

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Руднев Даниил Николаевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Изучение эффекта Пельтье. Термостабилизация образца с помощью
элемента Пельтье**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №20303

Научный руководитель:

к.т.н. Д.В. Сеньков

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума

ст.преп.КОФ П.В.Калинин

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. В.Т. Астрелин

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Новосибирск 2021

Аннотация

Данная работа посвящена изучению свойств термоэлектрических модулей, использующих эффект Пельтье и построению стенда для термостабилизации образца посредством элемента Пельтье. Установка для термостабилизации и изучения свойств термоэлектрических элементов собрана на базе платформы Arduino Uno с использованием в качестве элементов контроля температуры интегральных термодатчиков LM35DT. В работе представлены измерения холодопроизводительности элемента Пельтье в зависимости от тока, протекающего через него и сравнение полученных результатов с расчетными данными. Также в работе проведена наглядная демонстрация работы установки с точностью термостабилизации тестового образца на уровне 0.1°C .

Ключевые слова: эффект Пельтье, элемент Пельтье, термоэлектрический модуль, термостабилизация.

Оглавление

Аннотация.....	2
Введение	4
Теоретическая часть.....	5
Описание эксперимента.....	9
Описание установки.....	9
Результаты	11
Термостабилизация	11
Измерение холодопроизводительности	12
Выводы	16
Список литературы	17

Введение

Термостабилизация – т.е. изменение температуры объекта в соответствии с заранее заданным профилем очень широко используется в самых разных сферах: и в науке, и в производстве, и в медицине, и в быту. Такая задача может быть разделена на два типа: когда для достижения нужной температуры достаточно регулировать нагрев образца, и когда требуется реализовывать не только нагрев, но и охлаждение, т.е. передачу тепла от образца в окружающую среду. В качестве теплового насоса часто используются установки, работающие на основе замкнутого термодинамического цикла, однако это не единственный вариант.

В компактных приложениях часто используются термоэлектрические элементы, использующие для процесса отъема тепла от образца эффект Пельтье. Важным преимуществом таких элементов является полное отсутствие в них каких-либо движущихся частей и максимальная их компактность. Однако, за это приходится платить существенно меньшим, по сравнению с термодинамическим циклом, коэффициентом полезного действия. Такие термоэлектрические устройства стабилизации используются там, где требуются относительно небольшие размеры при высокой точности стабилизации: в секвенаторах белков, в прецизионной измерительной аппаратуре. Также такие элементы широко используются в качестве теплового насоса, например в бытовых кулерах, где забирают тепло от охлаждаемой воды и отдают его подогреваемой. В этом случае не очень высокий КПД недостатком не является совсем – так как нагреваться вода должна на существенно большую величину, нежели охлаждаться. В данной работе целью является термостабилизация образца на заданной в диапазоне от единиц градусов Цельсия до комнатной температуре с точностью 0.1 °С. Такая точность поддержания температуры используется в оборудовании для химических и медицинских исследований – это позволяет точно контролировать

скорость реакций, а также в прецизионной измерительной технике – так как при такой стабильности температуры обеспечивается стабильность образцовых источников, имеющих типовые температурные коэффициенты 1-5 ppm/°C на уровне лучше 10^{-6} .

Для достижения указанной цели были поставлены и успешно решены следующие задачи:

- 1) Составление и монтаж электрической схемы
- 2) Написание программы для контроллера, позволяющей задавать температуру термостабилизации и считывать показания термодатчиков
- 3) Сборка стенда
- 4) Снятие зависимости температуры образца от времени

Теоретическая часть

Возникновение тепловых эффектов в элементе Пельтье связано с контактной разностью потенциалов между полупроводниками. Рассмотрим причину возникновения контактной разности потенциала в металлах.

Вследствие теплового движения электроны могут отрываться от поверхности металлов на небольшие расстояния. Под слоем электронов на поверхности металла согласно закону сохранения заряда возникает нескомпенсированный положительный заряд. Эти заряды в силу кулоновского взаимодействия притягивают вырвавшиеся электроны обратно в металл. Положительные ионы и электроны над поверхностью металла образуют двойной электрический слой. В результате их взаимодействия в поверхностном слое металлов появляется электрическое поле (за пределами двойного слоя поле отсутствует), возникает разность потенциалов между точками внутри металла и за пределами двойного электрического слоя (рис.1). Работой выхода электрона из металла называется наименьшая энергия, которая необходима для удаления электрона за пределы двойного слоя. Согласно предыдущим рассуждениям эту работу можно выразить

через разность значений потенциала в металле и за пределами двойного электрического слоя. Положим потенциал на бесконечности равным нулю, тогда $A = e\varphi$, φ – потенциал поля внутри металла

