

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

Физический факультет

Кафедра общей физики

Сарыпов Даниил Игоревич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Исследование эффективности конструкции термоэлектрических
модулей**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18304

Научный руководитель:

д.ф.-м.н. Бердников В. С.

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума:

к.ф.-м.н. Максимов В. В.

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Оглавление

1. Введение.....	3
2. Теоретическая часть.....	4
2.1 Термопары.....	4
2.2 Эффект Зеебека.....	4
2.3 Эффект Пельтье.....	5
2.4 Эффект Томсона.....	6
2.5 Полупроводники.....	8
2.6 Принцип работы тепловизора.....	9
3. Описание установки и эксперимента.....	10
4. Результаты эксперимента.....	11
4.1.Результаты измерений термопарами	11
4.2.Результаты измерений тепловизором.....	13
5.Выводы.....	15
6. Список литературы.....	15

1 Введение

Термоэлектрический модуль (ТЭМ) — это устройство, представляющее собой множество последовательно соединённых с помощью медных пластин полупроводников с p - и n - проводимостью. В основе работы термоэлектрического модуля лежит эффект Пельтье [1], описание которого дано в следующем разделе.

В современном мире количество используемой электронной техники довольно велико, она находит применение во всех сферах человеческой жизни: и в научных исследованиях, и в медицине, и в быту, в связи, с чем высок спрос и на качественное охлаждение электронных компонентов. Благодаря таким преимуществам, как малые габариты, способность развить большую разность температур относительно окружающей среды (для однокаскадных ТЭМ ΔT до 70K, для четырёхкаскадных - до 140K) термоэлектрические модули хорошо справляются с этой задачей. На практике термоэлектрические модули разделяются на однокаскадные и многокаскадные. На рис. 1 изображён однокаскадный ТЭМ, на рис. 2 — четырёхкаскадный, эффективность конструкции которых была изучена в данной работе.



рис.1 Однокаскадный ТЭМ



рис.2 Четырёхкаскадный ТЭМ

2 Теоретическая часть

2.1 Термопары

Известно, что при соединении двух проводников с разными работами выхода и концентрациями свободных носителей заряда в месте их контакта возникает разность потенциалов, называемая *контактной ЭДС*.

Действительно, если концентрация электронов в двух средах разная, то начнётся процесс их диффузии через границу. В результате одна среда будет заряжена положительно, другая — отрицательно и вблизи границы появится разность потенциалов [2].

При этом, если имеется цепь из двух проводников, спаи которых находятся при разных температурах, то в ней возникнет электрический ток. Вольтметр в таком случае будет показывать *ТЭДС*, соответствующее разности температур спаев. Например, для пары медь-константан (при $\Delta T = 100\text{K}$) — 4 мВ, железо-медь (при $\Delta T = 100\text{K}$) — 1.05 мВ [2]. На этом явлении, именуемом *эффект Зеебека*, и основана работа термопар.

2.2 Эффект Зеебека

Как уже говорилось выше, эффект Зеебека — явление возникновения разности потенциалов при нагреве одного из спаев двух разных металлов или полупроводников и охлаждении другого в замкнутой цепи.

Рассмотрим схему, изображённую на рисунке 3. Имеется два контакта разных проводников 1 и 2, на которых возникает скачок напряжения. Если они находятся при одинаковой температуре, то вольтметр ничего не покажет: контактные ЭДС скомпенсированы. Пусть теперь температуры точек *B* и *C* различны. Тогда контактные ЭДС не будут скомпенсированы и в цепи появится электрическое поле, возникнет ток [3].

