

Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 1. С. 32–40  
Thermal processes in engineering, 2026, vol. 18, no. 1, pp. 32–40

Научная статья  
УДК 621.36  
URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187440>  
EDN: <https://www.elibrary.ru/OBSHOL>

## Экспериментальная оценка влияния теплопроводности керамических пластин на эффективность термоэлектрических модулей

Д.В. Воробьев<sup>1✉</sup>, П.Г. Макаров<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация

<sup>1</sup>[vorobyevdv@mpei.ru](mailto:vorobyevdv@mpei.ru)✉

**Аннотация.** В данной работе проведена экспериментальная оценка влияния теплофизических свойств керамических подложек из нитрида алюминия (AlN) и оксида алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) на эффективность термоэлектрических модулей (ТЭМ). В работе измерена реальная теплопроводность различных типов керамики с использованием стационарного метода коаксиальных цилиндров. Установлено, что теплопроводность исследованного нитрида алюминия составила  $88,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$ , что в два раза ниже теоретических справочных значений. Экспериментально доказано, что использование подложек из AlN вместо Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> позволяет существенно повысить холодильный коэффициент COP, особенно в режимах с высокой тепловой нагрузкой. В частности, при тепловой нагрузке 2,25 Вт рост эффективности составил 32%. Результаты подтверждают, что минимизация термического сопротивления интерфейсов являются критическим фактором для обеспечения работы ТЭМ при высоких плотностях теплового потока.

**Ключевые слова:** Теплопроводность, тепловое сопротивление термоэлектрический модуль, холодильный коэффициент, ТЭМ

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

**Для цитирования.** Воробьев Д.В., Макаров П.Г. Экспериментальная оценка влияния теплопроводности керамических пластин на эффективность термоэлектрических модулей // Тепловые процессы в технике. 2026. Т. 18. № 1. С. 32–40. URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187440>

Original article

## Experimental evaluation of the effect of ceramic plate thermal conductivity on the efficiency of thermoelectric modules

D.V. Vorobyev<sup>1</sup>✉, P.G. Makarov<sup>2</sup><sup>1,2</sup>National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russian Federation<sup>1</sup>vorobyevdv@mpei.ru✉

**Abstract.** This research presents a comprehensive experimental evaluation of the influence exerted by the thermophysical properties of ceramic substrates on the overall efficiency and operational stability of thermoelectric modules (TEMs). While the efficiency of TEMs is traditionally viewed through the lens of semiconductor material science and the dimensionless figure of merit ( $ZT$ ), this study highlights that the total system performance, expressed as the coefficient of performance (COP), is heavily dictated by the efficiency of heat transfer through the module's multilayered assembly. Ceramic plates, which provide essential electrical insulation, simultaneously act as "thermal insulators", creating parasitic thermal resistance between the semiconductor junctions and the heat exchange surfaces.

The study utilizes a steady-state coaxial cylinder method to measure the actual thermal conductivity of various ceramic materials, including alumina ( $Al_2O_3$ ) with 96 % and 99,7 % purity, and aluminum nitride (AlN). Experimental results revealed significant discrepancies between theoretical reference values and real-world performance. Specifically, the measured thermal conductivity of the investigated aluminum nitride was 88,5 W/(m×K), which is approximately twice as low as standard reference values (typically 170 W/(m×K)). This discrepancy is attributed to material porosity and surface defects. In contrast, 99,7 %  $Al_2O_3$  (Polikor) showed a conductivity of 32,3 W/(m×K), aligning well with reference data.

The experimental phase involved testing TEMs with identical geometries but different substrate materials under varying thermal loads and temperature differentials. It was demonstrated that using AlN substrates instead of standard 96 %  $Al_2O_3$  significantly enhances the COP, particularly in high-heat-flux regimes. For instance, under a heat load of 2,25 W, the AlN-based module achieved a 32 % increase in efficiency (improving COP from 0,22 to 0,29). Furthermore, the study found that high thermal resistance in  $Al_2O_3$  substrates leads to increased junction temperatures, causing additional Joule losses and premature thermal degradation. In extreme conditions, such as a 2,5 W load, the  $Al_2O_3$ -based module failed to maintain the required temperature gradient, whereas the AlN module remained stable. These findings confirm that minimizing the thermal resistance of interfaces and performing rigorous quality control of ceramic components are critical for designing high-performance thermoelectric systems for precision temperature control.