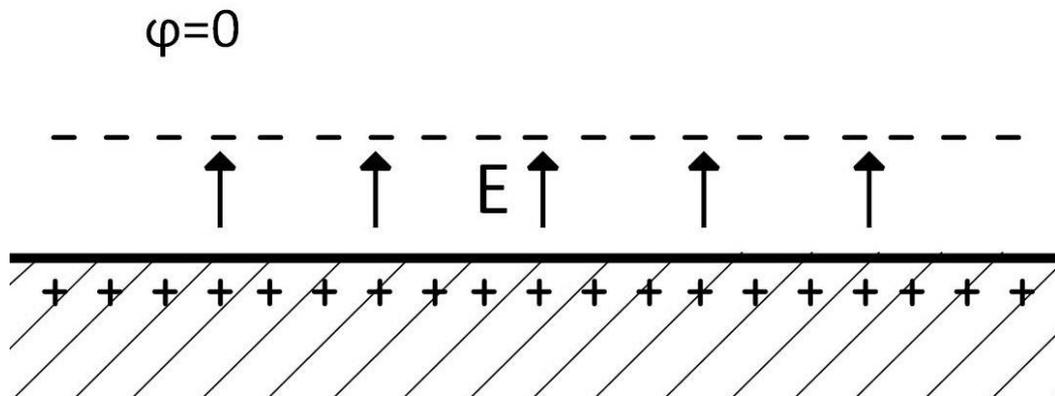


Рис.1. Двойной электрический слой над поверхностью металла

Теперь рассмотрим контакт двух металлов с разной работой выхода и концентрацией свободных электронов: для определённости примем, что $A_1 > A_2$ и $n_1 > n_2$ (рис.2). Так как поток электронов через границу зависит от концентрации, будет наблюдаться направленное движение электронов из металла с большей концентрацией электронов в металл с меньшей до тех пор, пока не будет достигнуто динамическое равновесие. В результате металл 1 зарядится отрицательно, а металл 2 положительно, взаимодействие uncompensated charges приводит к возникновению разности потенциалов между металлами, называемой внутренней разностью потенциалов. При этом разность потенциалов, возникающую из-за работ выхода, будем называть внешней разностью потенциалов. Таким образом, в силу потенциальности электрического поля можно установить связь между внутренней и внешней разностью потенциалов.

$$e(\varphi_A - \varphi_D) = A_1$$

$$e(\varphi_B - \varphi_C) = A_2$$

$$A_1 - A_2 + e(\varphi_{B1} - \varphi_{B2}) + e(\varphi_B - \varphi_A) = 0$$

Внутренняя разность потенциалов возникает из-за разности концентраций свободных электронов в металлах. В таком случае к распределению электронов в системе из двух металлов можно применить классическое распределение частиц по энергиям в потенциальном поле:

$$\frac{n_1}{n_2} = \exp\left(-\frac{w_1 - w_2}{kT}\right) = \exp\left(-\frac{e(\varphi_{B2} - \varphi_{B1})}{kT}\right)$$

$$\varphi_{B2} - \varphi_{B1} = -\frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$$

Тогда можем получить выражение для внешней разности потенциалов:

$$\varphi_B - \varphi_A = \frac{A_2 - A_1}{e} - \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$$

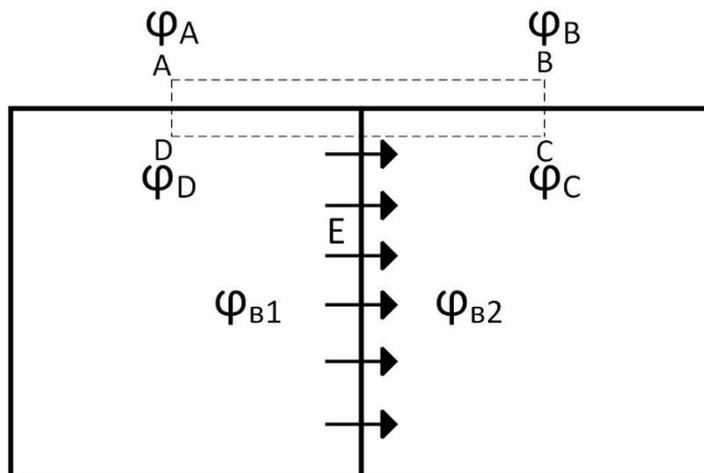


Рис. 2. Контакт двух металлов

Теперь рассмотрим прохождение электрона через границу раздела двух металлов. Каждый электрон при своём движении переносит не только свой заряд, но и присущую ему энергию. Поэтому при наличии электрического тока в проводнике возникает определённый поток энергии. Плотность потока электронов через раздел $\frac{j}{e}$. Энергия электронов складывается из их кинетической и потенциальной энергии. Тогда поток энергии можно выразить через уже известные величины:

$$P = -(\overline{W_K} - e\varphi) \frac{j}{e}$$

$\overline{W_K}$ – средняя кинетическая энергия рассматриваемой группы электронов
 φ – потенциал поля

При рассмотрении двух контактирующих проводников при одинаковой температуре ясно, что поток энергии, подводимый к границе раздела, не равен отводимому потоку, таким образом выделяется (или поглощается) тепло, которое и называется теплом Пельтье.

$$Q_{\Pi} = (P_1 - P_2)St = ((\overline{W_{K2}} - \overline{W_{K1}}) + e(\varphi_1 - \varphi_2)) \frac{j}{e} St$$

Также вводится коэффициент Пельтье Π :

$$Q_{\Pi} = \Pi j St$$

При одинаковой температуре можем считать, что $W_{K1} \approx W_{K2}$. Тогда выражение для коэффициента Пельтье принимает следующий вид:

$$\Pi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2}$$

Теперь рассмотрим устройство элемента Пельтье. Уравнения, полученные для эффекта Пельтье в металлах справедливы и для р-п переходов полупроводников: электроны, проникая в р-область рекомбинируют с дырками, а дырки в п-области рекомбинируют с электронами. Каждый из типов носителей переносит соответствующий электрический заряд, что приводит к тому, что вблизи границы раздела р-область получает избыточный отрицательный заряд, а п-область – положительный. Таким образом, при прохождении тока в направлении р-п энергия выделяется, а при прохождении тока в направлении п-р - поглощается (рис.3).