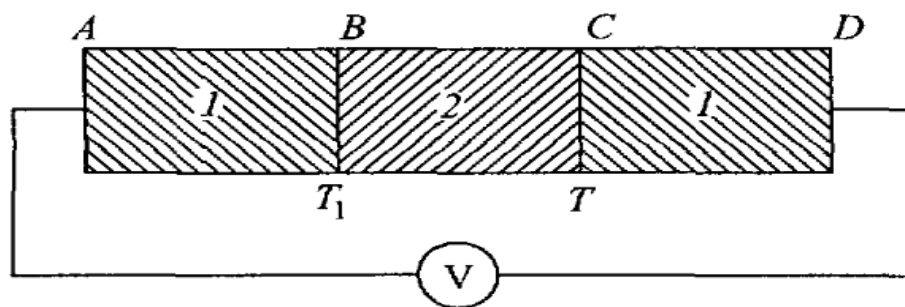


рис. 3

Помимо этого, в силу разных температур, будет происходить диффузия электронов от горячего спая к холодному. В случае полупроводников, для которых концентрация электронов растёт с увеличением температуры, появится дополнительный ток, связанный с различием концентраций электронов в горячем и холодном спаях [2]. Возникшее в результате этих процессов электрическое поле будет таким, что вызванное этим полем движение полностью скомпенсирует диффузионный ток. В таком случае вольтметр будет показывать разность потенциалов, называемую *термо-ЭДС*. В общем случае величина термо-ЭДС зависит от температуры, однако при достаточно малых диапазонах измерений температур можно считать зависимость линейной: $\varepsilon(T) = \alpha(T - T_1)$, где α — чувствительность термопары (коэффициент термоэлектродвижущей силы). При этом существуют термопары, для которых линейность справедлива в достаточно широких диапазонах перепадов температуры: (Cu, Bi), (Au, Cu) [3].

2.3 Эффект Пельтье

В зависимости от направления протекания тока, в месте контакта двух проводников помимо джоулева тепла выделяется либо поглощается дополнительная теплота. Данное явление получило название *эффект Пельтье*.

Выделяемое или поглощаемое тепло Пельтье пропорционально заряду q , прошедшему через спай [2]:

$$Q_{\text{П}} = \Pi \cdot q = \Pi \cdot It,$$

где I — полный ток через спай, Π — коэффициент Пельтье.

Чтобы продемонстрировать причину его возникновения, рассмотрим область вблизи контакта проводников, находящихся при одной температуре, через которую течёт ток с плотностью $\mathbf{j}$. Энергия, подводимая потоком электронов со стороны проводника 1 на единицу площади контакта в единицу времени равна:

$$P_1 = \frac{-j}{e} (\bar{W}_k - e\varphi_1), \quad (1)$$

где $\bar{W}_k$ — средняя кинетическая энергия электронов в потоке, φ_1 — потенциал проводника 1 вблизи контакта. Аналогичное выражение получается для второго проводника (P_2). Поскольку потенциалы φ_1 и φ_2 разные, то разность ($P_1 - P_2$) не равна нулю. Эта разность и есть тепло Пельтье. Таким образом, если S — площадь контакта, то:

$$Q_{\text{П}} = \frac{1}{e} [(\bar{W}_{k2} - \bar{W}_{k1}) + e(\varphi_1 - \varphi_2)] It,$$

$$\Pi = \frac{1}{e} [(\bar{W}_{k2} - \bar{W}_{k1}) + e(\varphi_1 - \varphi_2)]$$

2.4 Эффект Томсона

Эффект Томсона — это явление выделения или поглощения теплоты в неравномерно нагретом проводнике в зависимости от направления протекания тока.

Обозначим за Q_T теплоту Томсона, тогда, оказывается, энергия, выделяющаяся в единице объёма проводника в единицу времени пропорциональна градиенту температур [2]:

$$\frac{Q_T}{Vt} = \sigma \frac{dT}{dx} j,$$

где σ — коэффициент Томсона, зависящий от рода проводника и его

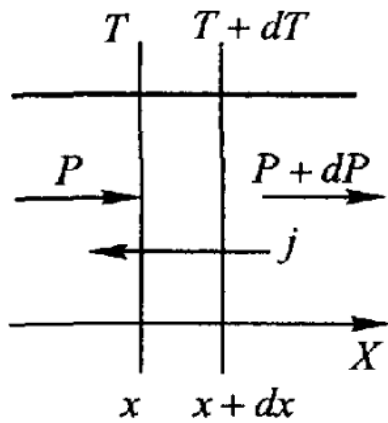


рис. 4

состояния, j — объёмная плотность тока.

В сущности эффект Томсона похож на эффект Пельтье, ведь в данном случае неоднородность проводников представляется разностью температур, а в эффекте Пельтье — разными химическими свойствами.

Чтобы это увидеть, применим тот же принцип, что и при рассмотрении эффекта Пельтье: рассмотрим в проводнике тонкий

слой с температурами T и $(T + dT)$ на границах соответственно (рис. 4).

