

07

Исследование характеристик термоэлектрического охлаждения по данным измерений и численного анализа

© Е.Н. Васильев

Институт вычислительного моделирования СО РАН,
660036 Красноярск, Россия
e-mail: ven@icm.krasn.ru

Поступило в Редакцию 1 ноября 2025 г.
В окончательной редакции 28 ноября 2025 г.
Принято к публикации 17 декабря 2025 г.

Представлены результаты измерений и расчетов энергетических характеристик (холодопроизводительность и холодильный коэффициент) модели термоэлектрического холодильника в воздушной среде. Изменение тепловых потоков производилось с помощью двух тепломеров, расположенных на противоположных сторонах термоэлектрического модуля. Из численного анализа данных измерений силы тока, напряжения и температуры установлены зависимости холодопроизводительности и температурного перепада на термоэлектрическом модуле от температуры его горячей стороны. В ходе экспериментов определены энергетические характеристики процесса охлаждения в широком диапазоне рабочих параметров. Проведен численный анализ процессов теплообмена в модели холодильника при различных режимах работы, результаты вычислений согласуются с данными измерений.

Ключевые слова: термоэлектрическая система охлаждения, измерение теплового потока, метод наименьших квадратов, термическое сопротивление.

DOI: 10.61011/JTF.2026.04.62665.302-25

Введение

Термоэлектрические системы охлаждения разрабатываются для применения в различных областях техники: электронике, космических приложениях, медицине, бытовых устройствах и пр. [1–6]. Разработка термоэлектрических устройств и дальнейшее эффективное управление режимами работы должны производиться с учетом технических характеристик и параметров термоэлектрических модулей (ТЭМ) Пельтье, отвечающих эксплуатации в реальных условиях. Рабочие характеристики серийных термомодулей Пельтье приводятся в сопроводительной документации обычно для вакуума и определенной температуры горячей стороны [7]. Однако они чаще всего эксплуатируются в воздухе, в этом случае появляются тепловые потери, обусловленные теплообменом между сторонами ТЭМ вследствие механизмов теплопроводности, конвекции и возможной конденсации влаги (для негерметизированных ТЭМ). Физические свойства термоэлектрических полупроводниковых материалов зависят от температуры, поэтому на рабочие характеристики термомодулей также влияют температурные условия, которые могут меняться в широких пределах и существенно отличаться от значений, приведенных в сопроводительной технической документации. Помимо этого, значительное влияние на эффективность охлаждения оказывают термические сопротивления устройств подвода и отвода теплоты, от величины которых зависит интенсивность теплообмена ТЭМ с охлаждаемым объектом и внешней средой [8]. Поэтому при разработке и эксплуатации термоэлек-

трических систем охлаждения необходим учет влияния указанных факторов на их рабочие характеристики.

Целью настоящей работы является исследование влияния температурных условий на энергетические характеристики термоэлектрической системы охлаждения в воздухе по данным измерений и численного анализа. При этом сначала на основе данных измерений определяется влияние температуры горячей стороны ТЭМ на его рабочие характеристики, затем рассматриваются результаты измерений и расчетов характеристик термоэлектрической системы охлаждения в целом.

1. Описание экспериментального стенда и методики измерений

Определение рабочих характеристик ТЭМ, соответствующих условиям эксплуатации, требует проведения дополнительных исследований, основанных на измерениях и численном анализе. Эксперименты по определению характеристик ТЭМ проводились на модели термоэлектрического холодильника [9]. Эта модель представляет собой теплоизолированный корпус, в котором размещены вентилятор, источник теплоты и секция термоэлектрического блока. С помощью источника теплоты (электрического нагревателя) варьировалась подводимая в холодильную камеру тепловая мощность, вентилятор обеспечивал циркуляцию воздуха в охлаждаемом объеме. Основным функциональным узлом модели является секция термоэлектрического блока, компоновочная схема которой приведена на рис. 1, а. Секция

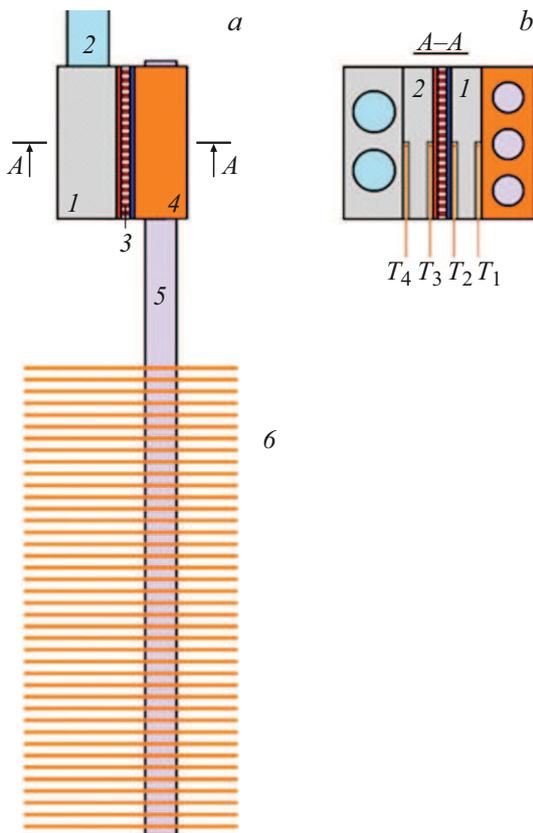


Рис. 1. Компонентная схема: 1 — жидкостной радиатор, 2 — подвод теплоносителя, 3 — термомодуль, 4 — тепло-распределитель, 5 — термосифоны, 6 — пластины воздушного теплообменника (а); размещение термопар в тепломерах 1 и 2 (b).