**Keywords:** thermal conductivity, thermal resistance, thermoelectric module, coefficient of performance, TEM

**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 evaluation of the effect of ceramic plate thermal conductivity on the efficiency of thermoelectric modules. *Thermal processes in engineering*. 2026, vol. 18, no. 1, pp. 32–40. (In Russ.). URL: <https://tptmai.ru/publications.php?ID=187440>

### Введение

Развитие систем прецизионного термостатирования и компактной автономной энергетики диктует жесткие требования к термоэлектриче

ским преобразователям энергии. Наибольшее влияние на эффективность работы термоэлектрических модулей (ТЭМ) оказывают полупроводниковые ветви, вектор оптимизации которых

направлен на повышение добротности ZT термоэлектрического материала. Однако общая эффективность системы, выражаемая холодильным коэффициентом COP, определяется не только параметрами полупроводниковой составляющей ТЭМ, но и эффективностью теплопереноса через многослойную структуру всего ТЭМ в сборе.

При рассмотрении топологии ТЭМ в качестве критического звена с точки зрения теплопереноса можно выделить керамические пластины, которые, обладая электроизолирующими свойствами, в то же самое время выступают в роли и тепловых изоляторов, создавая паразитное термическое сопротивление между непосредственно границами полупроводниковой области и поверхностями теплообмена. Таким образом, искомый градиент температур, задаваемый областью прикладного применения конкретного устройства, должен поддерживаться на внешних сторонах керамических пластин. Чем больше термическое сопротивление этих пластин (прямо пропорциональное толщине слоя и обратно пропорциональное теплопроводности материала), тем выше, в соответствии со вторым законом термодинамики, должен быть перепад температур по обе стороны полупроводниковых ветвей. Это в свою очередь вызывает рост джоулевых потерь и раннюю деградацию ТЭМ.

В данной статье рассматривается влияние теплофизических свойств керамических пластин, выполненных из различных материалов – оксида алюминия  $Al_2O_3$  и нитрида алюминия AlN на итоговую эффективность ТЭМ. Описаны результаты экспериментального измерения теплопроводности пластин и результирующего холодильного коэффициента COP.

В идеальной модели эффективность ТЭМ является в первую очередь задачей материаловедения полупроводников. Однако в реальных устройствах не менее важную роль играет и инженерный подход к конструкции тепловых интерфейсов. Оценка системного COP требует комплексного подхода, где одним из обязательных условий высокой эксплуатационной эффективности является правильный выбор теплопроводной керамики.

В работе [1] среди прочих способов интенсификации эффективности ТЭМ отмечается необходимость оптимизирования эффективности системы теплоотвода от полупроводниковой обла-

сти. В частности, меньшая разница температур между горячей и холодной сторонами термоэлектрической системы охлаждения, характерная для более эффективных систем, приводит к увеличению холодопроизводительности.

Уменьшения разницы температур между внутренними и внешними участками ТЭМ можно добиться, уменьшив тепловое сопротивление керамических пластин благодаря правильному подбору материала. В работе [2] исследовано влияние четырех ключевых типов керамических подложек на характеристики ТЭМ: оксид алюминия ( $Al_2O_3$ ), нитрид алюминия (AlN), оксид магния (MgO) и карбид кремния (SiC). Авторы показали, что свойства материалов, особенно теплопроводность и электрическая изоляция, играют решающую роль в оптимизации характеристик ТЭМ. Наиболее эффективным материалом оказался нитрид алюминия, пластины из которого показали почти оптимальную производительность при меньшей длине полупроводниковых ветвей и меньшей толщине керамической подложки. Близкие результаты показали подложки из карбида кремния. В частности, при высоте полупроводниковых ножек в 1 мм AlN и SiC показали на ~16 % лучшую эффективность, чем MgO, и на ~27 % – по сравнению с  $Al_2O_3$ . С увеличением высоты этот разрыв уменьшается.