Электроны двигаются против j , и таким образом в объём втекает энергия P , а вытекает — $(P + dP)$. Тогда в этом объёме будет выделяться энергия:

$$\frac{Q}{Vt} = \frac{P(x) - P(x + dx)}{dx} = \frac{-dP(x)}{dx}$$

Теперь, подставив сюда выражение для P из (1), получим:

$$\frac{Q}{Vt} = \frac{j}{e} \cdot \frac{d\bar{W}_k}{dx} - j \frac{d\phi}{dx},$$

где $-d\phi/dx = E$ — напряжённость поля в проводнике, а среднюю кинетическую энергию, как функцию температуры, можно представить в виде:

$$\frac{d\bar{W}_k}{dx} = \frac{d\bar{W}_k}{dT} \cdot \frac{dT}{dx},$$

Тогда получим следующее соотношение:

$$\frac{Q}{Vt} = \frac{j}{e} \cdot \frac{d\bar{W}_k}{dT} \cdot \frac{dT}{dx} - jE$$

Из него видно, что второй член соответствует джоулеву теплу в расчёте на единицу объёма в единицу времени, а первый — теплоте Томсона.

2.5 Полупроводники

Как известно, концентрация электронов в металлах ввиду слабой связи их с ядрами атомов практически не зависит от температуры, однако существуют вещества, в которых тепловое движение способствует увеличению количества носителей заряда. Такие вещества называются *полупроводниками* [4].

Полупроводники характеризуются широким диапазоном удельного сопротивления $10^{-2} — 10^8$ Ом·см (проводники имеют удельное сопротивление $10^{-6} — 10^{-3}$ Ом·см) и, что актуально в рамках данной работы, большой величиной коэффициента термо-ЭДС: для некоторых термопар $\alpha \approx 1000$ мкВ/К. Например, для Cu_2O $\alpha = 1200$ мкВ/К [3]. Помимо этого преимуществом полупроводников над металлами в области применения термоэлектричества является то, что для полупроводников эффект Пельтье выражен значительно сильнее, нежели для металлов.

Различают полупроводники *n* — типа (электронная проводимость) и *p* — типа (дырочная проводимость). В проводниках с дырочной проводимостью носителями заряда являются «дырки» - вакантные места в атомах с отсутствующей связью. При наличии поля электроны с соседних атомов занимают это место, а на предыдущем месте образуется «дырка», и процесс повторяется многократно, что эквивалентно движению положительно заряженных частиц по полю. Если же в кристалле содержится примесь с большей валентностью, чем у окружающих атомов, то такой полупроводник будет обладать электронной проводимостью.

2.6 Принцип работы тепловизора

Известно, что нагретые тела излучают, причём плотность энергии излучения определяется законом Планка [5]:

$$\rho(\nu, T) = \varepsilon \cdot \frac{8\pi h}{c^3} \cdot \frac{\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1},$$

где T — абсолютная температура, ν — частота излучаемого света, h — постоянная Планка, k — постоянная Больцмана, c — скорость света, ε — коэффициент черноты. При переписывании этой формулы через длину волны света λ , то максимум излучаемой энергии будет достигаться при $\lambda_m T \approx 3000$ мк·К. При комнатной температуре $\lambda_m \approx 10$ мкм, что соответствует инфракрасному диапазону. Таким образом, если рядом находятся тела при разных температурах, то можно зафиксировать разность их излучения. На этом принципе и работает тепловизор, который преобразует излучение неравномерно нагретых объектов в изображение в видимом диапазоне.

3 Описание эксперимента

Для того, чтобы изучить эффективность охлаждения с помощью однокаскадного и четырёхкаскадного ТЭМ и их работу, была собрана экспериментальная установка, схема которой изображена на рис.5 Измерения температуры поверхностей ТЭМ проводились термопарами и тепловизором. Для этого к нижней и верхней керамической пластине термоэлектрического модуля 1 (см. рис. 1, 2) были приклеены горячие спаи дифференциальной термопары 3, холодный спай которой был опущен в сосуд Дьюара с таящим снегом 4. Термопары с помощью специального переключателя поочередно подключались к микровольтметру 2. При протекании через ТЭМ тока разной величины, подаваемого с источника 5, охлаждалась верхняя граница ТЭМ и нагревалась нижняя. В эксперименте использовались нихром-