состоит из серийного термомодуля ТВ-199-1.4-0.8, а также устройств отвода и подвода теплоты. По сопроводительной документации этот серийный термомодуль имеет наибольшие значения температурного перепада $\Delta T_{\text{ТЕМ}} = 74^\circ\text{C}$ и холодопроизводительности $Q = 191\text{ W}$ при силе тока $I_{\text{max}} = 11.8\text{ A}$ и температуре горячей стороны $T_H = 27^\circ\text{C}$. Отвод теплоты от термомодуля осуществлялся жидкостным алюминиевым радиатором, подсоединенным к циркуляционному термостату. Теплопередача из объема холодильной камеры к холодной стороне ТЭМ производилась устройством подвода теплоты, состоящим из трех термосифонов с общим тепло-распределителем, на которые нанизаны ребра воздушного теплообменника. Медный тепло-распределитель обеспечивает эффективную теплопередачу от термосифонов к холодной стороне ТЭМ.

В ходе экспериментов измерялись значения температуры T , а также электрофизических параметров: напряжения U и силы тока I . Измерения температуры производились термопарами в различных точках исследуемого устройства. Тепловыделение термомодуля, вентилятора и источника теплоты определялось по параметрам электропитания, причем величина U измерялась

непосредственно на входе этих устройств, чтобы исключить влияние внешних потерь.

Для определения энергетических характеристик системы охлаждения должна быть измерена величина теплового потока, поступающего на холодную сторону термомодуля. Для измерения тепловых потоков известны разнообразные методы и устройства [10–13]. В настоящей работе рассматриваются установившиеся режимы, поэтому для измерения стационарных тепловых потоков был выбран тепломер типа вспомогательной стенки. В данном случае он представлял собой пластину, изготовленную из алюминиевого сплава и имеющую равную с термомодулем боковую контактирующую поверхность. Плотность теплового потока, проходящего через тепломер, вычисляется по данным измерения термопарами разности температур ΔT на его противоположных сторонах с помощью формулы $q = \lambda \Delta T / \delta$, где δ — толщина пластины, λ — коэффициент теплопроводности материала. Погрешность метода зависит от степени неоднородности распределения теплового потока по контактирующим поверхностям. В рассматриваемой конструкции модели холодильника условие однородности не выполняется в достаточной степени. В тепло-распределителе и жидкостном радиаторе теплопередача происходит на стенках цилиндрических каналов (рис. 1, b), что обуславливает неоднородность полей температуры и плотности теплового потока на боковых контактирующих границах этих элементов конструкции. Кроме того, термопары в тепломере размещены в пазах, заполненных термопастой с относительно низким коэффициентом теплопроводности, такая конфигурация нарушает одномерность задачи и приводит к необходимости замены толщины тепломера и его коэффициента теплопроводности на некоторые эффективные значения δ^* и λ^* , при этом тепловой поток Q , проходящий через тепломер, запишется в следующем виде:

$$Q = \lambda^* k^* \frac{\Delta T S}{\delta^*} = k^* \frac{\Delta T}{R}. \quad (1)$$

Здесь k^* — некоторый коэффициент пропорциональности, S — площадь боковой поверхности тепломера. Термическое сопротивление тепломера R прежде всего зависит от его геометрических параметров и коэффициентов теплопроводности материала пластины и термопасты [14,15]. Провести достоверный расчет δ^* и λ^* невозможно из-за неизвестного распределения толщины слоев термопасты, примыкающих к проводникам теплопар, и их взаимного теплового влияния.

Для минимизации влияния указанных выше негативных факторов была применена система из двух одинаковых тепломеров, установленных на противоположных сторонах термомодуля. На боковых поверхностях обоих тепломеров в пазах установлены по две термопары, фиксирующие локальные значения температуры (рис. 1, b). Такая дифференциальная система измерений двумя тепломерами позволила исключить физические параметры, определение которых имеет значительную

погрешность. Уравнения для расчета теплового потока, проходящего через первый и второй тепломеры, имеют вид, аналогичный выражению (1):

$$Q = k_1 \frac{T_1 - T_2}{R_1}, \quad (2)$$

$$Q + W = k_2 \frac{T_3 - T_4}{R_2}. \quad (3)$$

Здесь T_1 и T_2 — показания термопар в первом тепломере, T_3 и T_4 — показания термопар во втором тепломере, k_1 и k_2 — неизвестные коэффициенты, отражающие специфику каждого из тепломеров, $W = UI$ — электрическая мощность термомодуля, R_1 и R_2 — термические сопротивления тепломеров 1 и 2. Величины R_1 и R_2 неизвестны, их различие выразим с помощью коэффициента k_3 :

$$R_1 = k_3 R_2. \quad (4)$$

Из формул (2)–(4) следует соотношение для искомого теплового потока, поступающего к термомодулю:

$$Q = \frac{UI}{k(T_3 - T_4)/(T_1 - T_2) - 1}. \quad (5)$$

Здесь $k = k_2 k_3 / k_1$ — коэффициент, который учитывает все особенности конфигурации системы измерения теплового потока с двумя тепломерами. При этом формула (5) в итоге включает в себя только измеренные с достаточно высокой точностью значения U , I , T_1 , T_2 , T_3 и T_4 , а параметры, характеризующие теплопроводность материалов и особенности геометрии тепломеров, в ней не присутствуют.

