

УДК 621.362.2

Исследование термоэлектрических явлений

Я.О. Желонкин, студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Плазменные энергетические установки»*

Ф.А. Баучкин, студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Плазменные энергетические установки»*

*Научный руководитель: Онуфриев В.В., д.т.н., профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Плазменные энергетические установки»
duh@power.bmstu.ru*

Термоэлектрический преобразователь (далее ТЭЛП или ТЭГ, если устройство работает в режиме генерации тока) – устройство для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую, принцип действия которого основан на эффекте Зеебека и сопутствующих ему эффектах Пельтье, Томсона и Джоуля.

ТЭГ можно классифицировать по:

- интервалу рабочих температур – на низко-, средне- и высокотемпературные (200...300 °С, 300...600 °С, 600...1400 °С) и материалам термоэлементов (соответственно химические соединения и твёрдые растворы на основе халькогенидов элементов V группы, IV группы периодической системы Д.И. Менделеева и твёрдые растворы Si-Ge);
- области применения – космические, морские, наземные и т. д.;
- типу источника тепла – ядерные (реакторные и изотопные), солнечные, газопламенные и т. д.;
- конструкции – цилиндрические, плоские и кубические.

К настоящему времени коэффициент полезного действия (далее КПД) перспективных ТЭГ составляет ~ 15 %, мощность достигает от нескольких сотен Вт до десятков кВт (в реакторном варианте).

ТЭГ обладают рядом преимуществ перед традиционными электромашинными преобразователями энергии, например турбогенераторами, отсутствием движущихся частей, высокой надёжностью, простотой обслуживания. ТЭГ применяются для

энергоснабжения удалённых и труднодоступных потребителей электроэнергии (автоматических маяков, навигационных буйев, метеорологических станций, активных ретрансляторов, космических аппаратов, станций антикоррозионной защиты газо- и нефтепроводов и т. п.). К недостаткам современных ТЭГ относятся относительно низкий КПД (5...7 %) и высокая стоимость (обусловленная сложностью изготовления «чистых» матриц и легирующих примесей полупроводниковых материалов). Существенным недостатком является эффект деградации электрофизических характеристик (коэффициента термо-ЭДС, теплопроводности, электропроводности) кристаллической решетки материала полупроводников в условиях действия нейтронных потоков и гамма излучения.

Принцип работы ТЭГ основан на эффекте Зеебека и сопутствующих ему эффектах Пельтье, Томсона и Джоуля. Эффект Зеебека был открыт в 1821 г. Томасом Зеебеком. В 1822 г. он опубликовал результаты своих опытов в статье «К вопросу о магнитной поляризации некоторых металлов и руд, возникающей в условиях разности температур», опубликованной в докладах Прусской академии наук. Сущность явления Зеебека состоит в том, что в замкнутой электрической цепи, состоящей из спаянных разнородных материалов, возникает электродвижущая сила (ЭДС), если спаи материалов поддерживаются при разных температурах:

$$dE = \alpha \cdot dT,$$

α (В/°К) – коэффициент термо-ЭДС материала термоэлемента (коэффициент Зеебека); E (В) – ЭДС термоэлемента; dT (°К) – разность температур на горячем и холодном спаях.

Эффект Пельтье был открыт Жан Шарлем Пельтье в 1834 г., однако суть явления исследовал несколькими годами позже (в 1838 г.) Эмилий Ленц. Он провел эксперимент, в котором поместил каплю воды в углубление на стыке двух стержней из висмута и сурьмы. При пропускании электрического тока в одном направлении капля превращалась в лёд, при смене направления тока — лёд таял, что позволило установить, что в зависимости от направления протекающего в эксперименте тока, помимо джоулева тепла выделяется или поглощается дополнительное тепло, которое получило название тепла Пельтье. Таким образом, явление Пельтье представляет собой эффект, обратный эффекту Зеебека, то есть выделение или поглощение тепла на спаях при протекании некоторого количества электричества в замкнутой цепи, состоящей из разнородных проводников:

$$dQ_{II} = \Pi \cdot dI,$$

Π (Дж/А) – коэффициент Пельтье, dI (А) – элементарный ток, протекающий по проводнику.

Явление Томсона было открыто в 1856 г. Уильямом Томсоном. Эффект заключается в том, что если вдоль однородного проводника, по которому протекает электрический ток, существует перепад температур, то в объеме проводника, в зависимости от направления тока, выделяется или поглощается некоторое количество теплоты, именуемое теплотой Томсона:

$$dQ_\tau = \tau \cdot dI \cdot dT,$$

τ (Дж/А·°К) – коэффициент Томсона, dT (°К) – разность температур на концах проводника, dI (А) – элементарный ток, протекающий по проводнику.