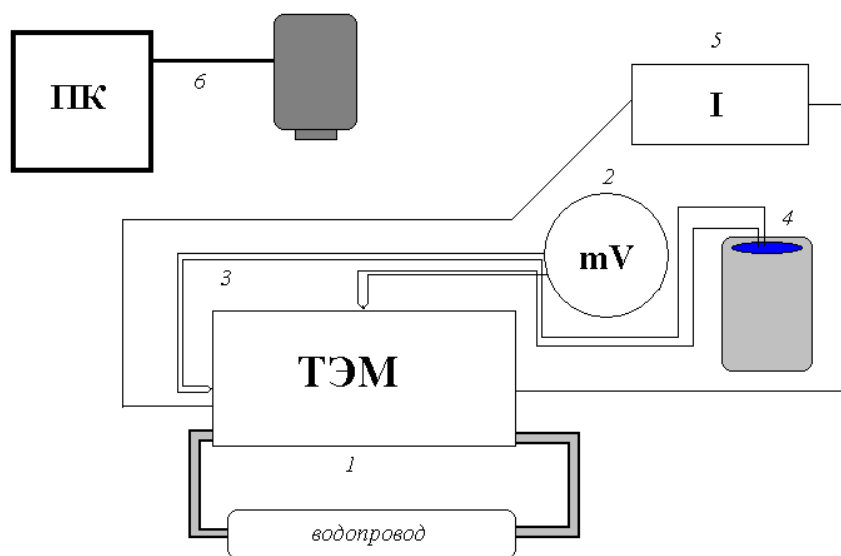


рис. 5 Схема экспериментальной установки: 1 — ТЭМ(четырёхкаскадный или однокаскадный), 2 — микровольтметр, 3 — термопары, 4 — сосуд Дьюара с таящим снегом, 5 — источник тока, 6 — тепловизор, соединённый с ПК

константановые термопары с чувствительностью $\alpha = 40$ мкВ/К. В каждом эксперименте для повышения эффективности работы ТЭМ использовалось дополнительное водяное охлаждение нижней пластины ТЭМ (см. рис.1, 2, 5).

Для измерений тепловизионным способом был использован тепловизор *FLIR X6530sc*, соединённый с персональным компьютером 6. С помощью ПО «*FLIR ResearchIR*» в результате обработки тепловизионных фильмов были получены распределения температуры на пластинах ТЭМ.

4 Результаты эксперимента

4.1 Результаты измерений термпарным способом

В эксперименте с однокаскадным модулем измерения проводились в диапазоне токов 200-1100 мА при температуре в комнате 20.5°C, были построены кривые изменения температуры на пластинах ТЭМ со временем и зафиксирована достигнутая разность температур (ΔT) охлаждаемой и нагреваемой пластин в состоянии равновесия. Для четырехкаскадного модуля измерения проводились в диапазоне 200-300 мА при температуре в комнате