Для определения величины k проводились калибровочные эксперименты при выключенном питании термомодуля, при этом $W = 0$, и через тепломеры проходит одинаковый тепловой поток. Тогда с учетом (2)–(4) получаем значение $k = (T_1 - T_2)/(T_3 - T_4)$, определяемое по данным измерения локальных значений температуры. Описание калибровочных экспериментов приведено в [16], в результате калибровки было получено среднее значение $k = 1.57$, при этом не установлена явная зависимость k от величины и направления Q . Следует отметить, что при идеальном однородном распределении плотности теплового потока для абсолютно одинаковых тепломеров значение k должно быть равно единице.

Погрешность определения теплового потока, согласно формуле (5), зависит от точности определения коэффициента k , температурных разностей на тепломерах и электрофизических параметров. В работе [16] максимальное отклонение коэффициента k от его среднего значения составило $\pm 4.5\%$ при среднеквадратичном отклонении 3.6% , эти отклонения обусловлены погрешностью измерения температурных разностей для выражения $k = (T_1 - T_2)/(T_3 - T_4)$. В ходе предварительной калибровки термопар была установлена точность измерения локальной температуры не ниже 0.1°C , характерная величина температурных разностей в экспериментах составляла $2^\circ\text{C} - 3^\circ\text{C}$. Точность измерения тока

и напряжения существенно выше тепловых измерений и не оказывает заметного влияния на общую точность методики. Оценим влияние погрешности определения коэффициента k на холодопроизводительность по формуле (5). При включенном ТЭМ величина разностей $T_1 - T_2$ и $T_3 - T_4$ прямо пропорциональна значениям тепловой мощности, проходящей через первый и второй тепломеры. Особенностью термоэлектрического охлаждения является низкий холодильный коэффициент. Так, в режиме максимальной холодопроизводительности, холодильный коэффициент $\varepsilon = Q/(UI) \approx 0.25$, при этом через второй тепломер проходит тепловая мощность $Q + UI \approx 5Q$. Температурный перепад на тепломерах прямо пропорционален величине тепловых потоков, поэтому $T_3 - T_4 \approx 5(T_1 - T_2)$, а формула (5) при подстановке примет вид $Q = UI/(5k - 1)$, в данном случае вариация коэффициента k на 4.5% приведет к изменению Q на 4.9% .

В ходе исследования характеристик термоэлектрической системы охлаждения были проведены две серии экспериментов. Первая проводилась с установленными тепломерами для определения рабочих характеристик ТЭМ при различных температурных условиях, также в экспериментах определялось термическое сопротивление корпуса модели холодильника. При проведении этой серии, помимо показаний термопар, в тепломерах фиксировались температуры воздуха внутри корпуса (T_5 на входе и T_6 на выходе воздушного радиатора) и внешнего воздуха (T_7). Значения T_2 и T_3 рассматривались как температура холодной и горячей сторон термомодуля. По данным измерений температур и определения холодопроизводительности было рассчитано термическое сопротивление корпуса модели холодильника $R_B = (T_7 - 0.5T_5 - 0.5T_6)/Q = 1.8 \text{ K/W}$. Во второй серии экспериментов определялись эффективность холодильника в целом для различных режимов работы, при этом тепломеры были удалены из конструкции секции термоэлектрического блока, поскольку они являются дополнительными термическими сопротивлениями, снижающими эффективность термоэлектрического охлаждения. При этом термопары для измерения T_2 и T_3 были переустановлены в пазах теплораспределителя и жидкостного радиатора на боковых сторонах, контактирующих с ТЭМ.

2. Измерение рабочих характеристик ТЭМ в воздухе при различных температурных условиях

При исследовании рабочих характеристик ТЭМ в воздушной среде были проведены измерения тепловых и электрофизических параметров, которые позволили определить значения температур, тепловых потоков, термических сопротивлений, силы тока и напряжения. По результатам измерений при различных значениях

температуры горячей стороны T_H построены нагрузочные прямые $Q(\Delta T_{\text{ТЕМ}})$, устанавливающие связь холодопроизводительности ТЭМ с перепадом температуры на его сторонах. На рис. 2 приведены нагрузочные прямые, соответствующие силе тока питания ТЭМ $I = 0.75 \cdot I_{\text{max}} = 8.85 \text{ А}$ и значениям температуры горячей стороны $T_H = 14^\circ\text{C}$, 20°C , 25°C , 30°C , 35°C и 40°C . Величина T_H принималась равной значению T_3 термопары, расположенной на втором тепломере и примыкающей к горячей стороне ТЭМ. Нижняя прямая на рисунке относится к $T_H = 14^\circ\text{C}$, верхняя — к $T_H = 40^\circ\text{C}$, расположение промежуточных прямых последовательно повышается с ростом температуры горячей стороны, поскольку с увеличением T_H достигаются более высокие значения Q и $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$. Аналогичный ха-