В работе [3] исследовано влияние керамических подложек, выполненных из оксида циркония, оксида алюминия и карбида кремния, а также их толщины на характерный перепад температур между горячей и холодной сторонами ТЭМ на модельной структуре ветвей, составленных в комбинации 2×4, что позволяет проанализировать пространственную равномерность тепловых режимов. В частности, было получено, что для керамической подложки, выполненной из оксида циркония, характерен значительный разброс в градиентах температур вдоль рабочей площади (максимальное различие составило 40 К между 1 и 7 ветвями). Оксид алюминия и карбид кремния показали гораздо более равномерное распределение градиентов температур вдоль площади ТЭМ. Аналогичное пространственное изменение параметра градиента температуры было исследовано для различных толщин керамики. На примере оксида алюминия было получено, что для всех толщин подложек (0,2 мм, 0,4 мм, 0,6 мм, 1,0 мм) наблюдалась неравномерность по-

лучаемого градиента температур. Наибольший перепад в величине градиента вдоль площади ТЭМ (~4 К) зафиксирован для наименьшей толщины. Для трех других толщин степень неравномерности меньше.

Исследования влияния керамики на итоговую эффективность ТЭМ не ограничиваются изменением материала и толщины подложек. В работе [4] предложена новая конструкция ТЭМ, согласно которой металлизация имеет П-образную форму в сечении и интегрирована в керамические подложки. Эксперименты и моделирование показали снижение температурных напряжений, что в перспективе может увеличить срок службы ТЭМ вплоть до 68 % по сравнению с классической плоской топологией. Новая конструкция также положительно влияет на выходные характеристики ТЭМ. Пиковые значения выходной мощности ТЭМ с предлагаемой геометрией выше, чем у ТЭМ с классической геометрией аналогичных размеров вплоть до 22,2 %. В работе также подчеркивается важность учета коэффициентов термического расширения материалов, поскольку высокие температурные напряжения могут привести к деградации контактов, что косвенно снижает COP за счет роста электрического сопротивления или может привести к выходу всего ТЭМ из строя.

Помимо теплофизических и электрофизических свойств материалов, непосредственно связанных с эффективностью ТЭМ, при проектировании реальных устройств необходимо учитывать и другие сопутствующие параметры. В работе [5] проведен обзор таких аспектов, в частности механических свойств материалов ТЭМ, применительно к различным прикладным областям.

Особое внимание в литературе уделяется выбору материала подложек для систем с многокаскадными ТЭМ. Так в работе [6] показано, что применение керамики с высокой теплопроводностью (AlN или BeO) вместо стандартного оксида алюминия позволяет значительно увеличить максимальный перепад температур на сторонах ТЭМ. Для малогабаритных ТЭМ выигрыш может достигать 2–4 К, а для крупных ТЭМ с короткими ветвями – до 10 К. Это объясняется снижением паразитного термического сопротивления на границах каскадов.

Однако помимо интегральных характеристик материала, существенное влияние на эффектив-

ность оказывает распределение температур вдоль керамических плат. В исследовании [7] доказывается необходимость учета двумерного распределения температуры на поверхности подложек. Авторами установлено, что из-за дискретного расположения ветвей ТЭ материала возникают значительные температурные градиенты в плоскости керамики. Это приводит к неоднородности теплового потока и снижению реального COP по сравнению с идеализированными одномерными моделями.

В работе [8] предложен метод математической оптимизации работы ТЭМ при переменных тепловых нагрузках. Авторами показано, что COP находится в прямой зависимости не только от питающего напряжения, но и от температур керамических подложек на горячей и холодной сторонах ТЭМ. Это подтверждает, что точное знание реальной теплопроводности керамики и минимизация температурных перепадов на ней являются обязательными критериями для построения эффективных систем с ТЭМ.

### Описание экспериментальных методов

Измерение теплопроводности керамических подложек проводилось стационарным методом коаксиальных цилиндров, согласно которому величина теплопроводности загруженного образца вычисляется в результате поэтапного измерения термического сопротивления образцов различной толщины:

$$\lambda = \frac{\Delta h}{\Delta R}, \quad (1)$$

где  $\Delta R$  – изменение термического сопротивления, соответствующее изменению толщины образца  $\Delta h$ .