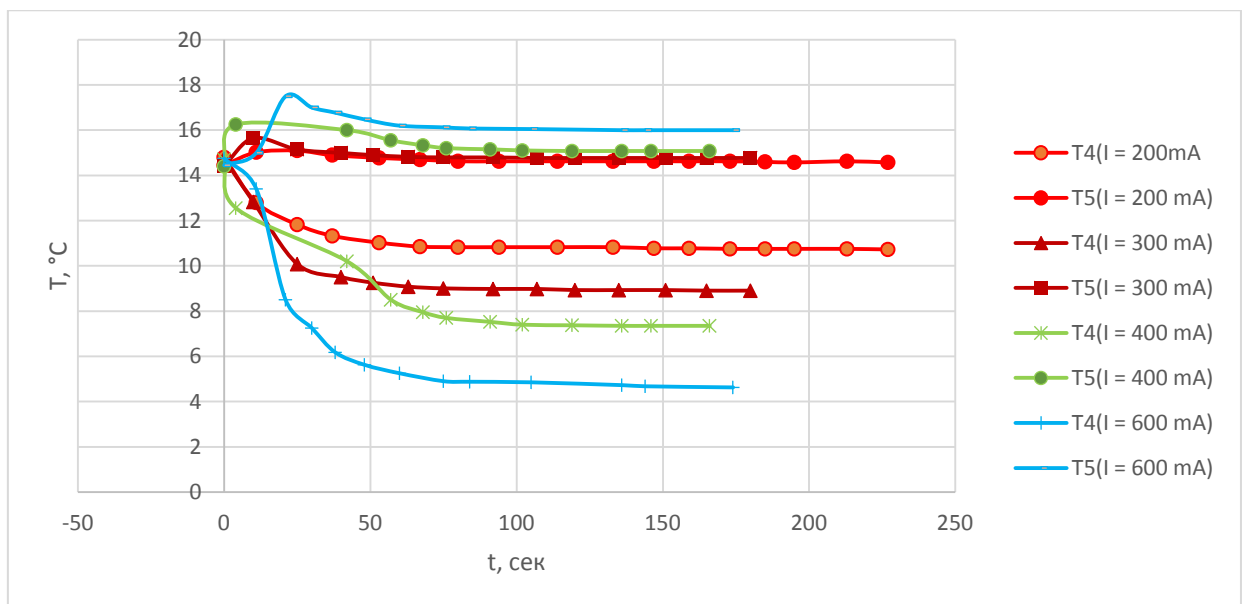


рис. 6. График 1: измерения $T(t)$ для однокаскадного ТЭМ

21.6°C. На рисунке 6 представлены результаты измерений для однокаскадного ТЭМ, где T4 — температура верхней пластины, T5 — температура нижней пластины; на рисунке 7 — измерения для четырехкаскадного ТЭМ, где T1 — температура верхней пластины, T2 —

температура нижней пластины, на рисунках 8,9 – графики зависимости ΔT от протекаемого через ТЭМ тока.

