

Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 8. С. 353–362
Thermal processes in engineering, 2025, vol. 17, no. 8, pp. 353–362

Научная статья

УДК 621.36

URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186015>

EDN: <https://www.elibrary.ru/YFSYAW>

Экспериментальное исследование энергетических характеристик термоэлектрических модулей для охлаждения оптоэлектронных устройств

Д.В. Воробьев^{1✉}, П.Г. Макаров²

^{1,2}Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация

¹vorobyevdv@mpei.ru✉

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального исследования энергетических характеристик термоэлектрических модулей с различной максимальной холодопроизводительностью, материалами и толщинами керамических подложек. Определяется холодильный коэффициент в зависимости от тепловой нагрузки и температурных режимов работы модулей. Исследовано влияние теплопроводности и толщины керамических подложек из Al_2O_3 и AlN на эффективность работы модулей при охлаждении. Проведено сравнение модулей с целью выбора оптимального варианта для различных условий эксплуатации. Полученные данные позволили сформулировать рекомендации по подбору термоэлектрических модулей с наилучшим соотношением производительности и энергопотребления.

Ключевые слова: эффект Пельтье, элемент Пельтье, термоэлектрический модуль, холодильный коэффициент, тепловое сопротивление

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00840).

Для цитирования. Воробьев Д.В., Макаров П.Г. Экспериментальное исследование энергетических характеристик термоэлектрических модулей для охлаждения оптоэлектронных устройств // Тепловые процессы в технике. 2025. Т. 17. № 8. С. 353–362. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186015>

Original article

Experimental study of the energy characteristics of thermoelectric modules for optoelectronic device cooling

D.V. Vorobyev^{1✉}, P.G. Makarov²

^{1,2}National Research University “MPEI”, Moscow, Russian Federation

¹vorobyevdv@mpei.ru✉

Abstract. This paper presents the results of an experimental study of the energy characteristics of thermoelectric modules (TEMs) with different maximum cooling capacities ($Q_{\max}$) and various ceramic substrate configurations. The research focuses on evaluating the coefficient of performance (COP) of TEMs under various operating conditions and thermal loads, which are critical for thermal stabilization of optoelectronic devices. The influence of ceramic substrate material (Al_2O_3 and AlN) and its thickness on the thermal resistance and energy efficiency of the modules is investigated.

The first part of the study examines the dependence of COP on the temperature difference across the TEM (ΔT) at a fixed thermal load. It is shown that modules with a higher $Q_{\max}$ demonstrate greater COP at small ΔT due to lower operating currents and, consequently, lower Joule losses. However, as the temperature difference increases, the COP of these modules decreases due to rising conductive and Joule losses. In contrast, TEMs with lower $Q_{\max}$ operate more efficiently at higher ΔT values, where their working point approaches optimal load conditions. Therefore, selecting a TEM whose $Q_c/Q_{\max}$ ratio matches the intended ΔT is crucial for maximizing COP.

In the second part of the study, the COP was evaluated as a function of the applied thermal load at a fixed ΔT . It was found that TEMs with lower $Q_{\max}$ have higher COP at low heat loads but cannot maintain performance at high loads due to thermal saturation. Conversely, modules with higher $Q_{\max}$ maintain cooling capacity at larger thermal loads, albeit with reduced COP.

Further experiments focused on the impact of the ceramic substrates. Thermoelectric modules using thin AlN ceramic plates, characterized by high thermal conductivity, exhibited the best COP values and stable operation across a wide range of ΔT and heat loads. Modules with thick Al_2O_3 substrates showed significantly higher thermal resistance, resulting in lower COP and, in some cases, inability to maintain the desired cooling performance.

The study highlights that optimal COP can be achieved only through comprehensive optimization of $Q_{\max}$ selection, ceramic substrate design, and operating conditions. The results form the basis for practical recommendations for selecting TEMs in optoelectronic cooling systems, where compactness, thermal stability, and energy efficiency are critical.

Keywords: Peltier effect, Peltier element, thermoelectric module, coefficient of performance, thermal resistance

Funding. The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 23-19-00840)

For citation. Vorobyev D.V., Makarov P.G. Experimental study of the energy characteristics of thermoelectric modules for optoelectronic device cooling. *Thermal processes in engineering*. 2025, vol. 17, no. 8, pp. 353–362. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=186015>

Введение

Оптоэлектронные устройства – такие как лазерные диоды, ИК- и ПЗС-детекторы, а также высокочувствительные фотоприемники – кри-

тически зависят от стабильности температуры их рабочих элементов. Температурные колебания вызывают дрейф длины волны излучения, повышение уровня шумов, снижение квантовой

эффективности и ускоряют деградацию активных элементов [1, 2]. В условиях миниатюризации и автономности оптических и сенсорных систем становится невозможным использование традиционных методов охлаждения, таких как жидкостное или воздушное охлаждение, особенно в компактных приборах. В таких условиях термоэлектрические модули (ТЭМ), основанные на эффекте Пельтье, становятся оптимальным решением благодаря своей компактности, бесшумной работе и способности к точному температурному контролю без подвижных частей [3].