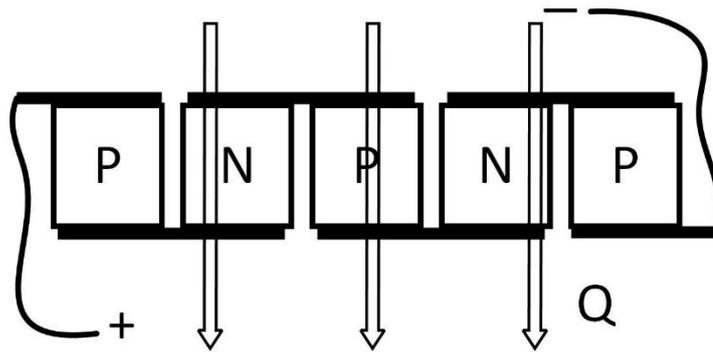


Рис. 3. Схема элемента Пельтье

Описание эксперимента

Через программное обеспечение задаётся температура термостабилизации (ниже комнатной), после чего элемент Пельтье посредством охлаждения образца доводит температуру до заданной величины оптимальным путём, что можно пронаблюдать на графиках зависимости температуры от времени. Если заданная температура выше текущей температура образца, то элемент Пельтье временно отключается до тех пор, пока вследствие теплопроводности и контакта с окружающей средой температура образца не поднимется выше заданной.

Описание установки

Для достижения задачи, заключающейся в термостабилизации образца, был собран стенд, электрическая схема которого представлена на рис.4.

К собранному стенду подключается платформа Arduino Uno, элемент Пельтье, вентилятор, необходимый для охлаждения нагревающейся части элемента Пельтье, источник питания 15В для усилителей и драйвера (рис. 5). Также был написана микропрограмма (скетч Ардуино) управляющая установкой, и использующая для термостабилизации ПИД-регулятор.

