , что приводит к уменьшению интенсивности отказов λ и увеличению вероятности безотказной работы P .

Данные расчетов позволяют выбрать вариант сочетания параметров исходного материала с повышенной электропроводностью для обеспечения повышения показателей надежности ТЭУ, т. е. уменьшения интенсивности отказов λ и увеличения вероятности безотказной работы P .

Литература

1. Рынок термоэлектрических модулей. Аналитический обзор [Электронный ресурс] / М.: РосБизнесКонсалтинг, 2009. – 92 с. – Режим доступа: <http://marketing.rbc.ru>
2. DiSalvo, F. J. Thermoelectric Cooling and Power Generation [Text] / F. J. DiSalvo // Science. – 1999. – Vol. 285, Issue 5428. – P. 703–706. doi: 10.1126/science.285.5428.703
3. Bell, L. E. Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems [Text] / L. E. Bell // Science. – 2008. – Vol. 321, Issue 5895. – P. 1457–1461. doi: 10.1126/science.1158899
4. Zebajadi, M. Perspectives on thermoelectrics: from fundamentals to device applications [Text] / M. Zebajadi, K. Esfarjani, M. S. Dresselhaus, Z. F. Ren, G. Chen // Energy & Environmental Science. – 2012. – Vol. 5, Issue 1. – P. 5147–5162. doi: 10.1039/c1ee02497c
5. Sootsman, J. R. New and Old Concepts in Thermoelectric Materials [Text] / J. R. Sootsman, D. Y. Chung, M. G. Kanatzidis // Angewandte Chemie International Edition. – 2009. – Vol. 48, Issue 46. – P. 8616–8639. doi: 10.1002/anie.200900598
6. Шевелев, А. В. Наноструктурированные термоэлектрические материалы. [Текст] / А. В. Шевелев. – М.: Научно-образовательный центр по нанотехнологиям МГУ им. М.В. Ломоносова, 2010. – 58 с.
7. Кожемякин, Г. Н. Наноструктурированные теллуриды висмута и сурьмы для термоэлектрического теплового насоса [Текст] / Г. Н. Кожемякин, С. Я. Скипидаров, Ю. М. Крутов, А. Н. Паращенко, О. Н. Иванов, О. Н. Соклакова // Термоэлектричество. – 2014. – № 1. – С. 37–47.
8. Brown, S. R. Yb₁₄MnSb₁₁: New High Efficiency Thermoelectric Material for Power Generation [Text] / S. R. Brown, S. M. Kauzlarich, F. Gascoin, G. J. Snyder // Chemistry of Materials. – 2006. – Vol. 18, Issue 7. – P. 1873–1877. doi: 10.1021/cm060261t
9. Wereszczak, A. A. Thermoelectric Mechanical Reliability [Text] / A. A. Wereszczak, H. Wang // Vehicle Technologies Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting. – Arlington, 2011. – P. 18.
10. Iversen, B. V. Why are clathrates good candidates for thermoelectric materials [Text] / B. V. Iversen, A. E. Palmqvist, D. E. Cox, G. S. Nolas, G. D. Stucky, N. P. Blake, H. Metiu // Journal of Solid State Chemistry. – 2000. – Vol. 149, Issue 2. – P. 455–458. doi: 10.1006/jssc.1999.8534
11. Нестеров, С. Б. Оценка возможности увеличения термоэлектрической добротности наноструктурированных полупроводниковых материалов для холодильной техники [Текст] / С. Б. Нестеров, А. И. Холопкин // Холодильная техника. – 2014. – № 5. – С. 40–43.
12. Singh, R. Experimental Characterization of Thin Film Thermoelectric Materials and Film Deposition VIA Molecular Beam Epitaxy [Text] / R. Singh. – University of California, 2008. – 54 p.
13. Громов, Г. Объемные или тонкопленочные термоэлектрические модули [Текст] / Г. Громов // Компоненты и технологии. – 2014. – № 9. – С. 38–43.