Тем не менее, ТЭМ имеют сравнительно низкий холодильный коэффициент (COP) по сравнению с компрессорными холодильными системами. Эффективность работы ТЭМ зависит от соответствия параметров модуля конкретным условиям эксплуатации: температуры окружающей среды, характеристик теплоотвода, величины тепловой нагрузки и требуемого диапазона температур на холодной стороне [4, 5]. Особенно актуальна оптимизация для систем, работающих в широком диапазоне температур от -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$, характерного для промышленных и военных применений оптоэлектроники [6].

Одним из ключевых факторов, влияющих на эффективность термоэлектрических модулей, является тепловое сопротивление керамических подложек, через которые осуществляется теплообмен между термоэлектрическими элементами и внешними теплообменниками. Подложки выполняют двойную функцию: обеспечивают электрическую изоляцию и служат теплопроводящим интерфейсом, что требует выбора материалов с высокой теплопроводностью при сохранении механической прочности и изоляционных свойств [7].

В ряде работ показано, что традиционная керамика Al_2O_3 , несмотря на ее широкое распространение и доступность, обладает относительно низкой теплопроводностью ($25\text{--}30\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), что ограничивает ее применение в высокоэффективных термоэлектрических системах [1, 5]. Альтернативой является нитрид алюминия (AlN) с теплопроводностью до $170\text{--}180\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, позволяющий значительно снизить тепловое сопротивление подложек и повысить COP модулей [8]. Исследования показывают, что замена Al_2O_3 на AlN позволяет уменьшить тепловое сопротивление в 5–7 раз и повысить энергоэффективность модулей при значительных тепловых нагрузках.

Аналогичные выводы подтверждаются в патентных и экспериментальных работах, где показано, что снижение теплового сопротивления подложек за счет выбора материалов с высокой теплопроводностью обеспечивает рост COP и улучшает тепловой баланс в системах охлаждения оптоэлектронных компонентов. При этом такие материалы, как оксид бериллия (BeO) и нитрид кремния (Si_3N_4), демонстрируют высокую теплопроводность, но ограниченно применяются из-за токсичности или сложности обработки.

Таким образом, оптимизация конструкции ТЭМ с точки зрения тепловых характеристик керамических подложек является важной задачей для повышения энергоэффективности оптоэлектронных систем в сложных температурных условиях эксплуатации.

Несмотря на наличие теоретических и модельных исследований, посвященных влиянию теплопроводности подложек на тепловое сопротивление термоэлектрических модулей, вопросы их фактической энергетической эффективности при реальных нагрузках и перепадах температур остаются недостаточно изученными. Большинство существующих работ ограничиваются расчетами тепловых потерь через подложки без экспериментальной проверки влияния этих факторов на COP ТЭМ в различных режимах работы. Настоящая работа восполняет этот пробел, представляя экспериментальное сравнение COP ТЭМ с различной холодопроизводительностью Q_{max} , материалами и толщинами керамических подложек. Проведенное исследование позволяет более точно учитывать влияние конструктивных параметров ТЭМ при выборе оптимального модуля для систем охлаждения оптоэлектронных устройств, работающих в широком диапазоне температурных и нагрузочных режимов.

Математическая модель и уравнение теплового баланса

Рабочие характеристики ТЭМ описываются уравнением теплового баланса холодной стороны:

$$Q_c = \alpha \times I \times T_c - \frac{I^2 \times R}{2} - K \times (T_h - T_c), \quad (1)$$

где: Q_c – отводимая мощность (Вт); α – эффективный термоэлектрический коэффициент Зее-

бека (В/К); I – электрический ток (А); R – внутреннее сопротивление (Ом); K – теплопроводность ветвей (Вт/м×К); T_c , T_h – температуры холодной и горячей сторон термопар ТЭМ соответственно (К) [7].

Тепловой поток на горячей стороне ТЭМ Q_h описывается уравнением теплового баланса в соответствии с формулой (2):

$$Q_h = \alpha \times I \times T_h + \frac{P \times R}{2} - K \times (T_h - T_c). \quad (2)$$

Холодильный коэффициент COP – ключевой параметр, показывающий эффективность ТЭМ:

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{P} = \frac{\alpha \times I \times T_h - \frac{P \times R}{2} + K \times (T_h - T_c)}{P \times R + \alpha \times I \times (T_h - T_c)}. \quad (3)$$

Для оценки рабочих параметров ТЭМ в режиме охлаждения при заданных граничных условиях необходимо использовать математическую модель, учитывающую тепловые сопротивления как со стороны теплоотвода, так и со стороны охлаждаемого объекта. В таком случае температуры термопар T_h и T_c должны учитывать тепловые сопротивления в соответствии с формулами (4) и (5).

$$T_h = T_{h1} + Q_h \times R_{th}, \quad (4)$$

$$T_c = T_{c1} - Q_c \times R_{tc}, \quad (5)$$

где: T_{c1} , T_{h1} – температуры на внешних, холодной и горячей, сторонах ТЭМ, R_{tc} – тепловое сопротивление на холодной стороне ТЭМ, R_{th} – тепловое сопротивление на горячей стороне ТЭМ.