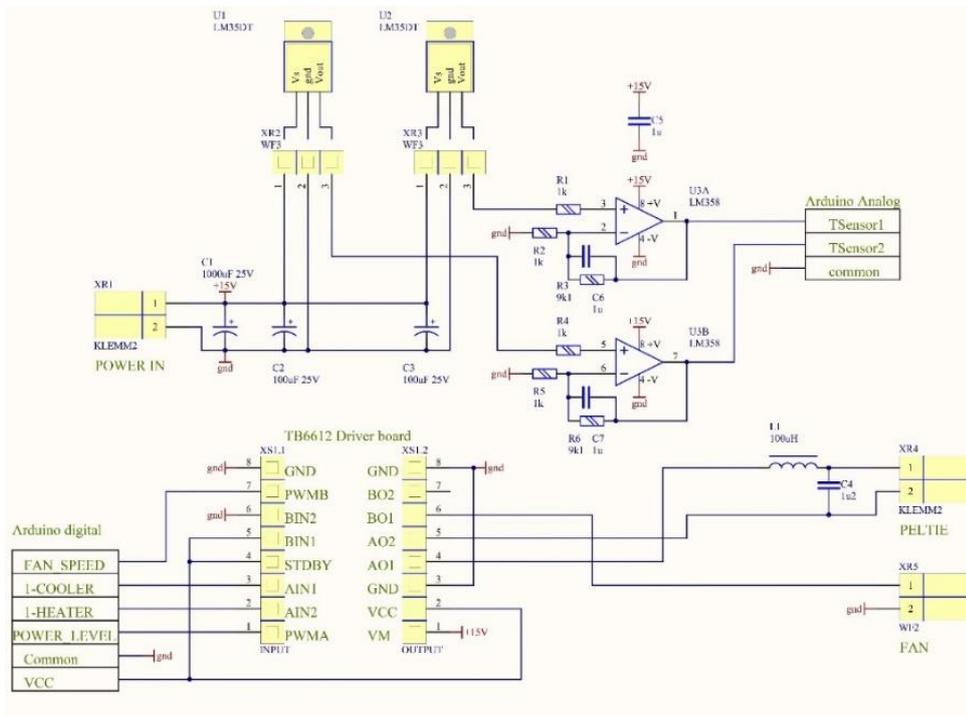


Рис. 4. Электрическая схема стенда

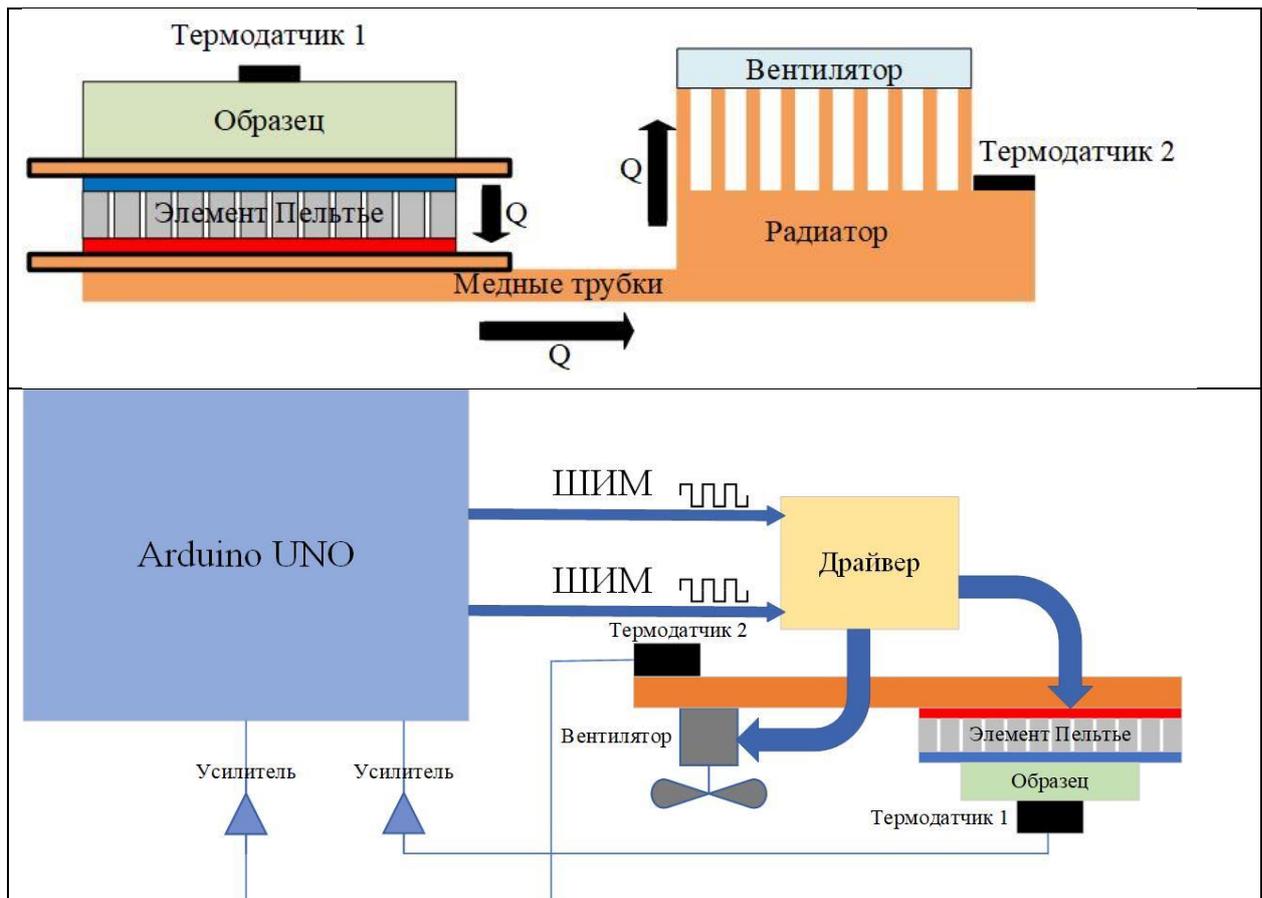


Рис. 5. Блок схема стенда

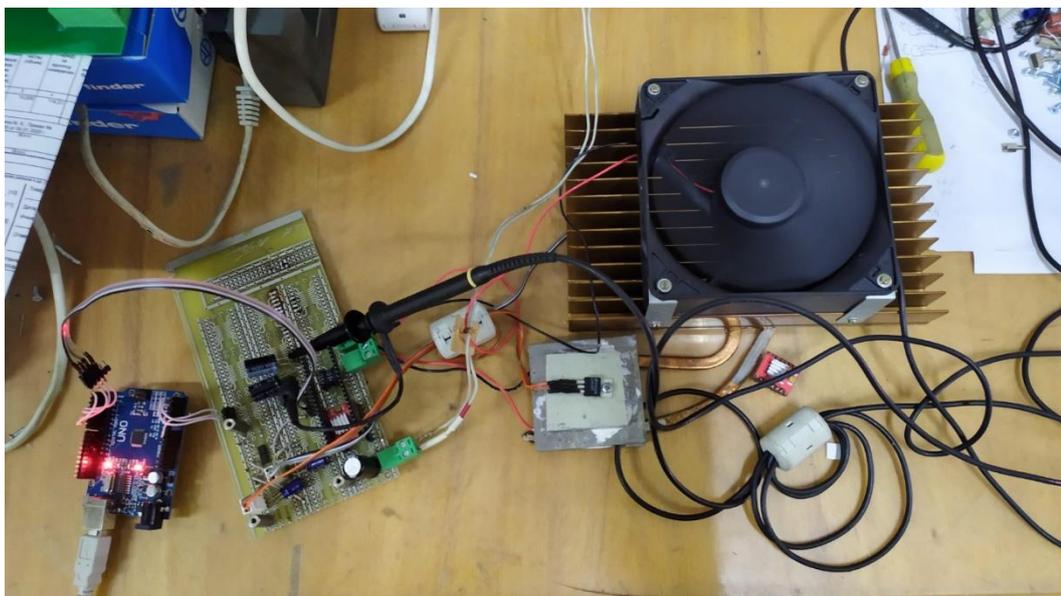


Рис. 6. Собранный стенд

Программа позволяет задавать температуру (ниже комнатной), до которой необходимо довести образец.