Связь всех трех коэффициентов можно получить, записав уравнение теплового баланса в идеальном термоэлементе (ТЭ), где первое слагаемое в левой части соответствует теплоте Пельтье, второе слагаемое – теплоте Томсона, а правая часть уравнения – теплота из термо-ЭДС (мощность ТЭ):

$$\frac{\partial \Pi}{\partial T} \cdot dT \cdot dI + (\tau_1 - \tau_2) \cdot dT \cdot dI = \alpha_{1-2} \cdot dT \cdot dI.$$

Данное уравнение может быть преобразовано к виду:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial T} + (\tau_1 - \tau_2) = \alpha_{1-2},$$

$\alpha_{1-2} = \alpha_1 - \alpha_2$ – результирующий коэффициент термо-ЭДС для пары полупроводниковых материалов.

На рис. 1 приведен баланс тепловых потоков для идеального ТЭ, перепад температуры на котором составляет dT , при протекании в нем тока.

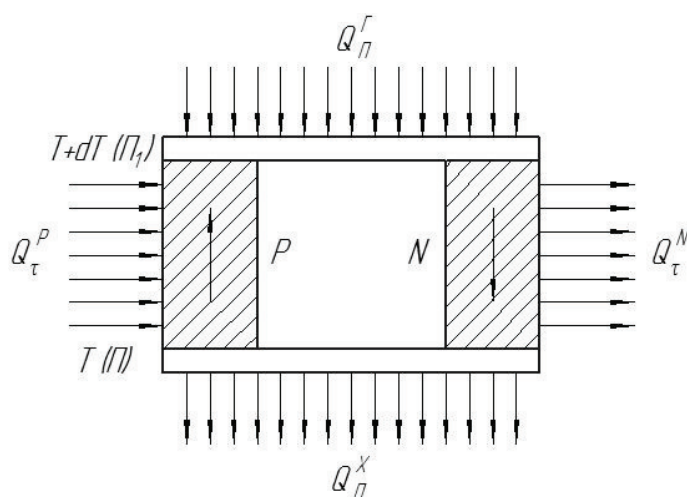


Рис. 1. Идеальный термоэлемент: Q_H^T – теплота Пельтье, поглощаемая на горячем спое; Q_H^X – теплота Пельтье, выделяемая на холодном спое; Q_τ^P – теплота Томсона, поглощаемая объемом проводника с дырочной проводимостью; Q_τ^N – теплота Томсона, выделяемая в объеме проводника с электронной проводимостью

Важнейшим критерием при выборе материала полупроводника для термоэлемента является величина его добротности Z ($1/^\circ\text{K}$):

$$Z = \frac{\alpha^2}{\lambda \cdot \rho}$$

λ ($\text{Вт/м}\cdot^\circ\text{K}$) – коэффициент теплопроводности материала, ρ ($\text{Ом}\cdot\text{м}$) – удельное электрическое сопротивление материала. Величина добротности современных термоэлектрических материалов – на уровне 10^{-4} K^{-1} .

Основные требования к материалам ТЭ:

- материал должен обладать наибольшим значением добротности, что обеспечивается следующими условиями:
 - величина теплопроводности кристаллической решетки материала должна быть наименьшей (за счет легирования полупроводника), но при этом желательно существенно не снижать подвижность электронов;
 - подвижность «дырок» по возможности необходимо увеличивать;
 - на величину коэффициента Зеебека влияет количество носителей в термоэлементе, то есть примесные полупроводники обладают большим коэффициентом термо-ЭДС, чем полупроводники с биполярным характером проводимости;
- материал должен иметь высокую механическую прочность;
- материал должен быть стойким к окислению;
- во избежание возникновения паразитных токов должна быть обеспечена технологическая однородность материала.

На практике явление термоэлектричества применяется не только для генерации электрической энергии, но и для генерации или поглощения тепла при протекании через ТЭЛП электрического тока. В последнее время термоэлектричество применяется все шире в таких устройствах как портативные холодильники, кулеры для напитков, охладители электронных узлов. Широко применяются малогабаритные термоэлектрические термостаты, поддерживающие постоянную температуру в биологии, микроскопах и пр.