На рисунке 1 представлена схема тепловых потоков в паре ветвей ТЭМ с учетом тепловых сопротивлений теплопереходов.

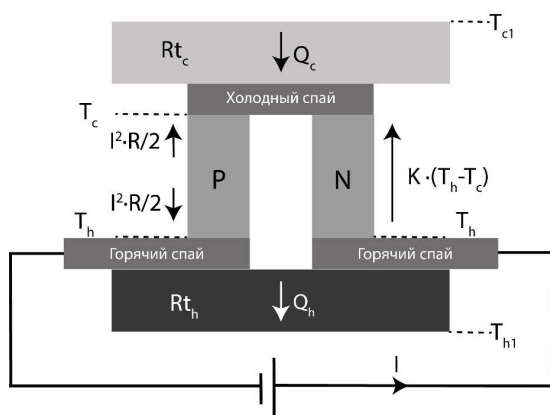


Рис. 1. Схема тепловых потоков в ТЭМ

Формулы (4) и (5) демонстрируют влияние теплового сопротивления теплопереходов, на распределение температур в конструкции ТЭМ. Как видно, реальная температура термопар отличается от температуры на внешних сторонах ТЭМ.

Из приведенных соотношений видно, что выбор ТЭМ должен учитывать не только требуемую холодопроизводительность, но и минимизацию потребляемой мощности с учетом тепловых сопротивлений. Оптимизация COP становится особенно важной при ограниченном теплоотводе, характерном для встроенных оптоэлектронных решений.

Методика и экспериментальная установка

Целью настоящего исследования является определение и сравнение COP ТЭМ с различной величиной максимальной холодопроизводительности $Q_{\max}$, а также ТЭМ с различными материалами и толщинами теплопереходов в условиях варьируемых температур горячей стороны. Измеряются электрическая мощность ТЭМ, отводимая мощность Q_c , температура горячей и холодной сторон, а также вычисляется COP. Особое внимание уделяется оценке эффективности работы ТЭМ в условиях, приближенных к реальному использованию в оптоэлектронных системах, а именно в условиях работы на воздухе при температуре горячей стороны в диапазоне от 25 °С до 85 °С, что характерно для оптоэлектронных устройств.

На рисунке 2 представлена структурная схема установки, включающая:

- исследуемый ТЭМ, устанавливаемый на медное основание с помощью припайки;
- нагреватель Q_c , имитирующий тепловую нагрузку на холодной стороне исследуемого ТЭМ;
- система термостабилизации с регулируемой температурой, включающая в себя, ТЭМ основания, медное основание и радиатор;
- датчики температуры (Pt100) на холодной стороне исследуемого ТЭМ и на медном основании под исследуемым ТЭМ;
- контроллер ТЭМ;
- блок управления тепловой нагрузкой;
- персональный компьютер.

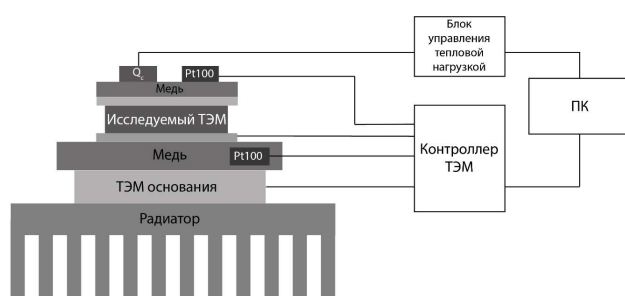


Рис. 2. Схема установки для исследования ТЭМ

Подводимая к холодной стороне ТЭМ мощность нагревателя Q_c равномерно распределяется по медной пластине и подводится к холодной стороне ТЭМ. Потребляемая мощность исследуемого ТЭМ, а также температуры на сторонах исследуемого ТЭМ задаются и определяются контроллером ТЭМ. По формуле (3) рассчитывается COP. Все результаты записывались в стационарном режиме после установления температурного равновесия. Флуктуации температуры на сторонах ТЭМ в стационарном режиме не превышали $0,005^\circ\text{C}$.