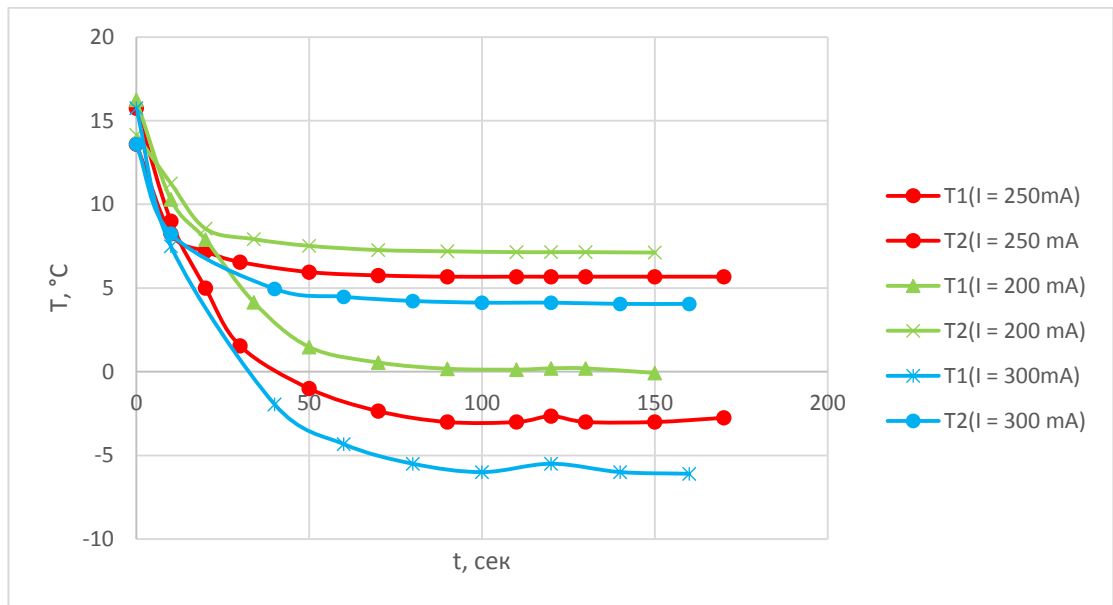


Рис. 7 График 2: измерения $T(t)$ для однокаскадного ТЭМ

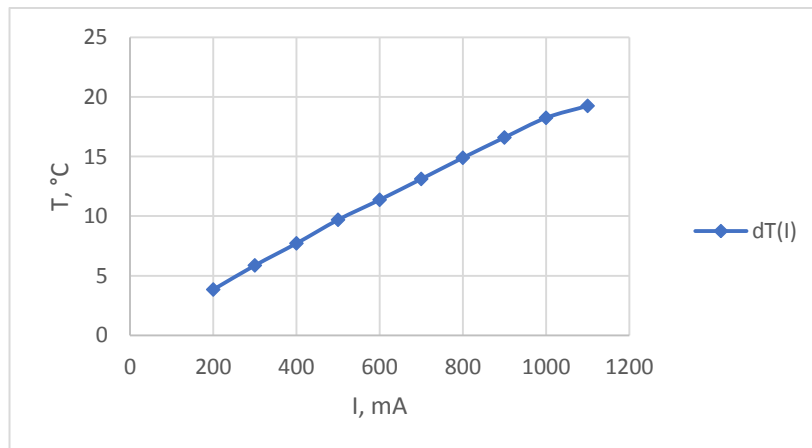


Рис. 8 График 3: $\Delta T(t)$ для однокаскадного ТЭМ

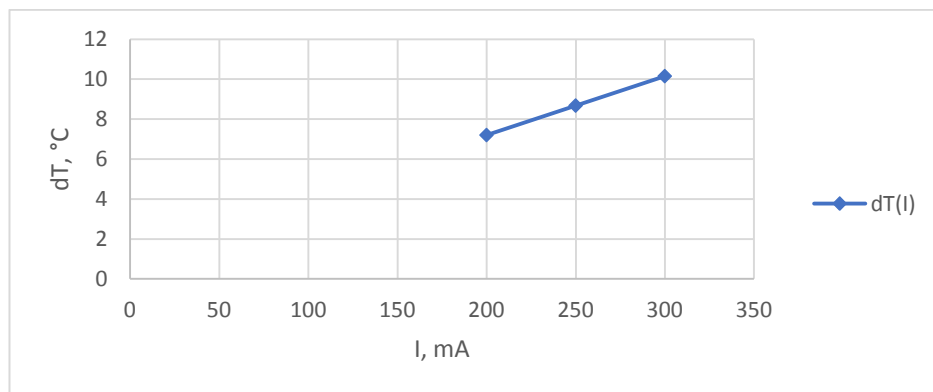


Рис. 9 График 3: $\Delta T(t)$ для четырёхкаскадного ТЭМ

4.2 Результаты измерений тепловизором

С использованием тепловизора *FLIR X6530sc* был снят тепловизионный фильм, отдельные кадры которого приведены на рисунках 12-14.