Нижняя нагревающаяся поверхность элемента Пельтье посредством термопасты соединяется с медной пластиной. Тепловые трубки соединяют пластину и массивный медный радиатор, охлаждаемый вентилятором. Данная конструкция позволяет эффективно отводить тепло от нагревающейся поверхности, что снижает её влияние на термостабилизацию. Верхняя охлаждающаяся сторона элемента Пельтье так же посредством термопасты соединена с металлическим образцом. На радиаторе и верхней стороне металлического образца расположены термодатчики, позволяющие отслеживать температуру в режиме реального времени.

Результаты

Термостабилизация

В ходе эксперимента последовательно были заданы три температуры: 10°C, 15°C, 5°C, на которых было необходимо термостабилизировать образец. Температура с датчиков записывалась с интервалом в одну секунду, после чего

полученные данные были преобразованы в график зависимости температуры радиатора и образца от времени (рис.7).

Также с помощью дополнительного оборудования были сняты термограммы образца в каждом стабильном состоянии.

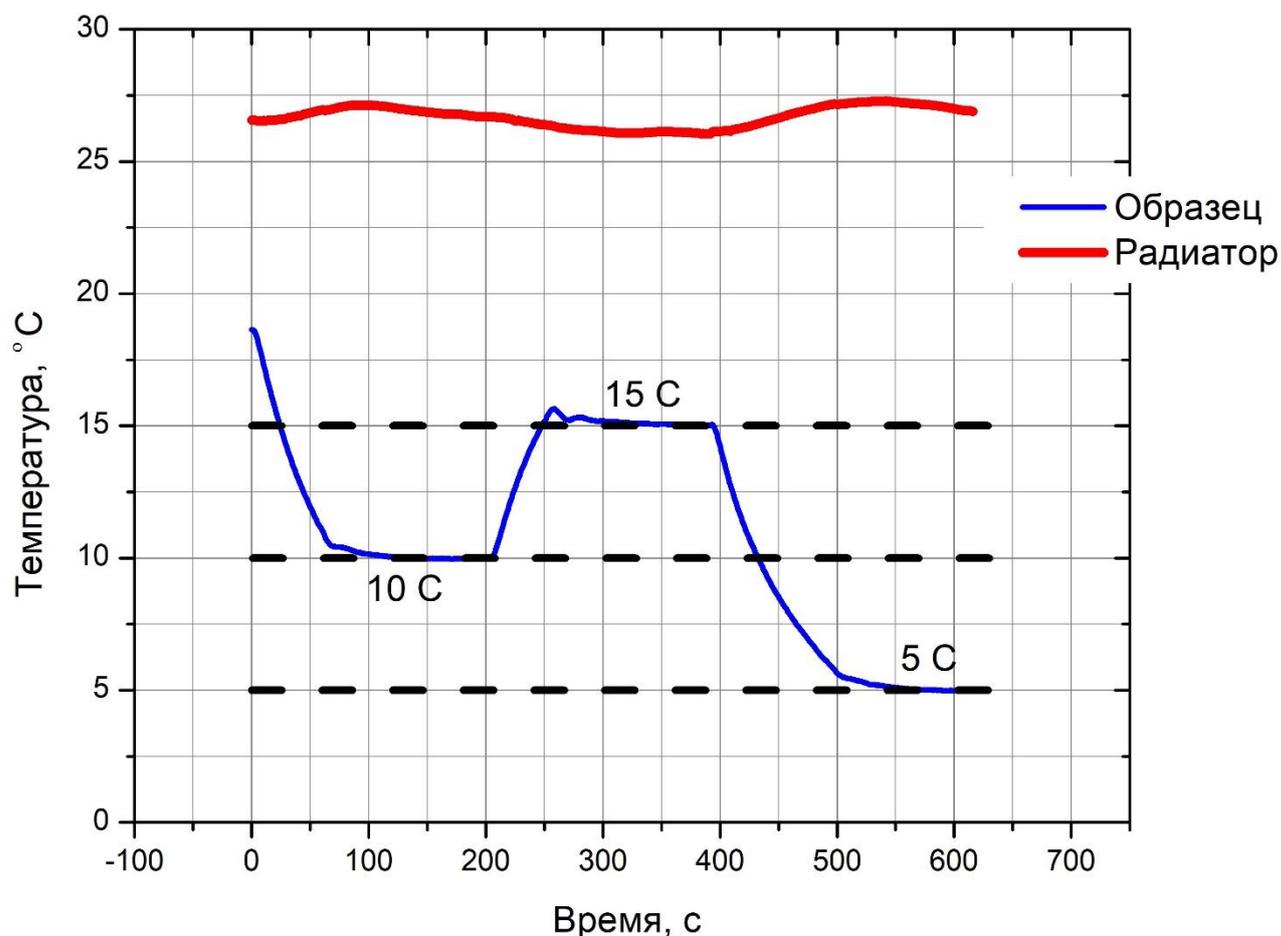


Рис.7. Зависимость температуры образца от времени

Измерение холодопроизводительности

Для нахождения холодопроизводительности были произведены замеры температуры от времени на фиксированных мощностях тока, подаваемых на элемент Пельтье. В начальный момент разность температур между металлическим образцом и окружающим воздухом равна нулю, а так как конвекция и теплопроводность линейно зависят от модуля разности температур,