Результаты и анализ

Для комплексной оценки энергетических характеристик ТЭМ были проведены четыре экспериментальных серии, направленных на изучение влияния конструктивных параметров и режимов работы на COP. В первых двух сериях экспериментов исследовались модули с различной величиной максимальной холодопроизводительности. Были определены зависимости COP от перепада температур при фиксированной тепловой нагрузке, а также от величины тепловой нагрузки при фиксированном температурном перепаде. В двух последующих сериях экспериментов изучалось влияние материалов (Al_2O_3 и AlN) и толщин керамических подложек на эффективность работы ТЭМ. Анализировались зависимости COP от толщины и материала подложек при фиксированной тепловой нагрузке, а также от величины тепловой нагрузки при фиксированном перепаде температур. Такой подход позволил всесторонне оценить влияние ключевых параметров конструкции ТЭМ и условий эксплуатации на их энергетическую эффективность.

Определение COP в зависимости от перепада температур при фиксированной тепловой нагрузке

В эксперименте использовались модули с разной величиной Q_{max} в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1. Образцы ТЭМ с разной величиной Q_{max}

Образец	ТЭМ А	ТЭМ В	ТЭМ С	ТЭМ D
Q_{max} , Вт (300К, вакуум)	7,1	5,3	4,2	3,2

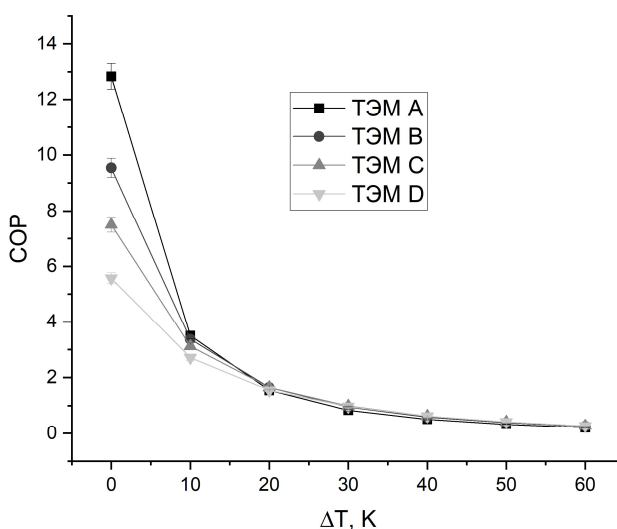
Эксперименты проводились при следующих условиях:

- температура горячей стороны ТЭМ: от 25°C до 85°C с шагом 10°C ;
- температура холодной стороны ТЭМ: 25°C ;
- подводимая тепловая нагрузка на холодную сторону Q_c : 1,0 Вт.

В таблице 2 и на рисунке 3 представлены результаты определения COP ТЭМ при фиксированной тепловой нагрузке Q_c 1 Вт в зависимости от перепада температур ΔT на сторонах ТЭМ.

Таблица 2. Зависимость COP ТЭМ с разной Q_{max} в зависимости от ΔT при фиксированной Q_c

ΔT , К	COP			
	ТЭМ А	ТЭМ В	ТЭМ С	ТЭМ D
0	12,83	9,54	7,50	5,57
10	3,50	3,37	3,12	2,71
20	1,55	1,65	1,65	1,55
30	0,84	0,95	0,99	0,97
40	0,51	0,59	0,63	0,63
50	0,33	0,39	0,42	0,42
60	0,21	0,26	0,27	0,27

Рис. 3. Зависимость COP от перепада температур при фиксированной Q_c

Как видно из таблицы 2 и рисунка 3 модули с разной $Q_{\max}$ при фиксированной тепловой нагрузке имеют разный COP в зависимости от ΔT . При перепаде температур на сторонах ТЭМ от 0 до 20 К ТЭМ с наибольшей $Q_{\max}$ (ТЭМ А и ТЭМ В) имеют более высокий холодильный коэффициент. При возрастании ΔT на сторонах ТЭМ, COP модулей с наименьшей $Q_{\max}$ (ТЭМ С, ТЭМ D) становится выше по сравнению с модулями с большей холодопроизводительностью (ТЭМ А, ТЭМ В).

Это объясняется тем, что ТЭМ с высокой $Q_{\max}$ работают в пределах своей оптимальной производительности, обеспечивая нужный Q_c при меньшей величине силы тока, а значит и меньших потерях на джоулевом нагреве. При больших величинах перепада температур, у модулей с большей $Q_{\max}$ начинают возрастать джоулевые потери и обратная теплопроводность вдоль ветвей ТЭМ.

Определение COP в зависимости от тепловой нагрузки при фиксированном перепаде температур

В эксперименте использовались модули с разной величиной $Q_{\max}$ в соответствии с таблицей 1.