Часто ТЭГ используются в составе радиоизотопных источников электроэнергии (РИЭ), преобразуя тепловую энергию, выделяющуюся при естественном распаде радиоактивных изотопов, в электрическую. Такие источники применяются в навигационных маяках, радиомаяках, метеостанциях и подобном оборудовании, установленном в местности, где по техническим или экономическим причинам нет возможности воспользоваться другими источниками электропитания. В частности, их

используют в качестве источников питания навигационного оборудования, установленного на побережье Северного Ледовитого океана вдоль трассы Северного морского пути. РИТЭГ (радиоизотопный ТЭГ), как правило, является наиболее приемлемым источником энергии для автономных роботов, нуждающихся в нескольких сотнях ватт (или меньше) при очень длительном времени работы, а также для космических летательных аппаратов мощностью до нескольких кВт, имеющих продолжительную миссию и сильно удаляющихся от Солнца, где использование солнечных батарей неэффективно или невозможно. Впервые в космос был запущен РИТЭГ «Ромашка» в 1964 г. и «SNAP-10A» в 1965 г., имевшие мощность 0,5...0,8 кВт и подтвержденный ресурс 1000...1500 ч., при этом КПД ТЭГ составлял 2 % и 1,5 % соответственно. В данный момент РИТЭГ используется в марсоходе «Curiosity».

В 2012 г. на кафедре «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках научно-исследовательской работы студента были сконструированы два лабораторных стенда, предназначенные для наглядной демонстрации эффектов Зеебека и Пельтье на примере работы реальных ТЭЛП, а также для измерения коэффициента Зеебека, КПД и других характеристик этих ТЭЛП. На базе стендов были запущены две лабораторные работы для студентов 5 курса МГТУ им. Н.Э. Баумана, обучающихся по специальности «Электроракетные двигатели и бортовые энергетические установки», и изданы методические указания [1] по выполнению данных лабораторных работ. Лабораторные работы включены в учебный план кафедры и успешно выполнены первой группой студентов.

На первом лабораторном стенде были проведены демонстрация и исследование эффекта Пельтье. Внешний вид лабораторного стенда представлен на рис. 2.

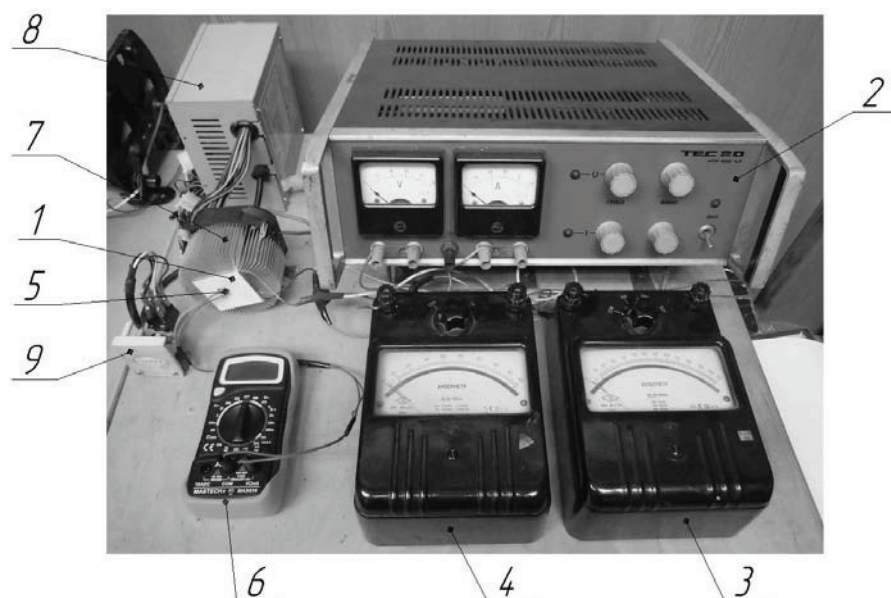


Рис. 2. Внешний вид стенда для исследования эффекта Пельтье:

- 1 – ТЭГ; 2 – источник питания постоянного тока; 3 – вольтметр V1;
 4 – амперметр A1;
 5 – термопара; 6 – мультиметр, измеряющий температуру V2;
 7 – радиатор и вентилятор;
 8 – блок питания вентилятора; 9 – кнопка включения охлаждения