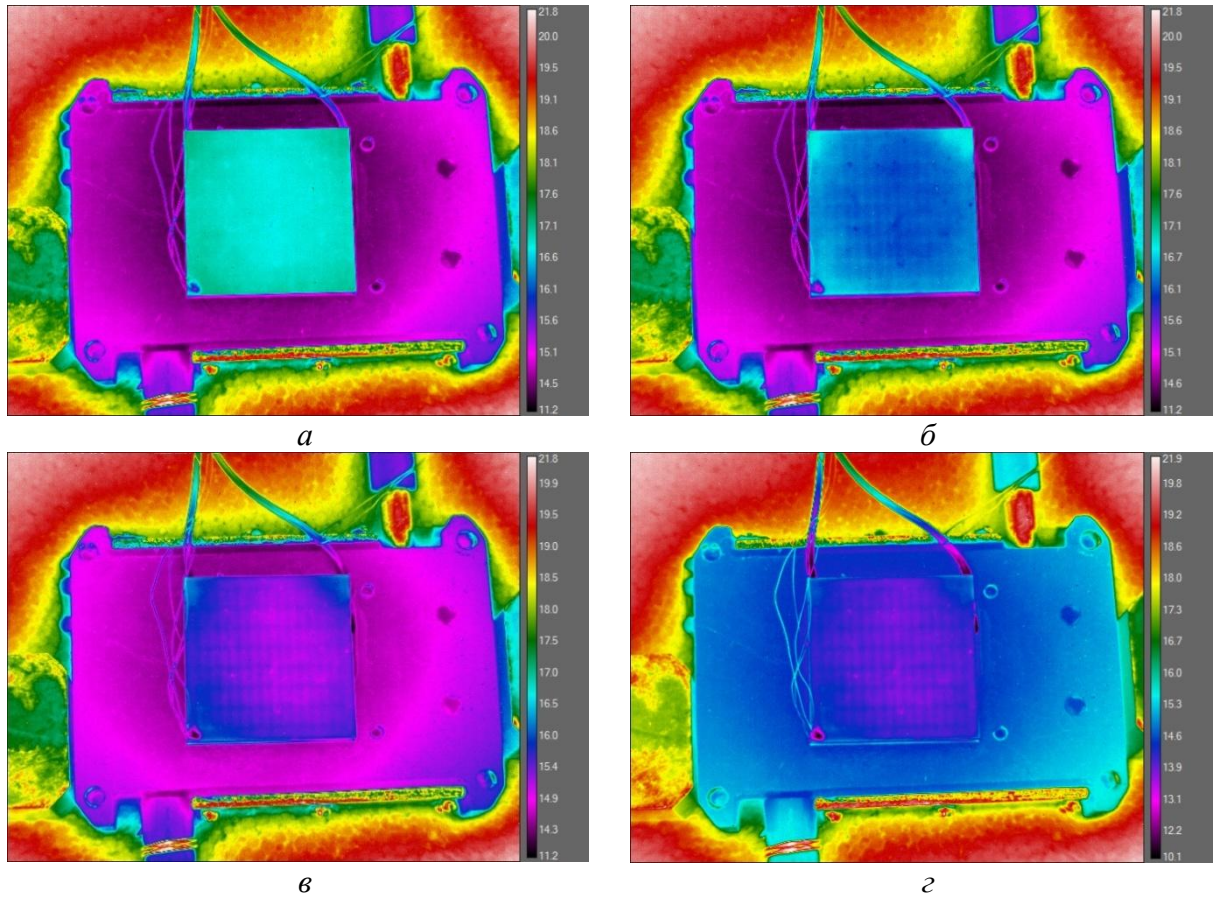
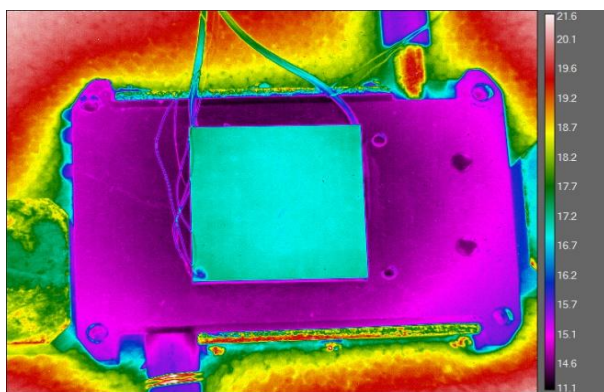
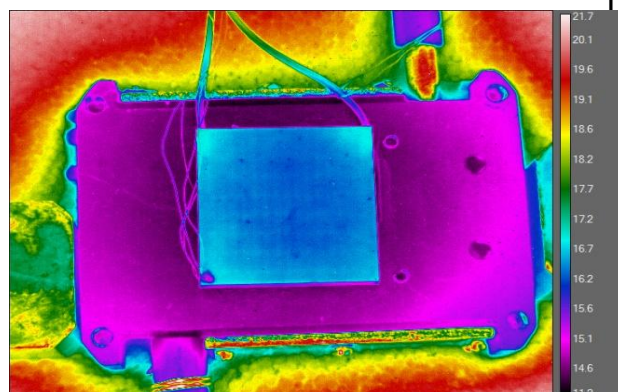


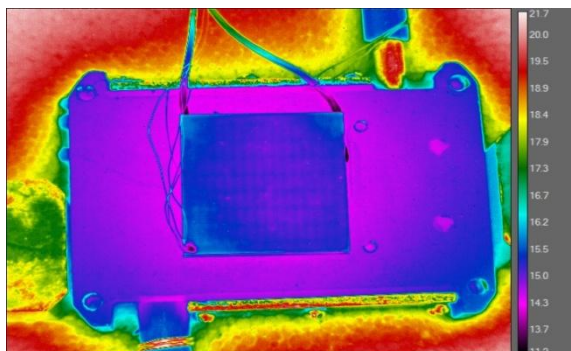
рис. 12 Тепловизионная съёмка при токе $I = 300 \text{ mA}$.
а – 0 секунда, *б* – 15 секунда, *в* – 20 секунда, *г* – 137 секунда