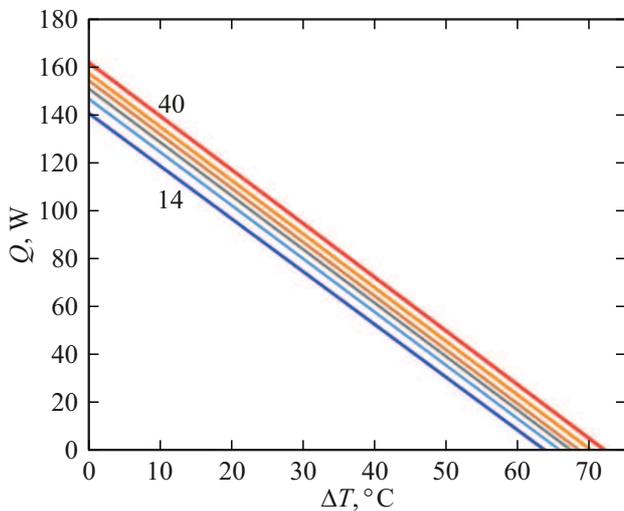


Рис. 2. Нагрузочные характеристики при силе тока $I = 8.85 \text{ А}$ и значениях температуры $T_H = 14^\circ\text{C}$, 20°C , 25°C , 30°C , 35°C и 40°C .

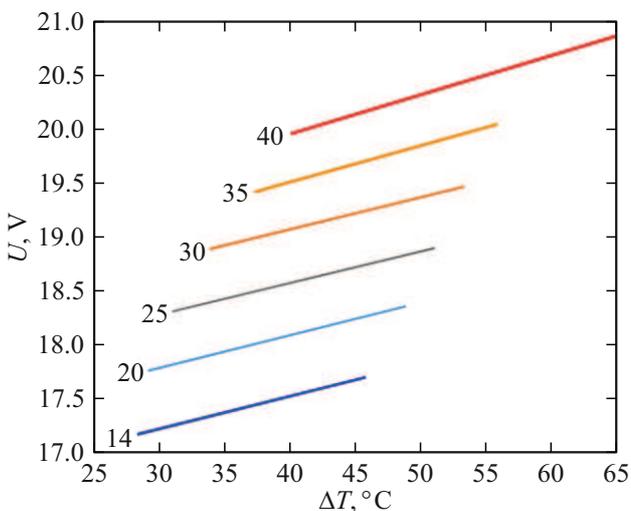


Рис. 3. Зависимости напряжения от температурного перепада на ТЭМ при силе тока $I = 8.85 \text{ А}$ и значениях температуры $T_H = 14^\circ\text{C}$, 20°C , 25°C , 30°C , 35°C и 40°C .

рактер нагрузочные характеристики имеют и при других значениях силы тока.

Другой важной характеристикой, позволяющей определять величину собственного энергопотребления и энергетическую эффективность ТЭМ, является зависимость напряжения U от температурных условий. Зависимости $U(\Delta T_{\text{ТЕМ}})$ получены в ходе этой же серии измерений при значениях температуры горячей стороны $T_H = 14^\circ\text{C}$, 20°C , 25°C , 30°C , 35°C и 40°C . На рис. 3 они приведены для силы тока $I = 0.75 \cdot I_{\text{max}} = 8.85 \text{ А}$, значения T_H указаны на соответствующих графиках. Из рисунка видно, что величина U пропорционально растет с увеличением как $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$, так и T_H , данная тенденция наблюдается и при других значениях силы тока.

3. Определение зависимости рабочих характеристик ТЭМ от температуры горячей стороны

Для расчета и оптимизации параметров термоэлектрической системы охлаждения необходимо задать рабочие характеристики ТЭМ для реальных температурных условий эксплуатации. Так, для рассматриваемой системы охлаждения эти условия зависят от режима работы ТЭМ, значений температуры воздуха в холодильной камере и помещении, а также от температуры теплоносителя в жидкостном радиаторе. В различных режимах эксплуатации температура горячей стороны T_H может меняться в широком диапазоне значений, что, в свою очередь, влияет на рабочие характеристики ТЭМ. Результаты проведенных измерений позволяют определить влияние температуры горячей стороны термомодуля на его рабочие характеристики.

Наиболее информативными являются крайние точки нагрузочных прямых, они определяют максимальные значения холодопроизводительности Q и температурного перепада $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$. Максимальные значения Q , полученные по результатам проведенных экспериментов для исследуемого диапазона температур горячей стороны $T_H = 14^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$ и трех значений силы тока $0.25 \cdot I_{\text{max}} = 2.95 \text{ А}$, $0.5 \cdot I_{\text{max}} = 5.9 \text{ А}$ и $0.75 \cdot I_{\text{max}} = 8.85 \text{ А}$, отмечены на рис. 4 квадратами. В рассматриваемом диапазоне T_H максимальная холодопроизводительность ТЭМ при силе тока $I = 8.85 \text{ А}$ меняется от 141 до 162 Вт. По полученным максимальным значениям Q с помощью метода наименьших квадратов были определены линейные функции, которые на рисунке отображены сплошными линиями, численные значения на прямых соответствуют значениям силы тока в процентах от I_{max} . Кругами на рис. 4 отмечены максимальные значения холодопроизводительности Q , соответствующие технической документации производителя ТЭМ. Наибольшая