Экспериментальная установка представляет собой вертикально ориентированную систему из двух идентичных соосных медных цилиндров, один из которых закреплен стационарно, другой может двигаться вдоль продольной оси (рис. 1). Верхний медный цилиндр диаметром 2 см нагревается изнутри трубчатым электрическим нагревателем (ТЭН). Питание ТЭН обеспечивается подключением его в цепь ЛАТР (лабораторного автотрансформатора). Внутри стержня на расстояниях 15 и 5 мм от нижнего торца располагаются термопары, утопленные корольками вплоть до осевой линии ( $T_1$  и  $T_2$ , соответственно). Нижний

цилиндр является зеркальным отражением верхнего с той разницей, что он является сплошным без встроенного нагревателя. Вместо этого нижний торец цилиндра плотно присоединен к системе жидкостного охлаждения, обеспечивающей отвод тепла. На расстояниях 5 и 15 мм от верхнего торца нижнего цилиндра расположены термопары  $T_3$  и  $T_4$ , соответственно.

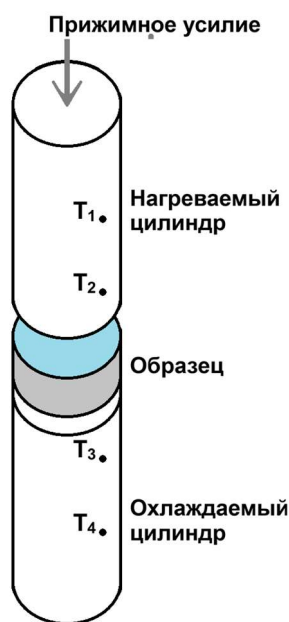


Рис. 1. Принципиальная схема метода

Для проведения измерений были заранее изготовлены круглые подложки из оксида алюминия и нитрида алюминия диаметром 2 см различных толщин: от 0,25 мм до 3 мм. Пластины поочередно помещались между медными цилиндрами, сводимыми вплоть до плотного контакта. Предварительно для снижения термического сопротивления на границе «керамика-медь» торцы образцов покрывались тонким слоем термопасты. После сведения цилиндров до плотного контакта с образцом включались системы нагрева и охлаждения.

После достижения стационарного режима, которому соответствуют установившиеся температуры  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  и  $T_4$ , с учетом расстояний между термопарами были получены величины тепловых потоков вдоль высоты всей системы. Зная плотность теплового потока, проходящего через образец определенной толщины, мы получаем информацию о термическом сопротивлении на данном участке. Повторив эксперимент для пла-

стин из того же материала, но разной толщины, получаем график зависимости термического сопротивления от толщины, по углу наклона аппроксимирующей прямой которого можно определить теплопроводность (формула 1).

### Результаты

В результате проведения экспериментов после установления стационарного режима теплообмена для керамических пластин AlN различной толщины получаемые данные сводились в таблицу и эксперимент повторялся для других толщин. В частности, результаты одиночного измерения  $R(h)$  представлены в табл. 1. Кроме того, в таблицу сведены данные по тепловым потокам  $Q$  и температурам на границах образцов:

Таблица 1. Результаты исследования образцов AlN

$h$ , мм	$Q$ , Вт	$R$ , ( $m^2 \times K$ )/Вт	$T_Г$ , °C	$T_Х$ , °C
0,25	27,42	$0,067 \times 10^{-3}$	39,02	33,18
0,50	27,60	$0,070 \times 10^{-3}$	39,38	33,22
1,00	26,94	$0,076 \times 10^{-3}$	39,71	33,23

Характерная зависимость термического сопротивления от высоты слоя нитрида алюминия изображена на рис. 1:

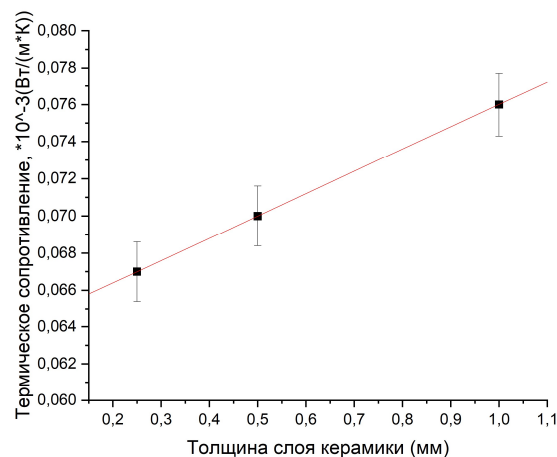


Рис. 2. Влияние толщины керамической подложки из нитрида алюминия на ее термическое сопротивление

По углу наклона графика, согласно формуле (1), теплопроводность керамики, по заявлениям производителя выполненной из нитрида алюминия, составила  $86,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$ . Эксперимент был повторен, среднее значение теплопроводности составило  $88,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$ . Сопоставление с табличными величинами (минимальное указываемое значе-

ние  $170 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\times\text{К}}$ ) показывает, что экспериментально измеренная теплопроводность практически равно в два раза меньше, что может быть связано с повышенной пористостью материала или дефектами на поверхности.