Эксперименты проводились при следующих условиях:

- температура горячей стороны ТЭМ: 85 °С;
- температура холодной стороны ТЭМ: 25 °С;
- подводимая тепловая нагрузка на холодную сторону ТЭМ: 0,25 ... 2,25 Вт с шагом 0,25 Вт.

В таблице 3 и на рисунке 4 представлены результаты определения COP ТЭМ при фиксированном ΔT на сторонах ТЭМ в зависимости от величины тепловой нагрузки Q_c .

Таблица 3. COP ТЭМ при фиксированном ΔT и разной величине Q_c

Q_c , Вт	COP			
	ТЭМ А	ТЭМ В	ТЭМ С	ТЭМ D
0,25	0,08	0,11	0,13	0,16
0,50	0,14	0,18	0,21	0,25
0,75	0,18	0,23	0,26	0,28
1,00	0,21	0,26	0,27	0,27
1,25	0,23	0,27	0,27	0,22
1,50	0,24	0,26	0,24	
1,75	0,25	0,24		
2,00	0,24			
2,25	0,22			

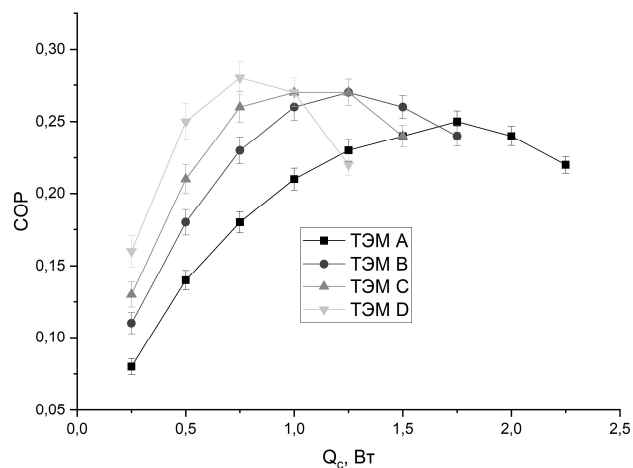


Рис. 4. Зависимость COP ТЭМ от величины тепловой нагрузки при фиксированном перепаде температур

При фиксированном ΔT наблюдается, что ТЭМ с меньшей $Q_{\max}$ демонстрируют более высокий COP при малых тепловых нагрузках. Это объясняется тем, что такие ТЭМ оптимизированы на работу вблизи своего номинального режима, при котором потери на джоулевом нагреве минимальны, а эффективность термоэлектрического преобразования максимальна. ТЭМ с меньшим $Q_{\max}$ обладают меньшими внутренними потерями на единицу отводимого тепла при малых нагрузках. Однако с ростом тепловой нагрузки, особенно в диапазоне 1,0 Вт и выше, такие ТЭМ начинают выходить за пределы своей оптимальной холодопроизводительности. В результате требуется увеличение тока для обеспечения необходимого Q_c , что ведет к резкому росту джоулевых потерь и снижению COP.

ТЭМ с большим $Q_{\max}$, напротив, имеют запас по холодопроизводительности и лучше справляются с высокими тепловыми нагрузками, хотя при малых Q_c они работают в неэффективном режиме — потребляют избыточную мощность и имеют более низкий COP.

Определение COP при различных материалах и толщинах подложек при фиксированной тепловой нагрузке

В эксперименте использовались модули с близкой величиной $Q_{\max}$ (соответствует ТЭМ А из первых экспериментов — 7,1 Вт при 300 К), но с различными вариантами материалов и толщин теплопереходов — керамических подложек. Верхний и нижний теплопереход образцов ТЭМ идентичны друг другу.

Таблица 4. Образцы ТЭМ с различными материалами и толщинами теплопереходов

Образец	ТЭМ Е	ТЭМ F	ТЭМ G	ТЭМ H	ТЭМ I	ТЭМ J
Материал теплопереходов	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	AlN	AlN	AlN
Толщина теплопереходов, мм	1,0	0,5	0,25	1,0	0,5	0,25

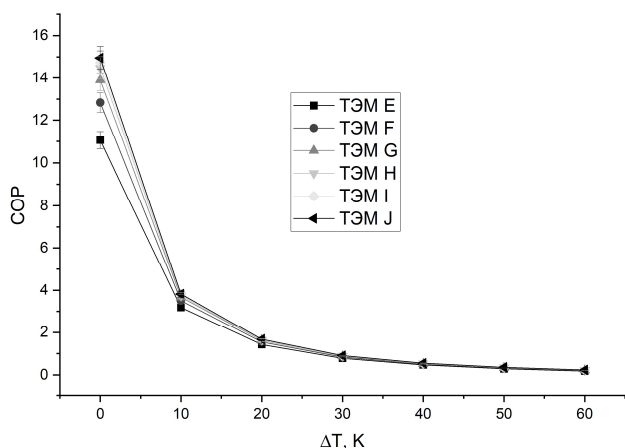
Эксперименты проводились при следующих условиях:

- температура горячей стороны: от +25 °С до +85 °С;
- температура холодной стороны ТЭМ: 25 °С;
- подводимая тепловая нагрузка на холодную сторону: 1,0 Вт.