то в начальный момент пренебрежём этими эффектами. В данных рассуждениях было предположено, что температура образца однородна, что было подтверждено термограммой стенда во время охлаждения образца(рис.8)

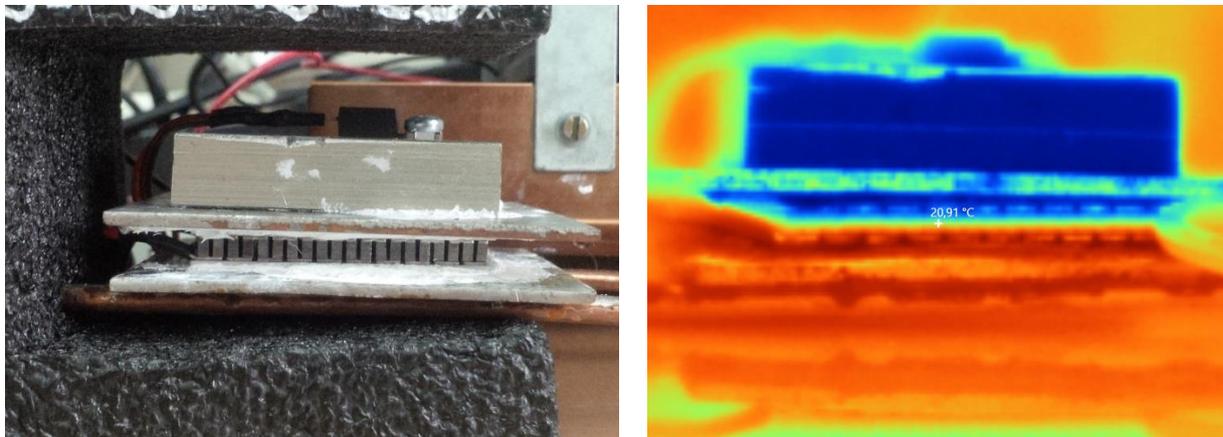


Рис.8. Изображение образца в видимом и инфракрасном диапазоне

Тогда можно считать, что в начальный момент времени изменение температуры образца происходит только за счёт потока энергии в элементе Пельтье, запишем уравнение баланса энергии:

$$dQ_x = (mc + MC) dT$$

$c=904$ Дж/(кг·град)-теплоёмкость дюралюминиевого образца, $C=381$ Дж/(кг·град)-теплоёмкость медной пластины, $m=40$ граммов – масса образца (4x4x0,9 см),
 $M=48$ граммов– масса медной пластины (6x6x0,15 см)

Если представить dQ_x как произведение хладопроизводительности P на время dt , то после преобразования получим уравнение для определения хладопроизводительности:

$$P = (mc + MC) \frac{dT}{dt} = 54,45 \frac{\text{Вт сек}}{\text{град}} \cdot \frac{dT}{dt}$$

Значение производной получим как значение тангенса угла наклона касательной к графику зависимости температуры от времени в начальный момент (когда разность температур между образцом и окружающим воздухом равна нулю) рис 6,7,8. Погрешность связана с погрешностью измерения

температуры термодатчиком (0,1°C) и частотой поступления данных о температуре (1Гц).