Такую же последовательность действий произвели применительно к изучению подложек из оксида алюминия чистотой 99,7 % марки Поликор. В таблице 2 и на рисунке 3 сведены характерные результаты измерений:

Таблица 2. Результаты исследования образцов  $\text{Al}_2\text{O}_3$  99,7 % Поликор

$h$ , мм	$Q$ , Вт	$R$ , ( $\text{м}^2\times\text{К}$ )/Вт	$T_{\Gamma}$ , °С	$T_{\text{х}}$ , °С
0,195	27,18	$0,063\times 10^{-3}$	37,99	32,54
0,482	27,06	$0,075\times 10^{-3}$	39,07	32,65
0,973	26,23	$0,088\times 10^{-3}$	40,04	32,42

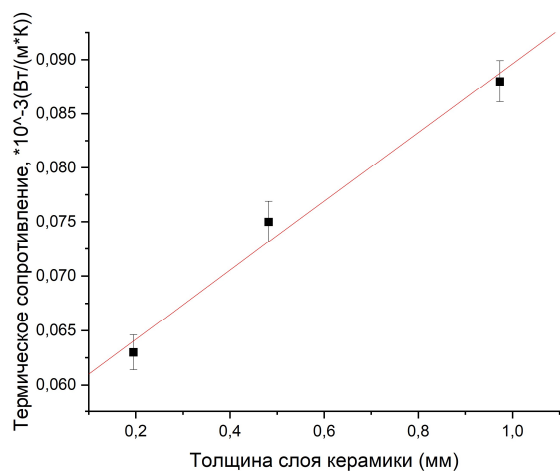


Рис. 3. Влияние толщины керамической подложки из оксида алюминия 99,7 % Поликор на ее термическое сопротивление

Анализ результатов совместно с другими экспериментами над подложками  $\text{Al}_2\text{O}_3$  99,7 % марки Поликор показал, что среднее значение теплопроводности этого материала составило  $32,311 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\times\text{К}}$ , что вполне соответствует заявляемым для корунда  $33-35 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\times\text{К}}$ .

Третий тип образца керамического материала был выбран оксид алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  чистотой 96%. В таблице 3 и на рисунке 4 сведены характерные результаты измерений:

Таблица 3. Результаты исследования образцов  $\text{Al}_2\text{O}_3$  96 %

$h$ , мм	$Q$ , Вт	$R$ , ( $\text{м}^2\times\text{К}$ )/Вт	$T_{\Gamma}$ , °С	$T_{\text{х}}$ , °С
0,25	25,59	$0,077\times 10^{-3}$	42,98	33,10
0,5	27,00	$0,087\times 10^{-3}$	40,92	33,37
1,0	27,39	$0,116\times 10^{-3}$	40,12	33,38

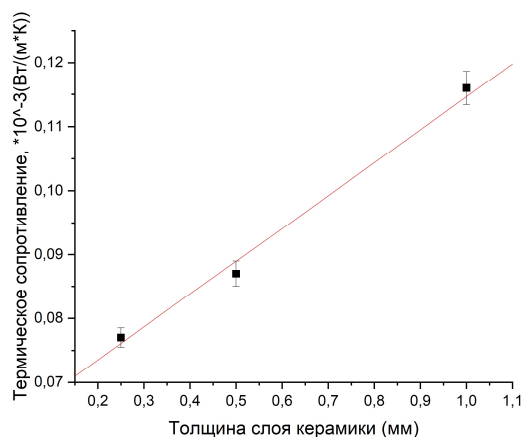


Рис. 4. Влияние толщины керамической подложки из оксида алюминия 96 % на ее термическое сопротивление

Анализ результатов совместно с другими экспериментами над подложками  $\text{Al}_2\text{O}_3$  96 % показал, что среднее значение теплопроводности этого материала составило  $18,786 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\times\text{К}}$ . Эта величина не соответствует табличным значениям. Типовые значения теплопроводности керамических плат из  $\text{Al}_2\text{O}_3$  96 % находятся в диапазоне от 20 до  $30 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\times\text{К}}$ . Аналогично  $\text{AlN}$  это может быть связано с повышенной пористостью материала или дефектами на поверхности.