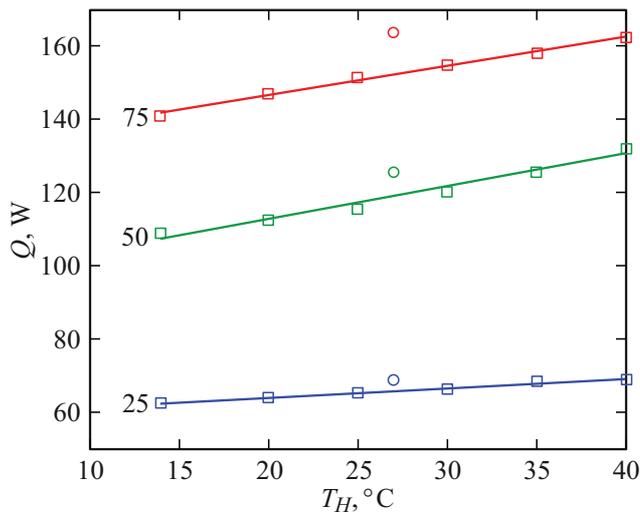


Рис. 4. Экспериментальные данные (квадраты) и рассчитанные зависимости $Q_{\max}(T_H)$, на прямых указаны значения I в процентах от I_{\max} , кругами отмечены значения Q_{\max} , полученные из технической документации ТЭМ.

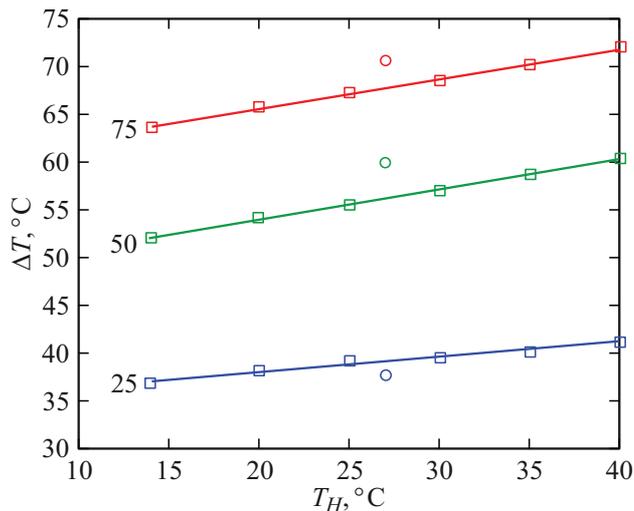


Рис. 5. Экспериментальные данные (квадраты) и рассчитанные зависимости $\Delta T_{\max}(T_H)$, на прямых указаны значения I в процентах от I_{\max} , кругами отмечены значения ΔT_{\max} , полученные из технической документации.

разница, составляющая примерно 7%, между рассчитанными значениями Q (152 W при $T_H = 27^\circ\text{C}$) и данными производителя (163.5 W) наблюдается при $I = 8.85\text{ A}$. Меньшая величина холодопроизводительности, полученная в результате измерений, обусловлена, по-видимому, прежде всего тепловыми потерями в объеме термомодуля при работе в воздушной среде.

Максимальные значения $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$, полученные по данным экспериментов в исследуемом диапазоне $T_H = 14^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$ при значениях $I = 0.25 \cdot I_{\max}$,

$0.5 \cdot I_{\max}$ и $0.75 \cdot I_{\max}$, нанесены на рис. 5 квадратами, кругами отображены значения $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$ из технической документации термомодуля. В этом диапазоне T_H при величине $I = 8.85\text{ A}$ максимальный перепад температуры менялся от 63.8°C до 72.1°C . Прямыми линиями отображены зависимости, полученные по экспериментальным значениям методом наименьших квадратов для трех значений силы тока, величины которых приведены на соответствующих прямых. Для $I = 8.85\text{ A}$ и $T_H = 27^\circ\text{C}$ значение $\Delta T_{\text{ТЕМ}} = 67.9^\circ\text{C}$, определенное по графику, ниже данных производителя (70.7°C) на 4%.

Измеренные зависимости напряжения электропитания термомодуля $U(\Delta T_{\text{ТЕМ}})$, представленные на рис. 3, получены для отличающихся диапазонов температурного перепада. Данные зависимости имеют линейный растущий вид, для проведения численного анализа они были приведены к единому диапазону температурного перепада. При этом были определены минимальные U_{\min} (при $\Delta T_{\text{ТЕМ}} = 30^\circ\text{C}$) и максимальные U_{\max} значения напряжения (при $\Delta T_{\text{ТЕМ}} = 55^\circ\text{C}$). Эти минимальные (квадраты) и максимальные (круги) значения показаны на рис. 6 для трех сил тока $I = 0.25 \cdot I_{\max}$, $0.5 \cdot I_{\max}$ и $0.75 \cdot I_{\max}$. По данным значениям методом наименьших квадратов были построены в виде линейных функций зависимости $U_{\min}(T_H)$ и $U_{\max}(T_H)$, отображенные на рисунке сплошными прямыми линиями, для каждой пары графиков приведены соответствующие значения I в процентах от I_{\max} .