14. Riffat, S. R. Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems [Text] / S. B. Riffat, M. Xiaoli // International journal of energy research. – 2004. – Vol. 28, Issue 9. – P. 78–85. doi: 10.1002/er.991
15. Jurgensmeyer, A. L. High Efficiency Thermoelectric Devices Fabricated Using Quantum Well Confinement Techniques [Text] / A. L. Jurgensmeyer. – Colorado State University, 2011. – 54 p.
16. Лау, П. С. Оценка надежности термоэлектрических холодильников [Текст] / П. С. Лау, Нэйджи М. Дж. // Термическое оборудование. Технология. – 2004. – Вып. 1. – С. 43–46.
17. Зайков, В. П. Влияние термоэлектрической эффективности исходных материалов на показатели надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Часть 1: Однокаскадные ТЭУ [Текст] / В. П. Зайков, В. И. Мещеряков, А. А. Гнатовская, Ю. И. Журавлев // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2015. – № 1. – С. 44–48.
18. Зайков, В. П. Охлаждаемые возможности термоэлектрических устройств в широком диапазоне изменения температур [Текст] / В. П. Зайков, Л. А. Киншова, В. И. Ефремов // Тепловые режимы и охлаждение РЭА. – 2005. – Вып. 1. – С. 53–59.
19. Зайков, В. П. Влияние тепловой нагрузки на показатели надежности двухкаскадных термоэлектрических охлаждающих устройств [Текст] / В. П. Зайков, В. И. Мещеряков, А. А. Гнатовская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 4, № 9 (52). – С. 34–38. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/1477/1375>
20. Зайков, В. П. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Кн.1 Однокаскадные устройства [Текст] / В. П. Зайков, Л. А. Киншова, В. Ф. Моисеев. – Одесса: Политехперіодика, 2009. – 108 с.

Створена комп'ютерна модель, яка дає можливість досліджувати роботу печі для обробки матеріалу заданого фракційного складу.

Досліджено роботу апарату з різними граничними умовами. Визначено траєкторію частинок в робочій зоні і час їхнього перебування в апараті, а також гідродинамічну структуру потоку. Отримані результати можуть бути використані для моделювання ефективності реакційних процесів, оптимізації конструкції печі та режимів її роботи

Ключові слова: чисельне моделювання, циклонна піч-декарбонізатор, розподіл частинок, потік газ-частинки, час перебування частинок

Создана компьютерная модель, которая дает возможность исследовать работу печи для обработки материала заданного фракционного состава.

Исследована работа аппарата с различными граничными условиями. Определена траектория частиц в рабочей зоне и время их пребывания в аппарате, а также гидродинамическая структура потока. Полученные результаты могут быть использованы для моделирования эффективности реакционных процессов, оптимизации конструкции печи и режимов ее работы

Ключевые слова: численное моделирование, циклоническая печь-декарбонизатор, распределение частиц, поток газ-частицы, время пребывания частиц

УДК 66.041: 666.90

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.44168

DEVELOPMENT OF A NUMERICAL MODEL FOR GAS-SOLID FLOW IN THE INDUSTRIAL CYCLONE-CALCINER FURNACE

R. Havryliv

Candidate of technical science,
Associate Professor*

E-mail: havrilivroman@gmail.com

V. Maistruk

Candidate of technical science,
Associate Professor**

E-mail: vmaistruk@gmail.com

V. Biliak *

E-mail: zumalet01993@gmail.com

*Department of Chemical Engineering
Institute of Chemistry and
Chemical Technology***

**Department of Electronic Engineering
Institute of Engineering
Mechanics and Transport***

***National University "Lviv Polytechnic"
st. S. Bandera, 12, Lviv, Ukraine, 79000

1. Introduction

At this time one of the most promising directions of lime production is modernizing production using cyclone furnace

for annealing finely dispersed limestone. This technology can significantly increase the production of a product, improve quality, reduce emissions of flue gases into the environment [1, 2].