### Оценка погрешностей измерений

Погрешность определения термического сопротивления керамических образцов оценивалась на основе анализа инструментальных погрешностей используемых средств измерений. Термопары были предварительно откалиброваны относительно друг друга, что обеспечило погрешность измерения разницы температур не более 0,05 К.

Таким образом относительная погрешность измерения теплового потока определяется точностью измерения разности температур:

$$\frac{\delta Q}{Q} = \frac{\delta(\Delta T_{12})}{\Delta T_{12}} \quad (2)$$

Относительная погрешность термического сопротивления рассчитывалось по формуле:

$$\frac{\delta R}{R} = \sqrt{\left(\frac{\delta(\Delta T_{\text{обр}})}{\Delta T_{\text{обр}}}\right)^2 + \left(\frac{\delta Q}{Q}\right)^2} \quad (3)$$

С учетом этого экспериментально определенные значения теплопроводности составили:

- Нитрид алюминия:  $88,5 \pm 11,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$ ;
- Оксид алюминия 99,7 %:  $32,31 \pm 1,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$ ;
- Оксид алюминия 96 %:  $18,79 \pm 0,74 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$ .

Полученные значения погрешности подтверждают достаточную точность проведенных измерений для решения поставленной задачи. Несколько более высокая погрешность для образцов нитрида алюминия обусловлена малым термическим сопротивлением образцов.

### Влияние теплопроводности керамических плат на COP ТЭМ

Эффективность работы ТЭМ определяется безразмерным коэффициентом холодопроизводительности COP, который описывается выражением:

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{P}, \quad (4)$$

где  $Q_c$  – отводимая мощность (Вт) – тепловая нагрузка от охлаждаемого объекта,  $P$  – энергопотребление ТЭМ (Вт).

Для оценки влияния теплопроводности керамических плат на эффективность ТЭМ были проведены эксперименты, направленные на определение холодильного коэффициента COP в различных режимах работы ТЭМ. Были определены зависимости COP от перепада температур при фиксированной тепловой нагрузке, а также от величины тепловой нагрузки при фиксированном температурном перепаде.

В эксперименте использовались ТЭМ с близкой величиной максимальной холодопроизводительности  $Q_{\max}$ , с одинаковыми размерами и количеством термоэлементов, но отличающихся материалами керамических плат для верхнего и нижнего теплопереходов. Верхний и нижний теплопереходы были изготовлены из одинаковых материалов  $\text{Al}_2\text{O}_3$  96 % и  $\text{AlN}$  толщиной 0,5 мм с каждой стороны ТЭМ.

Эксперименты проводились при следующих условиях:

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

Выбор фиксированной тепловой нагрузки 1,0 Вт при исследовании обусловлен необходи-

мостью обеспечения устойчивой работы обоих типов ТЭМ во всем исследуемом диапазоне перепада температур. Данная тепловая нагрузка соответствует 25–30 % от максимальной холодопроизводительности исследуемых ТЭМ, что соответствует методическим рекомендациям [8].

В таблице 4 и на рисунке 5 представлены результаты определения COP ТЭМ при фиксированной тепловой нагрузке 1 Вт в зависимости от перепада температур на сторонах ТЭМ.

Таблица 4. Зависимость COP от  $\Delta T$  при фиксированной  $Q_c$

$\Delta T, \text{K}$	COP	
	ТЭМ 1 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 96%	ТЭМ 2 $\text{AlN}$
0	12,83	14,74
10	3,5	3,8
20	1,55	1,66
30	0,84	0,9
40	0,51	0,55
50	0,33	0,35
60	0,21	0,24