В дальнейшем зависимости $Q(T_H)$, $\Delta T_{\text{ТЕМ}}(T_H)$, $U_{\min}(T_H)$ и $U_{\max}(T_H)$, полученные в результате обработки данных измерений, были использованы при расчете характеристик термоэлектрической системы охлаждения в воздушной среде при различных температурных условиях.

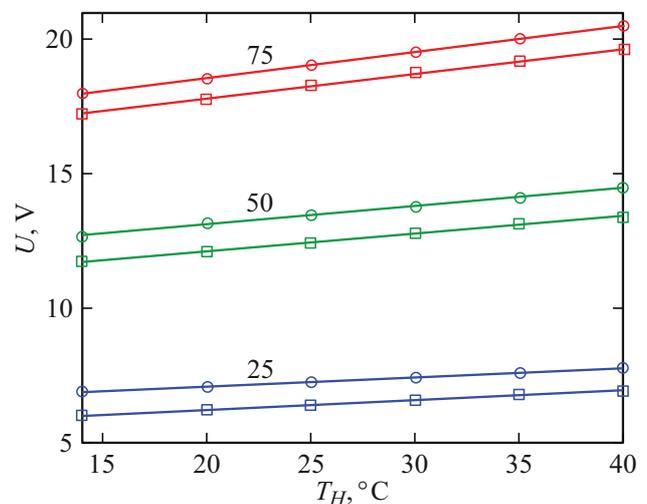


Рис. 6. Зависимости $U_{\min}(T_H)$ (квадраты) и $U_{\max}(T_H)$ (круги) для значений I , указанных в процентах от I_{\max} .

4. Результаты измерений и расчетов энергетических характеристик термоэлектрической системы охлаждения

Энергетическая эффективность термоэлектрического холодильника характеризуется двумя основными параметрами: холодопроизводительностью и холодильным коэффициентом. Эти параметры для модели холодильника определялись как путем непосредственных измерений на стенде во второй серии экспериментов, так и в результате численного анализа с использованием рабочих характеристик ТЭМ, полученных в первой серии экспериментов.

Во второй серии экспериментов определялась холодопроизводительность Q модели холодильника в зависимости от силы тока питания ТЭМ, при этом заданная температура воздуха $+3^\circ\text{C}$ в охлаждаемом объеме термоэлектрического холодильника стабилизировалась путем варьирования мощности источника теплоты. В экспериментах регистрировались электрические мощности вентилятора W_1 и источника теплоты W_2 , температуры холодной T_2 и горячей T_3 сторон термомодуля, воздуха на входе T_5 и выходе теплообменника T_6 , внешнего воздуха (T_7). По данным этих температурных измерений рассчитывался тепловой поток через стенки корпуса $Q_B = (T_7 - 0.5T_5 - 0.5T_6)/R_B$. В итоге величина Q равна сумме тепловых мощностей, отводимых из охлаждаемого объема:

$$Q = W_1 + W_2 + Q_B.$$

Эффективность термоэлектрического охлаждения в значительной степени зависит от термических сопротивлений устройств подвода R_T и отвода R_S теплоты, по данным измерений были определены значения $R_T = (0.5T_5 + 0.5T_6 - T_2)/Q$ и $R_S = (T_3 - T_8)/(Q + W)$.

Измеренные значения параметров модели холодильника при температуре теплоносителя $T_8 = 20^\circ\text{C}$ в жидкостном радиаторе для различной силы тока I представлены в таблице. Во втором и третьем столбцах таблицы приведены термические сопротивления устройств подвода и отвода теплоты, в верхних строках ячеек четвертого, пятого и шестого столбцов представлены полученные по результатам измерений значения температурного перепада $\Delta T_{\text{ТЕМ}} = T_3 - T_2$, холодопроизводительности Q и холодильного коэффициента, рассчитанного с помощью соотношения $\varepsilon = Q/(IU)$.

Значения основных параметров модели холодильника, полученные по результатам измерений, также представлены на рис. 7. Кругами отмечены холодопроизводительность Q , квадратами — перепад температуры $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$, крестиками — холодильный коэффициент. В исследованном диапазоне силы тока с ростом I наблюдается рост $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$, падение ε , а величина Q максимальна в диапазоне $I \approx 8 - 9$ А. Несмотря на стабильность граничных температурных условий (значений температур воздуха

Значения измеренных и рассчитанных параметров системы охлаждения

I , А	R_T , К/В	R_S , К/В	$\Delta T_{\text{ТЕМ}}$, $^\circ\text{C}$	Q , В	ε
4	0.27	0.1	31.4	28.4	0.732
			32.2	26.7	0.693
5.9	0.281	0.106	40.7	37.5	0.463
			40.7	37.1	0.455
7	0.286	0.107	46	40.2	0.353
			45.7	40.9	0.357
8	0.292	0.108	50.9	42.4	0.283
			50.4	42.6	0.283
8.5	0.292	0.109	53.2	42.4	0.25
			52.8	42.8	0.251
8.85	0.291	0.109	55	42.6	0.229
			54.6	42.7	0.23
9.5	0.289	0.11	58.2	41.4	0.191
			57.8	42	0.194
11	0.282	0.111	65.8	37.9	0.126
			—	—	—
11.4	0.276	0.111	67.8	36.6	0.112
			—	—	—