а

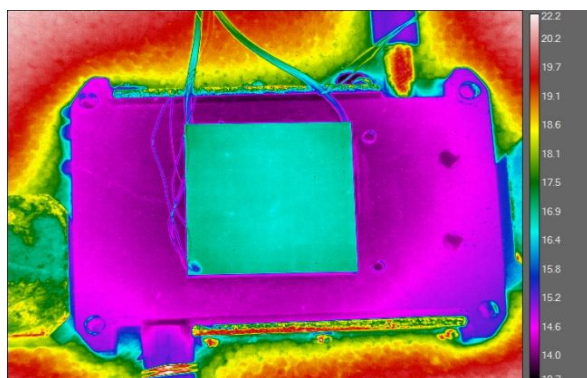


б

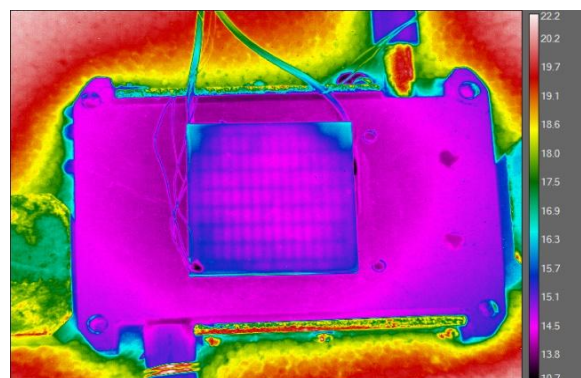


в

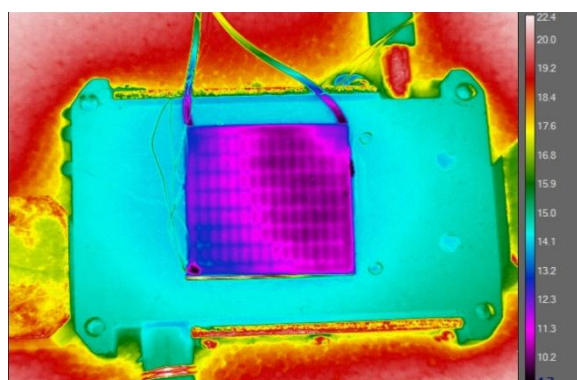
рис. 13 Тепловизионная съёмка при токе $I = 200$ мА.
а – 0 секунда, б – 5 секунда, в – 34 секунда



а



б



в

рис. 14 Тепловизионная съёмка при токе $I = 1100$ мА,
а – 0 секунда, б – 5 секунда, в – 15 секунда

5 Выводы

Из построенных графиков видно, что при том же токе четырёхкаскадный термоэлектрический модуль позволяет создать гораздо большую разность температур между охлаждаемой и нагреваемой поверхностями, нежели однокаскадный, то есть при одинаковой подводимой мощности четырёхкаскадный ТЭМ охлаждает эффективнее, чем однокаскадный. При этом существенную роль играет дополнительный отвод тепла от нижней, «горячей», пластины, т. к. при высоких значениях тока начинается активный теплообмен между нижней и верхней пластиной. Это накладывает ограничение на эффективность охлаждения при помощи ТЭМ.

Из анализа полученных распределений температуры на поверхностях ТЭМ был сделан вывод, что охлаждаемые пластины охлаждаются неравномерно, и разность температур выходит в «режим насыщения» с ростом величиной пропускаемого тока.

6 Список литературы

1. А.Ф.Иоффе, Физика полупроводников. Изд. 2-е испр. и доп. изд. Москва; Ленинград : Изд-во АН СССР, 1957. 492 с.
2. С.Г. Калашников, Электричество.- Изд. 5-е, испр. и доп. Москва: Наука, 1985. 576 с.
3. Д.В. Сивухин, Общий курс физики. Учеб. пособие: Для вузов. В 5 т. ТIII. Электричество. - 4-е изд., Изд-во МФТИ, 2004. 656 с.
4. Х. Кухлинг, Справочник по физике: Пер. с нем. 2-е изд. - М: Мир, 1985. 520 с.
5. Э.М. Спэрроу, Р.Д. Сесс, Теплообмен излучением: Пер. с англ, Изд-во «Энергия», 1971. 282 с.