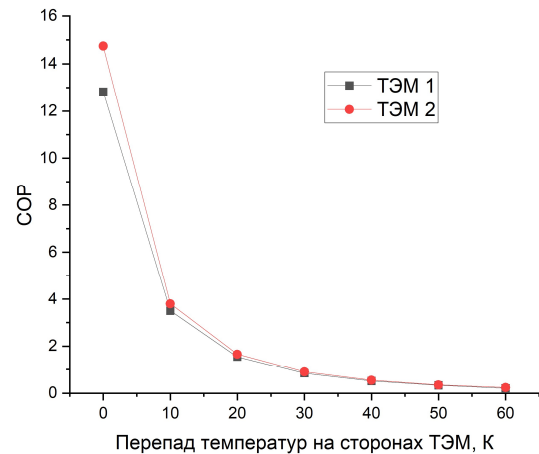


Рис. 5. Зависимость COP от перепада температур при фиксированной  $Q_c$

При сравнении ТЭМ с близкой  $Q_{\max}$ , но с разными материалами теплопереходов, эксперимент показал, что при фиксированной тепловой нагрузке и увеличении  $\Delta T$  от 0 до 60 °C, ТЭМ, собранные с из керамических плат с большей теплопроводностью, обеспечивали более высокий COP. Керамические подложки создают дополнительное тепловое сопротивление между рабочими поверхностями ТЭМ. При меньшей теплопроводности, тепловое сопротивление значительно возрастает.  $\text{AlN}$  обладает более высокой теплопроводностью по сравнению с  $\text{Al}_2\text{O}_3$  96%, что делает его более эффективным в отводе тепла даже при одинаковой толщине.

Второй рабочий режим исследования ТЭМ описывается следующими условиями:

- 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 5 и на рисунке 6 представлены результаты определения COP ТЭМ с разными материалами керамических плат при различной величине тепловой нагрузки и при фиксированном  $\Delta T$ .

Таблица 5. Зависимость COP от величины тепловой нагрузки

$Q_c$ , Вт	ТЭМ 1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 96 %	ТЭМ 2 AlN
0,25	0,08	0,08
0,5	0,14	0,15
0,75	0,18	0,2
1	0,21	0,23
1,25	0,23	0,26
1,5	0,24	0,28
1,75	0,25	0,29
2	0,24	0,29
2,25	0,22	0,29
2,5		0,28

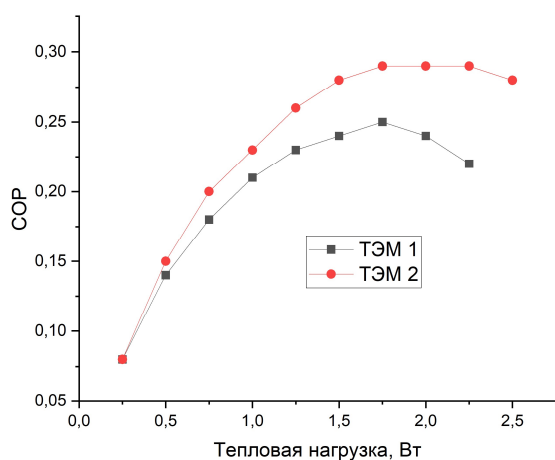


Рис. 6. Зависимость COP ТЭМ от величины тепловой нагрузки при фиксированном перепаде температур

Результаты эксперимента показали, что ТЭМ с керамическими платами из AlN продемонстрировали наивысший COP во всем диапазоне тепловых нагрузок. В то время как ТЭМ, собранные с использованием керамических плат из Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в самом теплонагруженном режиме (тепловая нагрузка 2,5 Вт), не смог обеспечить требуемый перепад температур на сторонах ТЭМ.

Использование керамических плат с большей теплопроводностью позволяет повысить COP

с 0,22 до 0,29 при тепловой нагрузке 2,25 Вт, что соответствует росту в 32 %.

В условиях высокой тепловой нагрузки и высокого теплового сопротивления теплопереходов, увеличивается температура на спаях термопар, что влечет за собой дополнительные джоулевы потери и в итоге снижает COP ТЭМ.

Следует отметить, что ограничения по максимальной тепловой нагрузке, которую ТЭМ способен отвести от охлаждаемого объекта, связаны исключительно с теплопроводностью керамических плат.

### Заключение

Общая эффективность ТЭМ определяется не только характеристиками полупроводниковых термоэлектрических материалов, но и эффективность теплопереноса через многослойную конструкцию ТЭМ. Керамические платы в конструкции ТЭМ создают паразитное термическое сопротивление, которое приводит к снижению COP ТЭМ.