В таблице 5 и на рисунке 5 представлены результаты определения COP ТЭМ при фиксированной тепловой нагрузке 1 Вт в зависимости от перепада температур на сторонах ТЭМ.

Таблица 5. Зависимость COP от ΔT при фиксированной Q_c

ΔT , К	COP					
	ТЭМ Е	ТЭМ F	ТЭМ G	ТЭМ H	ТЭМ I	ТЭМ J
0	11,06	12,83	13,90	14,48	14,74	14,95
10	3,18	3,5	3,67	3,74	3,8	3,82
20	1,43	1,55	1,62	1,64	1,66	1,68
30	0,78	0,84	0,88	0,89	0,90	0,91
40	0,47	0,51	0,53	0,54	0,55	0,55
50	0,29	0,33	0,34	0,35	0,35	0,36
60	0,18	0,21	0,23	0,23	0,24	0,24

Рис. 5. Зависимость COP ТЭМ с разными материалами и толщинами керамических плат от ΔT для фиксированной тепловой нагрузки

При сравнении ТЭМ с близкой $Q_{\max}$, но с разными материалами и толщинами теплоперехо-

дов, эксперимент показал, что при фиксированной тепловой нагрузке и увеличении ΔT от 0 до 60 °С, модули с меньшей толщиной керамики и с большей теплопроводностью обеспечивали более высокий COP. Наибольший COP наблюдался у модулей с тонкими подложками из нитрида алюминия толщиной 0,25 мм, а наименьший – у модулей с толстыми подложками из оксида алюминия толщиной 1,0 мм.

Керамические подложки создают дополнительное тепловое сопротивление между рабочими поверхностями ТЭМ. При большей толщине и меньшей теплопроводности, тепловое сопротивление значительно возрастает.

AlN обладает более высокой теплопроводностью по сравнению с Al₂O₃, что делает его более эффективным в отводе тепла даже при одинаковой толщине. В сочетании с малой толщиной подложки это резко снижает тепловое сопротивление и повышает эффективность ТЭМ.

Определение COP при различных величинах тепловой нагрузки при фиксированном перепаде температур

В эксперименте использовались модули в соответствии с таблицей 4.

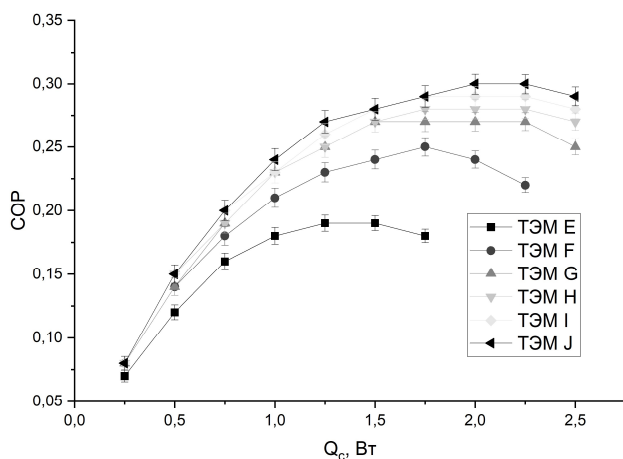
Эксперименты проводились при следующих условиях:

- температура горячей стороны: 85 °С;
- температура холодной стороны ТЭМ: 25 °С;
- подводимая тепловая нагрузка на холодную сторону: 0,25 ... 2,5 Вт с шагом 0,25 Вт.

В таблице 6 и на рисунке 6 представлены результаты определения COP модулей с разными материалами и толщинами керамических плат при различной величине тепловой нагрузки и при фиксированном ΔT .

Таблица 6. Зависимость COP от величины тепловой нагрузки

Q_c , Вт	ТЭМ Е	ТЭМ F	ТЭМ G	ТЭМ H	ТЭМ I	ТЭМ J
0,25	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
0,50	0,12	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15
0,75	0,16	0,18	0,19	0,19	0,20	0,20
1,00	0,18	0,21	0,23	0,23	0,23	0,24
1,25	0,19	0,23	0,25	0,25	0,26	0,27
1,50	0,19	0,24	0,27	0,27	0,28	0,28
1,75	0,18	0,25	0,27	0,28	0,29	0,29
2,00		0,24	0,27	0,28	0,29	0,30
2,25		0,22	0,27	0,28	0,29	0,30
2,50			0,25	0,27	0,28	0,29

Рис. 6. Зависимость COP от величины Q_c при фиксированном ΔT

Результаты показали, что ТЭМ с подложками из AlN толщиной 0,25 мм продемонстрировали наивысший COP во всем диапазоне тепловых нагрузок. В то время как ТЭМ с толстыми подложками из Al_2O_3 показали наименьшую эффективность и при увеличении Q_c не смогли достичь требуемого ΔT на сторонах ТЭМ для всех величины тепловых нагрузок.