На термоэлемент ТЭГ – 1 подаётся напряжение от источника питания постоянного тока – 2. Напряжение на термоэлементе и протекающий через него ток измеряются с помощью вольтметра V1 – 3 и амперметра A1 – 4 соответственно. Источник питания – 2 снабжен дублирующими индикаторами (вольтметром и амперметром) с более низкой чувствительностью, расположенными на передней панели. Источник питания включается тумблером «Сеть», расположенным на передней панели прибора. Управление током, проходящим через ТЭГ, осуществляется с помощью потенциометров «ГРУБО» и «ТОЧНО», расположенных также на передней панели. Контроль величины тока термоэлемента и напряжения на его спаях осуществляется стрелочными приборами магнитоэлектрической системы измерений вольтметром V1 – 3 и амперметром A1 – 4 соответственно (типа M253, класса точности 0,5 с зеркальной шкалой).

Температура горячего спая измеряется с помощью термопары – 5, термо-ЭДС которой показывает мультиметр V2 – 6 типа MD535. Мультиметр имеет возможность непосредственно преобразовывать термо-ЭДС термопары в соответствующую температуру (имеет шкалу температур и режим измерения температуры), поэтому технически в процессе выполнения работы можно проверить величину измеряемой температуры по двум каналам: режим «Температура» и режим «ЭДС термопары».

В установке предусмотрена возможность принудительного охлаждения холодного спая термоэлемента с помощью радиатора и вентилятора – 7, который питается от собственного блока питания – 8. Включение вентилятора, используемого для охлаждения, осуществляется кнопкой – 9. Термоэлемент фиксируется на радиаторе с помощью клеевого состава на эпоксидной основе. Измерения температуры проводят в режиме короткого замыкания ТЭГ ($R_H = 0$).

На рис. 3 представлена электрическая схема лабораторной установки.

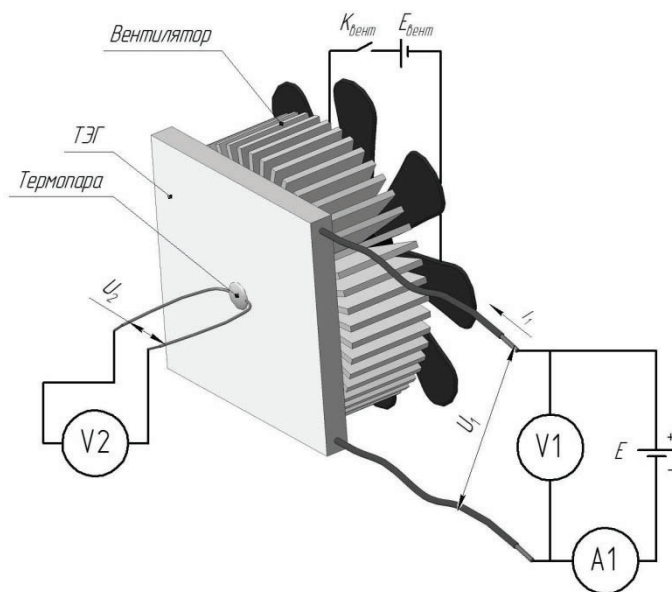


Рис. 3. Электрическая схема установки для исследования эффекта Пельтье

Источник постоянного тока соединен с термоэлементом. Параллельно термоэлементу включен вольтметр V1, последовательно с термоэлементом включен амперметр A1. Измерение температуры (режим «Температура») и термо-ЭДС (режим «ЭДС термопары») производится мультиметром V2. Подключение дополнительного охлаждения термоэлемента потоком воздуха от вентилятора осуществляется тумблером (включается источник $E_{\text{вент}}$).

На этом стенде были проведены два эксперимента: при выключенном и включенном вентиляторе. В ходе эксперимента на ТЭГ подавали ток от 0 до 1,5 А с шагом 0,1 А. Регистрировались следующие данные: напряжение на ТЭГ и термо-ЭДС термопары. Каждый эксперимент был проведен по три раза. Термо-ЭДС термопары был пересчитан в температуру по формуле:

$$T_2(U_2) = 20 + \frac{U_2[\text{мВ}]}{\alpha_{XA}[\text{мВ/град}]}, ^\circ\text{C}$$

Материал термопары – хромель-алюмель (ХА), коэффициент термо-ЭДС $\alpha_{ХА}$ составляет порядка 40 мкВ/град [5]. Измерения проводились при комнатной температуре. Таким образом, при нулевом токе «нулевая» термо-ЭДС соответствует температуре свободного холодного спая – 20 °С. Результаты экспериментов представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты эксперимента при выключенном вентиляторе