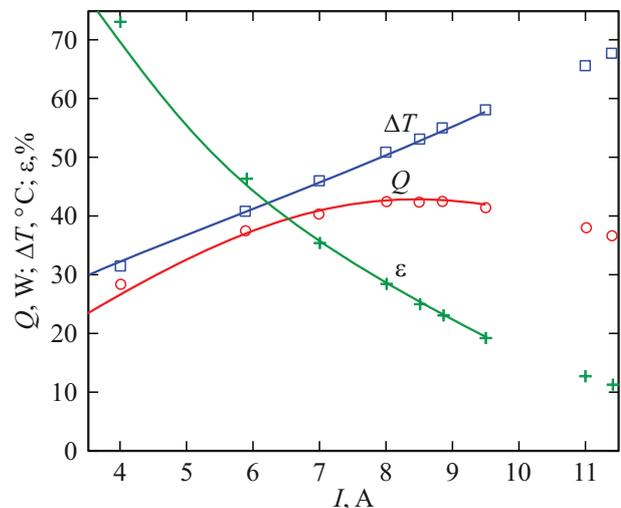


Рис. 7. Измеренные значения и расчетные зависимости холодопроизводительности, холодильного коэффициента и температурного перепада от силы тока.

внутри корпуса холодильника и теплоносителя в жидкостном радиаторе), значение $T_H = T_3$ в экспериментах менялась значительно: от 26.8°C при $I = 4$ А до 60.2°C при $I = 11.4$ А.

На основе измеренных рабочих характеристик ТЭМ был проведен расчет основных параметров модели холодильника. В идеальном случае, когда нет тепловых потерь при подводе и отводе теплоты, установившийся

перепад температуры между охлаждаемым объектом и внешней средой будет равен разнице температуры на термомодуле $\Delta T_0 = -\Delta T_{\text{ТЕМ}}(I, Q, T_H)$. Отрицательный знак в этом выражении обусловлен тем, что в отличие от обычного процесса теплопередачи термомодуль, выполняющий функцию теплового насоса, осуществляет передачу теплоты в обратном направлении — от холодной стороны к горячей. Величина температурного перепада определяется режимом работы ТЭМ, который зависит от силы тока I , передаваемой тепловой мощности Q и температуры горячей стороны T_H . В реальной системе охлаждения часть произведенного ТЭМ отрицательного температурного перепада идет на компенсацию тепловых потерь в устройствах подвода и отвода теплоты. К холодной стороне ТЭМ устройством подвода теплоты, имеющим тепловое сопротивление R_T , передается тепловая мощность Q , поэтому перепад температуры на этом устройстве равен $R_T Q$. Устройство отвода теплоты во внешнюю среду дополнительно к Q передается джоулева теплота $W = UI$, выделившаяся в самом ТЭМ. Как показали измерения, величина напряжения питания ТЭМ зависит от силы тока I , передаваемой тепловой мощности Q и температуры горячей стороны T_H . Следовательно, установившийся на устройстве теплоотвода (жидкостном радиаторе) перепад температуры равен $R_S[Q + U(I, Q, T_H)I]$. В итоге для расчета характеристик модели термоэлектрического холодильника запишем уравнение, отражающее баланс температурных перепадов с учетом основных теплообменных процессов и определяющее разницу ΔT_0 между значениями температуры воздуха в объеме корпуса холодильника и теплоносителя в жидкостном радиаторе

$$\Delta T_0 = R_T Q - \Delta T_{\text{ТЕМ}}(I, Q, T_H) + R_S[Q + U(I, Q, T_H)I]. \quad (6)$$

Используемые в уравнении (6) функции $\Delta T_{\text{ТЕМ}}(I, Q, T_H)$ и $U(I, Q, T_H)$ вычислялись по рабочим характеристикам термомодуля, полученным в результате обработки экспериментальных данных, с использованием интерполяционных полиномов. Описание расчетного алгоритма представлено в [8], в настоящем исследовании он модифицирован для учета зависимости рабочих характеристик термомодуля от T_H . Исходными параметрами задачи являются значения температурного перепада ΔT_0 , термических сопротивлений R_T и R_S , температуры теплоносителя T_8 и силы тока I , в результате расчета определяются холодопроизводительность Q , холодильный коэффициент ε , напряжение питания U , температурный перепад $\Delta T_{\text{ТЕМ}}$ и температура горячей стороны термомодуля T_H . В расчетах были заданы средние значения термических сопротивлений $R_T = 0.29 \text{ K/W}$ и $R_S = 0.11 \text{ K/W}$.

Полученные в результате расчетов зависимости $Q(I)$, $\varepsilon(I)$ и $\Delta T_{\text{ТЕМ}}(I)$ отображены на рис. 7 сплошными линиями, также в таблице в нижних строках ячеек приведены численные значения этих параметров для значений силы тока, при которых проводились эксперименты. Эти за-

висимости определены в меньшем интервале силы тока по сравнению с экспериментами из-за ограниченности диапазонов I и T_H , для которых проводились измерения рабочих характеристик ТЭМ. Рассчитанная зависимость $Q(I)$ имеет максимум 42.8 W при значении $I = 8.5 \text{ A}$. При большей силе тока снижаются холодопроизводительность и, особенно, холодильный коэффициент, поэтому практического интереса эти режимы не представляют. В целом результаты расчетов характеристик модели термоэлектрического холодильника соответствуют экспериментальным данным, наибольшее расхождение в численных значениях наблюдается при $I = 4 \text{ A}$, что обусловлено наибольшим отклонением R_T и R_S от их средних значений, используемых в расчетах. Таким образом, результаты измерений рабочих характеристик ТЭМ и их дальнейшей обработки являются основой для численного анализа эффективности термоэлектрической системы охлаждения в широком диапазоне температурных условий.