Переход от подложек Al_2O_3 с толщиной 1 мм к AlN толщиной 0,25 мм позволяет повысить COP с 0,18 до 0,29 при тепловой нагрузке 1,75 Вт, что соответствует росту на 61 %.

В условиях высокой Q_c и высокого теплового сопротивления теплопереходов, увеличивается температура на спаях термопар, растут джоулевые потери. Это дополнительно снижает COP.

Благодаря высокой теплопроводности и малой толщине, подложки из AlN эффективно передают тепло с охлаждаемого объекта к термопарам. Это позволяет ТЭМ работать в оптимальном режиме даже при высоких Q_c , сохраняя высокое значение COP.

Ограничения по Q_c связаны не с термопарами, а с подложками: так как величина Q_{max} ТЭМ примерно одинакова, различие в результатах обусловлено исключительно эффективностью теплоотвода через теплопереходы.

Оценка погрешностей измерений

Погрешность определения COP рассчитывалась в соответствии с правилами расчета погрешностей для косвенных измерений. Тепловая нагрузка создавалась резистором 10 Ом и задавалась источником питания SPE3102 OWON, погрешность установки тока и напряжения ко-

торого составляет $\pm(0,1 \% + 10 \text{ мА})$ и $\pm(0,1 \% + 20 \text{ мВ})$ соответственно. Потребляемая мощность модуля Пельтье измерялась контроллером Meerstetter TEC-1091 с паспортной точностью измерения тока и напряжения 1 %.

Расчетная относительная погрешность определения мощности модуля Пельтье P составила $\approx 1,41 \%$. Погрешность задания тепловой нагрузки δQ_c варьировалась от 6,6 % до 2,3 % в исследованном диапазоне мощностей. Итоговая погрешность определения COP для каждой экспериментальной точки рассчитывалась по формуле (6):

$$\delta \text{COP} = \sqrt{\delta Q_c^2 + 0,0141^2}. \quad (6)$$

Результаты расчета погрешностей сведены в таблицу 7.

Таблица 7. Погрешность определения COP модулей в диапазоне тепловой нагрузки от 0,25 Вт до 2,5 Вт

Q_c , Вт	I , А	U , В	δQ_c , %	δP , %	δCOP , %
0,25	0,158	1,581	6,58	1,41	6,73
0,50	0,224	2,236	4,65	1,41	4,86
0,75	0,274	2,739	3,82	1,41	4,07
1,00	0,316	3,162	3,33	1,41	3,62
1,25	0,354	3,536	2,98	1,41	3,30
1,50	0,387	3,873	2,73	1,41	3,08
1,75	0,418	4,183	2,54	1,41	2,91
2,00	0,447	4,472	2,38	1,41	2,77
2,25	0,474	4,743	2,25	1,41	2,66
2,50	0,500	5,000	2,14	1,41	2,56

Заключение и выводы

Полученные в ходе экспериментов зависимости холодильного коэффициента от температуры и тепловой нагрузки демонстрируют закономерности, согласующиеся с рядом опубликованных работ [2, 5, 7]. В частности, подтверждено, что модули с большей холодопроизводительностью демонстрируют более высокий COP при малом температурном перепаде [2, 5], однако при росте ΔT преимущество переходит к модулям с меньшим Q_{max} , что ранее в явном виде не обсуждалось в литературе. Это наблюдение дополняет теоретические выкладки, представленные в [4, 7], и подтверждает необходимость индивидуального подбора ТЭМ под конкретный тепловой режим.

Кроме того, влияние теплового сопротивления керамических подложек на энергетическую эффективность ТЭМ согласуется с результатами работ [1, 8], однако в данной работе впервые представлено сравнение COP в зависимости от толщины и материала подложки при идентичных электрических параметрах модулей, что позволяет более точно оценивать влияние подложек на производительность.

Эффективность ТЭМ, выражаемая через холодильный коэффициент COP, существенно зависит не только от величины ΔT и величины отводимой тепловой мощности, но и от выбора модуля с соответствующей $Q_{\max}$, а также конструкции и материала керамических подложек. По результатам работы можно сделать следующие выводы для повышения холодильного коэффициента ТЭМ.