I_1, A	U_1, B			$U_2, мВ$		
0,0	0,00	0,00	0,05	0,05	0,05	0,00
0,1	0,01	0,05	0,05	0,10	0,10	0,10
0,2	0,08	0,10	0,15	0,20	0,20	0,15
0,3	0,20	0,25	0,25	0,25	0,25	0,20
0,4	0,40	0,40	0,40	0,30	0,31	0,30
0,5	0,60	0,60	0,55	0,40	0,40	0,38
0,6	1,00	1,00	1,05	0,50	0,48	0,45
0,7	1,50	1,45	1,45	0,60	0,50	0,55
0,8	1,70	1,65	1,65	0,70	0,55	0,65
0,9	1,95	1,90	1,83	0,80	0,65	0,75
1,0	2,15	2,20	2,20	0,90	0,80	0,90
1,1	2,42	2,35	2,35	1,00	0,90	1,00
1,2	2,67	2,63	2,60	1,10	1,05	1,15
1,3	2,92	2,85	2,85	1,30	1,15	1,30
1,4	3,15	3,13	3,15	1,40	1,30	1,45
1,5	3,42	3,40	3,40	1,60	1,45	1,65

Таблица 2

Результаты эксперимента при включенном вентиляторе

I_1, A	U_1, B			$U_2, мВ$		
0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
0,1	0,05	0,05	0,03	0,10	0,05	0,06
0,2	0,10	0,12	0,10	0,15	0,07	0,09
0,3	0,15	0,20	0,20	0,20	0,20	0,10
0,4	0,50	0,35	0,35	0,30	0,25	0,25
0,5	0,75	0,55	0,50	0,40	0,35	0,30
0,6	1,10	1,00	1,00	0,45	0,40	0,40
0,7	1,40	1,45	1,40	0,50	0,50	0,45

0,8	1,65	1,65	1,63	0,58	0,58	0,51
0,9	1,90	1,85	1,88	0,70	0,65	0,65
1,0	2,15	2,10	2,08	0,78	0,75	0,75
1,1	2,35	2,35	2,30	0,83	0,85	0,80
1,2	2,57	2,55	2,50	0,93	0,93	0,90
1,3	2,80	2,75	2,75	1,00	1,00	1,00
1,4	3,00	3,00	2,93	1,15	1,10	1,08
1,5	3,25	3,20	3,20	1,22	1,20	1,20

Была построена кривая зависимости температуры "горячей" стороны ТЭГ от тока питания для двух случаев (при выключенном и включенном вентиляторе), которая представлена на рис. 4.

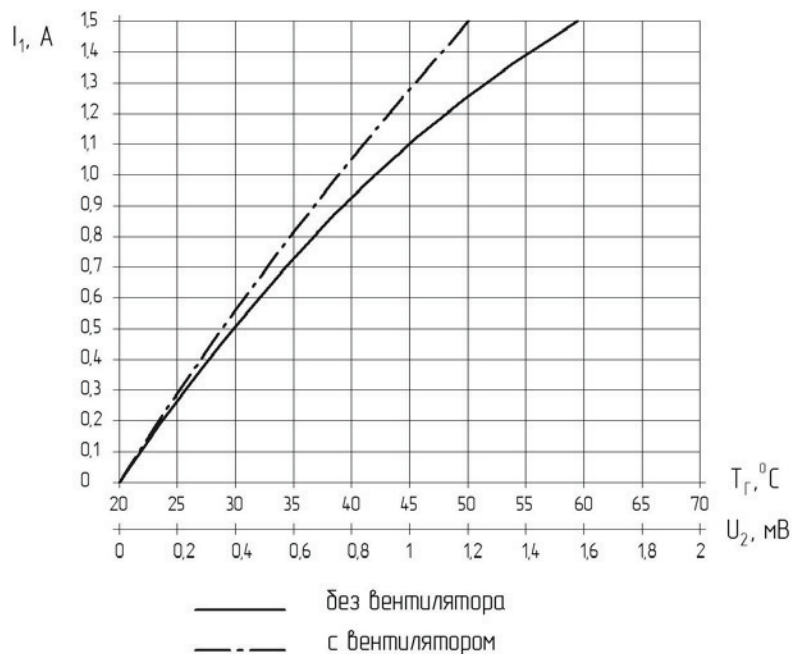


Рис. 4. Кривая зависимости температуры термопары от тока ТЭГ

Как видно на графике, при охлаждении вентилятором "холодной" стороны ТЭГ часть выделяемого тепла, в результате эффекта Пельтье, отводится, и измеряемая температура меньше, чем в эксперименте с выключенным вентилятором.