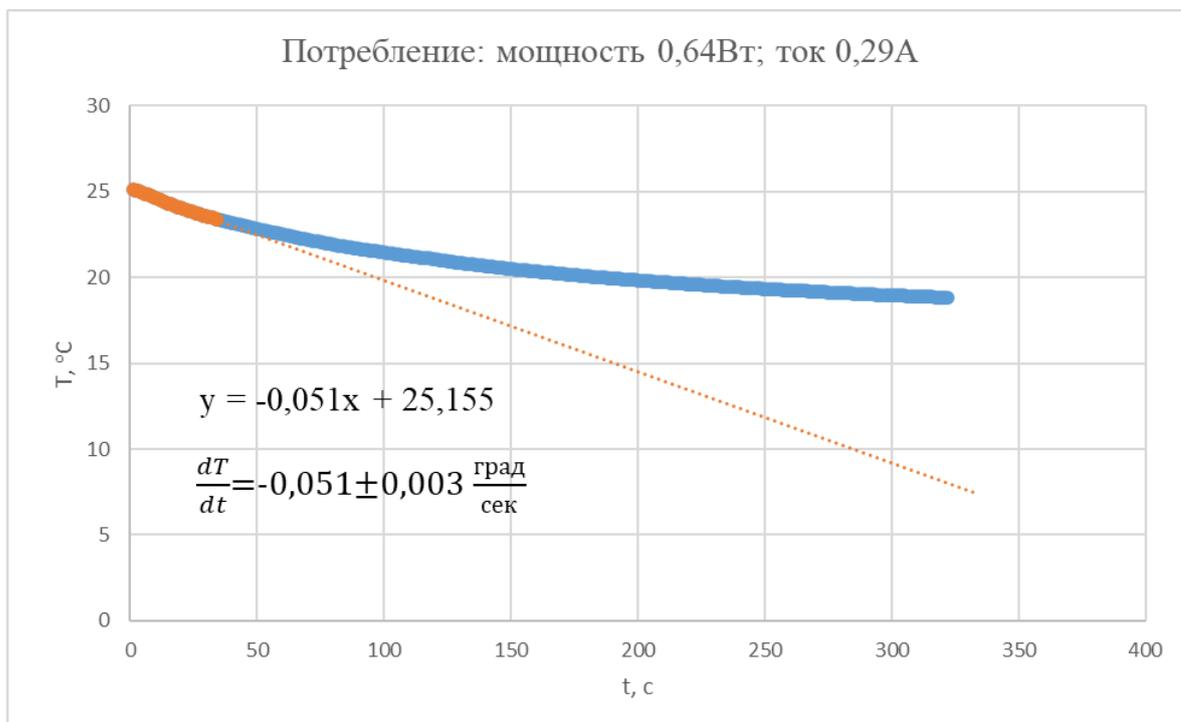


Рис. 9. Определение холодопроизводительности при мощности 0,64 Вт

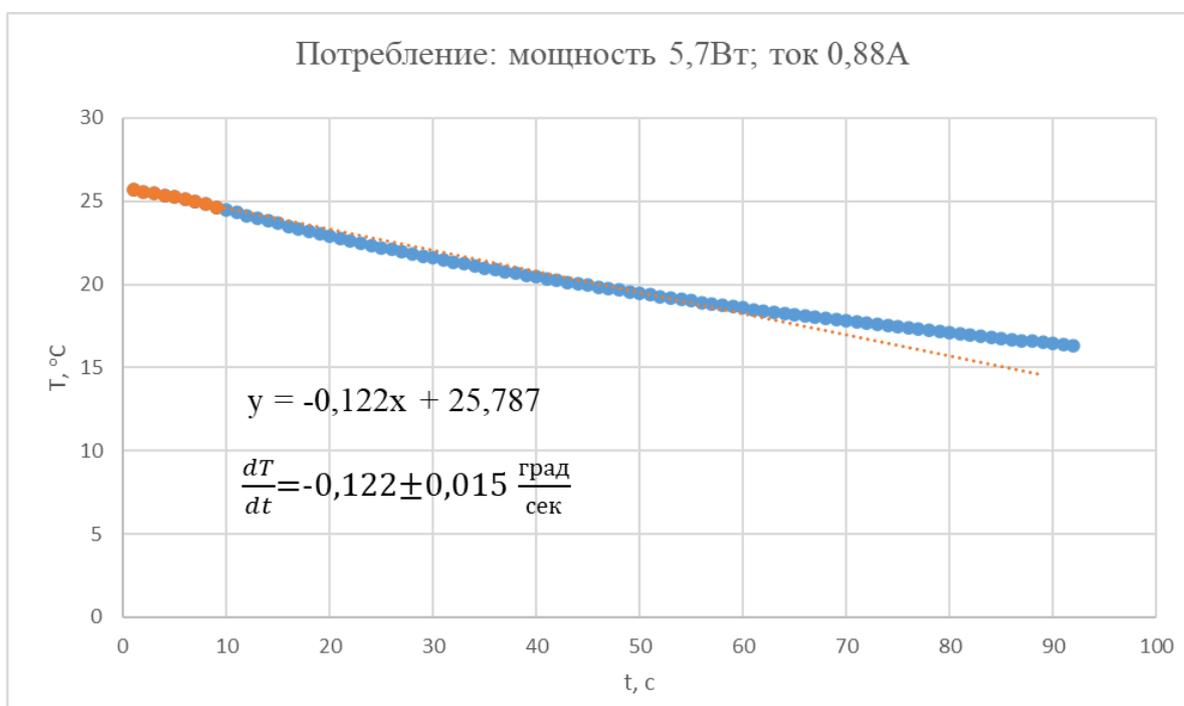


Рис. 10. Определение холодопроизводительности при мощности 5,7 Вт

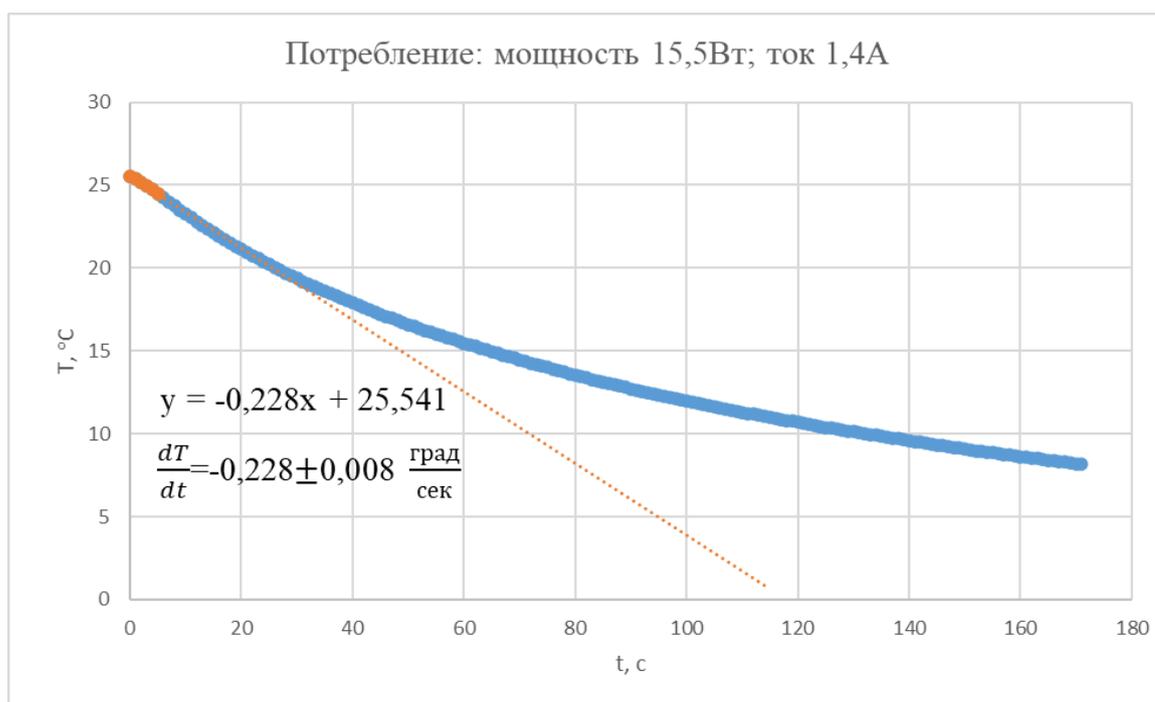


Рис. 11. Определение холодопроизводительности при мощности 15,5 Вт

Таким образом полученные значение холодопроизводительности при различной потребляемой мощности приведены в таблице.

Таблица. Полученные и расчётные данные для элемента Пельтье

Потребляемая мощность Q, Вт	Потребляемый ток, А	Значение производной, град/сек	Холодопроизводительность P, Вт	$\frac{P}{Q}$
0,64	0,29	0,051±0,003	2,77±0,16	4,33±0,25
5,70	0,88	0,122±0,015	6,64±0,82	1,16±0,14
15,50	1,40	0,228±0,008	12,41±0,44	0,80±0,03

Эти данные можно сравнить с расчётными данными, заявленными производителем (рис.12).

По данным, рассчитанным производителем, видно, что мощность элемента Пельтье в собранной установке гораздо меньше заявленной. Это связано с тем, что производитель в своих расчётах не учитывает тепло Джоуля-Ленца, выделяющееся в элементе Пельтье.

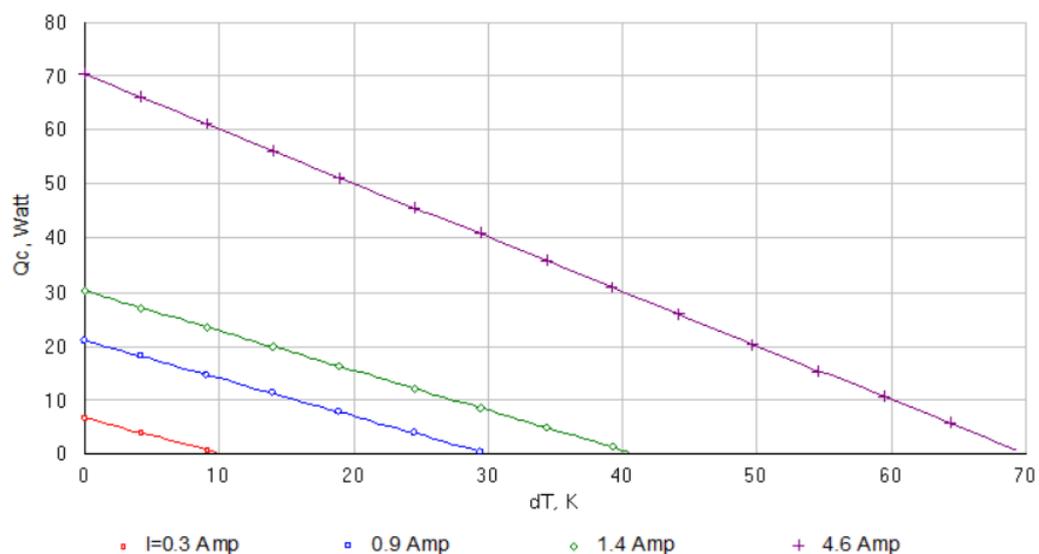


Рис. 12. Паспортные данные элемента Пельтье