1. Оптимальный выбор $Q_{\max}$: при фиксированной тепловой нагрузке и переменном ΔT , ТЭМ с высокой $Q_{\max}$ обеспечивают лучший COP при малых ΔT за счет меньшего тока и, соответственно, меньших джоулевых потерь. Однако при увеличении перепада температур эффективность таких ТЭМ снижается. В противоположность им, ТЭМ с меньшей $Q_{\max}$ демонстрируют более высокий COP при больших ΔT , так как работают ближе к своей оптимальной нагрузке. Для максимального COP необходимо выбирать ТЭМ, у которого рабочая точка близка к оптимальной $Q_c/Q_{\max}$ при заданном ΔT .

2. Влияние Q_c при фиксированном перепаде температур: при постоянном ΔT и росте тепловой нагрузки, ТЭМ с меньшей $Q_{\max}$ демонстрируют более высокий COP только при малых значениях Q_c . Однако они быстро достигают предела своих возможностей и не справляются с высокой тепловой нагрузкой. Модули с большей $Q_{\max}$ обеспечивают отвод большей мощности, но их COP ниже. При высоких Q_c необходимо использовать модули с большим $Q_{\max}$, даже при потере COP, чтобы гарантировать работоспособность.

3. Материалы и толщина подложек: модули с керамическими подложками из нитрида алюминия AlN, обладающего высокой теплопроводностью, особенно в комбинации с малой толщиной, демонстрируют наивысшие значения COP и стабильную работу при высоких Q_c и ΔT . В то же время толстые подложки из Al_2O_3 суще-

ственно ухудшают теплосъем с холодной стороны, что приводит к перегреву, снижению COP и даже неспособности поддерживать заданную температуру. Минимизация теплового сопротивления подложек – критически важный параметр при проектировании ТЭМ, особенно при высоких плотностях теплового потока.

4. Комбинированный эффект всех факторов: оптимальный COP достигается только при совместной оптимизации параметров $Q_{\max}$, конструкции керамики и режима работы. Комплексная оптимизация ТЭМ должна учитывать согласование всех тепловых и электрических характеристик с условиями эксплуатации.

Таким образом, полученные экспериментальные данные подчеркивают, что подбор ТЭМ должен быть основан на системном анализе, включающем:

- учет теплового сопротивления на холодной и горячей сторонах;
- выбор модуля с оптимальной $Q_{\max}$;
- оценку COP во всем рабочем диапазоне ΔT и Q_c ;
- применение материалов и компоновок теплотехнических устройств для обеспечения минимальных тепловых потерь.

Список источников

1. Rowe DM. (Ed). Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. Boca Raton: CRC Press, 2006. 864 с.
2. Semenov V. et al. Thermal management of optoelectronic devices using thermoelectric modules // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2019. Vol. 9. № 1. pp. 132–140.
3. Laird Technologies. Thermoelectric application note: Thermal management using thermoelectrics // Laird Technologies. 2018. 14 p.
4. Lineykin S., Ben-Yaakov S. Modeling and analysis of thermoelectric modules // IEEE Transactions on Industry Applications. 2007. Vol. 43. № 2. pp. 505–512.
5. Ma Y. et al. Thermoelectric cooling for electronic devices: advances and outlook // Energy Reports. 2022. Vol. 8. pp. 4016–4032.
6. Артамонов А.В. Применение термоэлектрических модулей в бортовой аппаратуре // Сенсорные системы. 2020. № 4. С. 25–30.
7. Snyder G.J. Application of the compatibility factor to the design of segmented and cascaded thermoelectric generators // Applied Physics Letters. 2004. Vol. 84. № 13. pp. 2436–2438.
8. Riffat S.B., Ma X. Thermoelectrics: A review of present and potential applications // Applied Thermal Engineering. 2003. Vol. 23. № 8. pp. 913–935.

References

1. Rowe DM, ed. Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. Boca Raton: CRC Press; 2006. 864 p.
2. Semenov V, Ivanov A, Petrov I, et al. Thermal management of optoelectronic devices using thermoelectric modules. *IEEE Trans Compon Packag Manuf Technol.* 2019; 9(1):132–140.
3. Laird Technologies. Thermoelectric application note: Thermal management using thermoelectrics. Laird Technologies; 2018. 14 p.
4. Lineykin S, Ben-Yaakov S. Modeling and analysis of thermoelectric modules. *IEEE Trans Ind Appl.* 2007;43(2):505–512.
5. Ma Y, Li Z, Wang X, et al. Thermoelectric cooling for electronic devices: advances and outlook. *Energy Reports.* 2022;8:4016–4032.
6. Artamonov AV. [Application of thermoelectric modules in onboard equipment]. *Sensor Systems.* 2020;(4):25–30. Russian.
7. Snyder GJ. Application of the compatibility factor to the design of segmented and cascaded thermoelectric generators. *Appl Phys Lett.* 2004;84(13):2436–2438.
8. Riffat SB, Ma X. Thermoelectrics: a review of present and potential applications. *Appl Therm Eng.* 2003;23(8): 913–935.