Второй лабораторный стенд предназначен для демонстрации и исследования эффекта Зеебека. Внешний вид лабораторного стенда представлен на рис. 5.

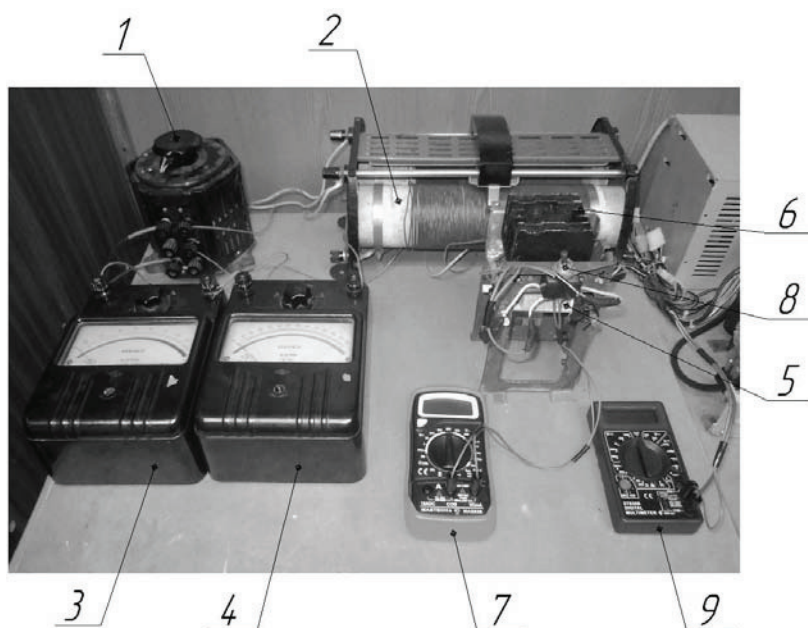


Рис. 5. Внешний вид стенда для исследования эффекта Зеебека: 1 – ЛАТР;

2 – реостат R;

3 – амперметр A1; 4 – вольтметр V1; 5 – нагреватель; 6 – радиатор; 7 – мультиметр, измеряющий температуру V3; 8 – переключатель термопар K2;

9 – мультиметр V2/A2

Термоэлемент – ТЭГ смонтирован на основании и размещен холодным спаем на радиаторе. Под термоэлементом расположен нагреватель – 5 из нихромовой проволоки диаметром 0,2 мм, который через реостат – 2 запитывается от лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) – 1. Переменный ток нагревателя ТЭ регистрируется амперметром A1 – 3 типа Э59, а напряжение на нагревателе – вольтметром V1 – 4 типа Э59, класса точности 0,5 с зеркальной шкалой. Для предотвращения перегорания нихромовой нити нагревателя в цепь последовательно включен реостат – 2, на котором происходит ограничение тока источника.

Для измерения перепада температур на ТЭГ к его горячей и холодной сторонам прикреплены термопары, сигнал термо-ЭДС которых через переключатель K2 – 8 подается на мультиметр V3 – 7 типа MD535. Мультиметр имеет возможность непосредственно преобразовывать термо-ЭДС термопары в соответствующую температуру (имеет шкалу температур и режим измерения температуры), поэтому технически в процессе выполнения работы можно проверить величину измеряемой температуры по двум каналам: режим «Температура» и режим «ЭДС термопары». Для измерения выходных электрических характеристик ТЭГ используется мультиметр V2/A2 – 9 типа D838. Он позволяет определить напряжение холостого хода и ток короткого

замыкания термоэлемента. Переключение режимов измерения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода термоэлемента осуществляется сменой режима работы мультиметра – 9 при помощи переключателя К1, встроенным в мультиметр (переключатель рода измеряемого сигнала). Для упрощения измерений требуемые шкалы на мультиметре выделены.

Нагреватель выполнен на специальном керамическом изоляторе на основе окиси алюминия намоткой, что позволяет обеспечить равномерный прогрев горячего спая термоэлемента. На рис. 6 представлена электрическая схема лабораторной установки.