Заключение

По данным измерений в воздушной среде определены рабочие характеристики термоэлектрического модуля ТВ-199-1.4-0.8 и установлены их зависимости от температуры горячей стороны в диапазоне значений $T_H = 14^\circ\text{C} - 40^\circ\text{C}$. В этом диапазоне T_H при силе тока $I = 8.85 \text{ A}$ максимальная холодопроизводительность данного серийного ТЭМ менялась от 141 до 162 W , а максимальный перепад температуры — от 64°C до 72°C . Максимальная холодопроизводительность модели термоэлектрического холодильника зафиксирована в диапазоне силы тока $I \approx 8 - 9 \text{ A}$. С помощью численной модели, использующей рабочие характеристики ТЭМ и учитывающей влияние температуры горячей стороны термомодуля, получены основные параметры модели термоэлектрического холодильника, результаты расчетов согласуются с данными измерений.

Таким образом, в работе исследовано влияние температуры горячей стороны термомодуля в воздушной среде, которое в реальных условиях эксплуатации может существенно влиять на характеристики процесса термоэлектрического охлаждения. Влияние данного фактора необходимо учитывать при разработке и эксплуатации термоэлектрических систем охлаждения и терморегулирования.

Конфликт интересов

Автор заявляет, что у него нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D. Zhao, G. Tan. Appl. Thermal Engineer., **66** (1–2), 15 (2014). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.01.074

- [2] Y.W. Chang, C.C. Chang, M.T. Ke, S.L. Chen. Appl. Thermal Engineer., **29** (13), 2731 (2009).
- [3] М.Ю. Штерн, Ю.И. Штерн, А.А. Шевченко. Известия вузов. Сер. электроника, **4**, 30 (2011).
- [4] Н.П. Семена. Теплофизика и аэромеханика, **20** (2), 213 (2013). [N.P. Semena. Thermophys. Aeromechan., **20** (2), 211 (2013). DOI: 10.1134/S0869864313020078]
- [5] Т.А. Исмаилов, О.В. Евдулов, Н.А. Набиев, С.Г. Магомедова. Мед. техника, **1**, 40 (2020). [T.A. Ismailov, O.V. Yevdulvo, N.A. Nabiev, S.G. Magomedova. Biomed. Eng., **54** (1), 56 (2020). DOI: 10.1007/s10527-020-09973-7]
- [6] О.В. Евдулов, А.М. Ибрагимова, З.М. Дайзиев. Изв. вузов. Приборостроение, **67** (7), 615 (2024). DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-7-615-621
- [7] П. Шостаковский. Компоненты и технологии, **12**, 120 (2009).
- [8] Е.Н. Васильев. ЖТФ, **87** (1), 80 (2017). DOI: 10.21883/JTF.2017.01.44022.1725 [E.N. Vasil'ev. Tech. Phys., **62** (1), 90 (2017). DOI: 10.1134/S1063784217010248]
- [9] Е.Н. Васильев, А.А. Сиротинин. Журн. Сибирского фед. ун-та. Техника и технологии, **18** (2), 176 (2025).
- [10] О.А. Геращенко. *Основы теплотриши* (Наукова думка, Киев, 1971)
- [11] Н.В. Пилипенко. *Основы проектирования комбинированных приемников теплового потока* (Ун-т ИТМО, СПб., 2016)
- [12] С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков. ЖТФ, **74** (7), 114 (2004). [S.Z. Sapozhnikov, V.Y. Mitiakov, A.V. Mitiakov. Tech. Phys., **49** (7), 920 (2004). DOI: 10.1134/1.1778869]
- [13] Ю.В. Добров, В.А. Лашков, И.Ч. Машек, А.В. Митяков, В.Ю. Митяков, С.З. Сапожников, Р.С. Хоронжук. ЖТФ, **91** (2), 240 (2021). DOI: 10.21883/JTF.2021.02.50357.209-20 [Yu.V. Dobrov, V.A. Lashkov, I.Ch. Mashek, A.V. Mityakov, V.Yu. Mityakov, S.Z. Sapozhnikov, R.S. Khoronzhuk. Tech. Phys., **66** (2), 229 (2021). DOI: 10.1134/S1063784221020109]
- [14] В.М. Попов. *Теплообмен через соединения на клеях* (Энергия, М., 1974)
- [15] С.Ю. Меснянкин, А.Г. Викулов, Д.Г. Викулов. УФН, **179** (9), 945 (2009). DOI: 10.3367/UFNe.0179.200909c.0945 [S.Y. Mesnyankin, A.G. Vikulov, D.G. Vikulov. Physics-Uspekh, **52** (9), 891(2009).]
- [16] Е.Н. Васильев. Журн. Сибирского фед. ун-та. Техника и технологии, **18** (4), 440 (2025).