ТЭМ с керамическими платами из AlN демонстрируют более высокие значения COP во всем исследованном диапазоне температурных перепадов и тепловых нагрузок по сравнению с ТЭМ на базе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Использование высокотеплопроводной керамики позволяет ТЭМ сохранять работоспособность в экстремальных режимах. В то время как ТЭМ с Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> чистотой 96 % не смог обеспечить требуемый перепад температур при нагрузке 2,5 Вт, ТЭМ с AlN показал стабильный результат.

Экспериментально полученная теплопроводность AlN равная  $88,5 \pm 11,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$  оказалась значительно ниже ожидаемой (не менее  $170 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$ ), что подчеркивает необходимость тщательного подбора материалов и проверки их качества при производстве ТЭМ.

### Список источников

1. Riffat S.B., Xiaoli Ma. Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems: A review // International Journal of Energy Research. 2004. Vol. 28. № 9. pp. 753–768.
2. Hassan Fagehi. The Effects of Ceramic Substrate Materials on Thermoelectric Generator Performance // Journal of Electronic Materials. Vol. 54. № 7. 2025. pp. 4449–4459.
3. Rezanian A., Rosendahl L.A. Thermal Effect of Ceramic Substrate on Heat Distribution in Thermoelectric Gene-

- rators // *Journal of Electronic Materials*. 2012. Vol. 41. № 6. pp. 1343–1347.
4. Sun W., Sui R., Yuan G. et. al. Thermoelectric module design to improve lifetime and output power density // *Materials Today Physics*. 2021. Vol. 18.
  5. Shilpa M.K., Raheman Md Abdul, Aabid Abdul et al. A Systematic Review of Thermoelectric Peltier Devices: Applications and Limitations // *Fluid Dynamics & Materials Processing*. 2022. Vol. 19. № 1. pp. 187–206.
  6. Semenyuk V. A Comparison of Performance Characteristics of Multistage Thermoelectric Coolers Based on Different Ceramic Substrates // *Journal of Electronic Materials*. 2014. Vol. 43. № 6. pp. 1542–1547.
  7. Drabkin LA, Yershova LB, Kondratiev DA et al. The Effect of the Substrates Two-Dimensional Temperature Distribution on the TEC Performance // *Proceedings of the XXII International Conference on Thermoelectrics (ICT)*. (2003).
  8. Nataporn Korprasertsak, Thananchai Leephakpreeda. Maximizing cooling/heating performance of thermoelectric modules across variable thermal loads via optimal control based on COP curves // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. № 1. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24063
  2. Hassan Fagehi. The Effects of Ceramic Substrate Materials on Thermoelectric Generator Performance. *Journal of Electronic Materials*. Vol. 54. № 7. 2025. pp. 4449–4459.
  3. Rezanian A, Rosendahl LA. Thermal Effect of Ceramic Substrate on Heat Distribution in Thermoelectric Generators. *Journal of Electronic Materials*. 2012;41(6): 1343–1347.
  4. Sun W, Sui R, Yuan G et al. Thermoelectric module design to improve lifetime and output power density. *Materials Today Physics*. 2021;18.
  5. Shilpa MK, Raheman Md Abdul, Aabid Abdul et al. A Systematic Review of Thermoelectric Peltier Devices: Applications and Limitations. *Fluid Dynamics & Materials Processing*. 2022;19(1):187–206.
  6. Semenyuk V. A Comparison of Performance Characteristics of Multistage Thermoelectric Coolers Based on Different Ceramic Substrates. *Journal of Electronic Materials*. 2014;43(6):1542–1547.
  7. Drabkin LA, Yershova LB, Kondratiev DA et al. The Effect of the Substrates Two-Dimensional Temperature Distribution on the TEC Performance. *Proceedings of the XXII International Conference on Thermoelectrics (ICT)*. (2003).
  8. Nataporn Korprasertsak, Thananchai Leephakpreeda. Maximizing cooling/heating performance of thermoelectric modules across variable thermal loads via optimal control based on COP curves. *Heliyon*. 2024;10(1). DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24063

#### References

1. Riffat SB, Xiaoli Ma. Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems: A review. *International Journal of Energy Research*. 2004;28(9):753–768.