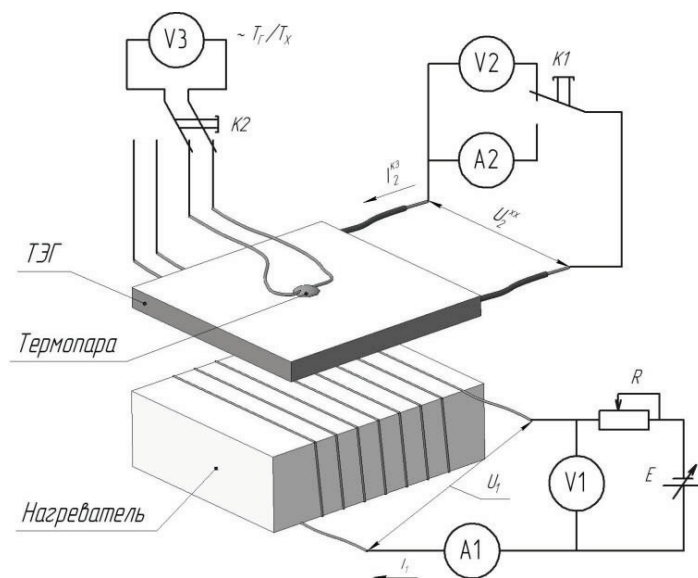


Рис. 6. Электрическая схема установки для исследования эффекта Зеебека

На данном лабораторном стенде был проведен эксперимент, в ходе которого увеличивалась мощность нагревателя, создающего температурный перепад на ТЭГ. Увеличение мощности нагревателя проводилось по напряжению, которое увеличивалось от 4 до 48 В с шагом 4 В. Регистрировались следующие данные: ток нагревателя, напряжение холостого хода и ток короткого замыкания ТЭГ, температуры сторон ТЭГ. Измерения проводились после пятиминутной выдержки выставленной мощности нагревателя, чтобы в системе успевало установиться тепловое равновесие. Полученные данные представлены в табл. 3.

Таблица 3

Данные, полученные в ходе эксперимента

№	$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$I_2^{\text{кз}}, \text{мА}$	$U_2^{\text{хх}}, \text{мВ}$	$T_{\text{Г}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{Х}}, ^\circ\text{C}$
1	4	0,05	1,2	7,0	20	20
2	8	0,10	2,3	12,2	22	21

3	12	0,15	4,8	23,0	24	23
4	16	0,25	8,2	36,0	25	24
5	20	0,40	12,7	57,2	28	26
6	24	0,65	21,2	90,0	34	31
7	28	1,00	31,2	132,0	42	38
8	32	1,15	42,5	174,5	52	46
9	36	1,30	55,0	220,0	62	54
10	40	1,45	66,2	265,0	71	62
11	44	1,60	72,5	295,0	77	67
12	48	1,75	90,0	355,0	85	74

Данные эксперимента были обработаны и получены следующие характеристики: реализуемая средняя температура ТЭГ, коэффициент Зеебека, максимальная электрическая мощность ТЭГ и КПД ТЭГ для каждой установленной мощности нагревателя. Результаты представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты эксперимента

№	$T_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	$\alpha, \text{мВ}/^\circ\text{C}$	$N_{\text{эл}} \cdot 10^{-3}, \text{Вт}$	$Q_{\text{т}}, \text{Вт}$	$\eta, \%$
1	20,0	-	0,002	0,002	0,100
2	21,5	0,122	0,007	0,008	0,086
3	23,5	0,230	0,028	0,018	0,104
4	24,5	0,360	0,074	0,040	0,185
5	27,0	0,286	0,182	0,080	0,228
6	32,5	0,300	0,477	0,156	0,306
7	40,0	0,330	1,030	0,280	0,368
8	49,0	0,291	1,854	0,368	0,504
9	58,0	0,275	3,025	0,468	0,646
10	66,5	0,294	4,386	0,580	0,756
11	72,0	0,295	5,347	0,704	0,760
12	79,5	0,323	7,988	0,840	0,951

Средняя температура определялась по формуле:

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_{\text{Г}} + T_{\text{Х}}}{2}$$

Максимальная электрическая мощность определялась по формуле:

$$N_{эл} = \frac{I_2^{кз} \cdot U_2^{хх}}{4}$$

Коэффициент Зеебека определялся по формуле (конструкция ТЭГ представляет собой батарею из 100 последовательно соединенных термоэлементов, поэтому в знаменатель внесен коэффициент 100):

$$\alpha = \frac{E}{(T_{г} - T_{х}) \cdot 100}$$

Теплота, выделяемая нагревателем, определялась по формуле:

$$Q_{дж} = U_1 \cdot I_1$$

Теплота, приходящая на поверхность ТЭГ, определялась с учетом допущения, что от нагревателя на поверхность ТЭГ приходит 1 % теплового потока:

$$Q_T = 0,01 \cdot Q_{дж}$$

КПД ТЭГ определялся по формуле:

$$\eta = \frac{N_{эл}}{Q_T} \cdot 100\%$$

Были построены графические зависимости коэффициента Зеебека и КПД от средней температуры ТЭГ, которые представлены на рис. 7 и 8.