Как видно из результатов, на малых мощностях термоэлектрический модуль имеет высокий КПД, сравнимый с таковым для термодинамических тепловых насосов, однако при увеличении мощности затраты энергии начинают превышать теплопроизводительность, как и предсказывает теория: эффект Пельтье прямо пропорционален току через элемент, а мощность, потребляемая элементом от источника питания растет от тока квадратично.

Выводы

Был собран стенд для изучения термоэлектрического модуля Пельтье. Была достигнута точность стабилизации образца на уровне 0,1 °С. Для этого потребовалось обеспечить минимальный уровень шумов в тракте измерения температуры, для чего использовались усилитель сигнала с термодатчика и режим работы АЦП контроллера с усредняющим фильтром. Была разработана методика измерения и по ней измерена теплопроизводительность модуля Пельтье при разных токах.

Список литературы

1. Калашников С.Г. Электричество: Учебное пособие. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985. – (Общий курс физики). – 576 с. ил.
2. Савельев И. В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т. Т. 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц. 3-е изд., испр. — М.; Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. — 320 с.
3. Винтайкин Б.Е. Физика твёрдого тела: Учебное пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 360 с.: ил. (Физика в техническом университете/ Под ред. Л.К. Мартинсона, А.Н. Морозова).
4. Программа KRYOTHERM
<https://kryothermtec.com/ru/kryotherm-software.html>