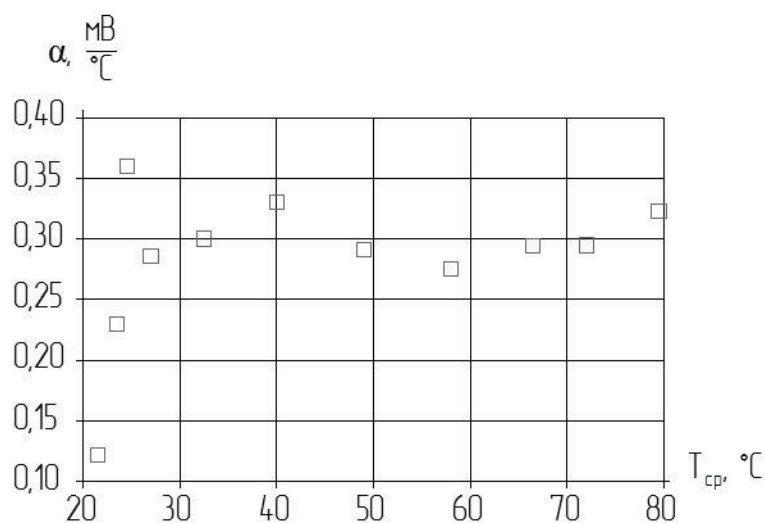


Рис. 7. Экспериментальные точки зависимости коэффициента Зеебека от средней температуры ТЭГ

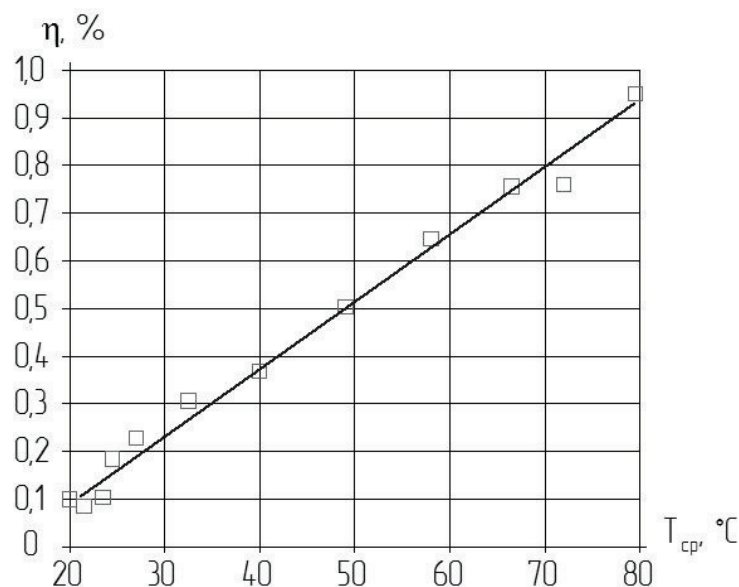


Рис. 8. Кривая зависимости КПД от средней температуры ТЭГ

Полученные результаты достоверно показывают характерные для низкотемпературных ТЭГ характеристики. Повышение КПД с ростом средней температуры на рис. 8 вызвано тем, что в эксперименте с большей мощностью реализовывался больший температурный перепад.

Список литературы

1. Баучкин Ф.А., Желонкин Я.О. Исследование термоэлектрических явлений. Электронное учебное пособие. Под ред. Онуфриева В.В. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2012. – 20 с.
2. Кузнецов В.А. Ядерные реакторы космических энергетических установок. М.: Атомиздат, 1977. 240 с.
3. Термоэлектрические генераторы. / Охотин А.С. [и др.] Под ред. Регеля А.Р. М.: Атомиздат, 1976. 320 с.
4. Иоффе А.Ф. Полупроводниковые термоэлементы. Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 188 с.
5. Рогельберг И.Л., Бейлин В.М. Сплавы для термопар. Справоч. изд. М.: Металлургия, 1983. 360 с.