

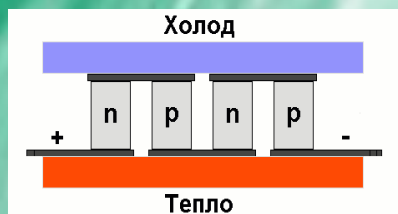
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»

Кафедра физики твердого тела

115-2017

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению и оформлению лабораторных работ
по дисциплине «Термоэлектрические материалы и устройства
на их основе» для студентов направления 16.04.01
«Техническая физика» (магистерская программа «Прикладная
физика твердого тела»), по дисциплине «Термоэлектрические
системы охлаждения» для студентов направления 16.04.01
«Техническая физика» (магистерская программа «Физика
и техника низких температур») и по дисциплине «Физика
термоэлектрических и пьезоэлектрических явлений»
для студентов направления 16.03.01 «Техническая физика»
(профиль «Физическая электроника») очной формы обучения



Воронеж 2017

Составитель д-р физ.-мат. наук С.А. Гриднев

УДК 621.359(07)

ББК 31.261.1я7

Методические указания к выполнению и оформлению лабораторных работ по дисциплине «Термоэлектрические материалы и устройства на их основе» для студентов направления 16.04.01 «Техническая физика» (магистерская программа «Прикладная физика твердого тела»), по дисциплине «Термоэлектрические системы охлаждения» для студентов направления 16.04.01 «Техническая физика» (магистерская программа «Физика и техника низких температур») и по дисциплине «Физика термоэлектрических и пьезоэлектрических явлений» для студентов направления 16.03.01 «Техническая физика» (профиль «Физическая электроника») очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост. С.А. Гриднев. Воронеж, 2017. 42 с.

Методические указания направлены на получение навыков измерения параметров термоэлектрических материалов и устройств.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле Л.р. № 1-4 по ТЭ.pdf.

Табл. 3. Ил. 11. Библиогр.: 6 назв.

Рецензент канд. физ.-мат. наук, доц. В.В. Ожерельев

Ответственный за выпуск зав. кафедрой

д-р физ.-мат. наук, проф. Ю.Е. Калинин

Издается по решению учебно-методического совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания посвящены вопросам выполнения лабораторных работ по дисциплине «Термоэлектрические материалы и устройства на их основе», а также правилам оформления отчета по выполненным работам и форме их защиты.

Целью лабораторных работ является систематизация, расширение и закрепление теоретических знаний студентов по названной дисциплине, а также приобретение ими навыков самостоятельной работы и анализа полученных результатов.

Изложенные в указаниях методические рекомендации также направлены на получение навыков измерения параметров термоэлектрических холодильников и генераторов.

При выполнении задания по лабораторной работе студент должен проявить самостоятельность и творческую инициативу, а принятые им решения и выводы должны быть аргументированно рациональными.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ

1.1. Задачи выполнения лабораторных работ

Поставленная при выполнении лабораторной работы цель достигается решением следующих задач:

- закрепление и углубление теоретических знаний, полученных студентами при освоении теоретического материала дисциплины «Термоэлектрические материалы и устройства на их основе» в форме аудиторных занятий: лекций и практик;
- приобретение опыта самостоятельной работы с научной, технической, справочной, патентной литературой, ГОС-Тами и т.д.;
- практическое применение знаний, полученных при изучении специальных дисциплин для расчета термоэлектри-

ческих холодильников и генераторов, использование средств вычислительной техники, алгоритмов расчета, а также умение анализировать результаты исследования новых термоэлектрических материалов с целью совершенствования элементов и приборов электронной техники;

- выработка и закрепление навыков построения цепи логических рассуждений в поисковых ситуациях, а также грамотного и доказательного изложения результатов работы, их отстаивание в дискуссиях и общественных выступлениях.

1.2. Тематика лабораторных работ

Лабораторные работы по дисциплине «Термоэлектрические материалы и устройства на их основе» охватывают широкий круг направлений, по которым проводятся исследования в современном физическом материаловедении. На основе анализа литературных источников (в основном, статей в научных журналах) студент должен установить цепочку связей "состав - структура - свойства" в материалах, обладающих термоэлектрическими свойствами, найти условия, при которых обеспечиваются наибольшие значения термоэлектрической эффективности, и получить информацию об основных применениях термоэлектрических материалов в технике.

При подготовке отчета по лабораторной работе рекомендуется использовать новейшие программные продукты (текстовые, вычислительные и графические редакторы) для выполнения расчетно-теоретической части работы и ее оформления. Отчет желательно целиком выполнить на персональном компьютере с применением текстового редактора Word и встроенного в него редактора формул.

2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

2.1. Лабораторная работа №1

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОЭДС МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Цель работы: Изучение природы термоэлектрических явлений в различных материалах. Практическое освоение экспериментальных методов их исследования.

Введение

Термоэлектрические явления представляют собой совокупность физических явлений, обусловленных связью между тепловыми и электрическими процессами в твердых или жидких проводниках. К термоэлектрическим явлениям относятся эффект Зеебека, эффект Пельтье и эффект Томсона. Причина их появления - нарушение теплового равновесия в потоке носителей заряда.

Так как рассматриваемые явления нашли широкое применение в практике, они имеют не только познавательный, но и практический интерес.

Эффект Зеебека. В 1823 г. Т. Зеебек установил, что в цепи, состоящей из двух разнородных проводников 1 и 2, возникает электродвижущая сила $U(T)$, если контакты этих проводников А и В находятся при различных температурах T_1 и T_2 (рис. 1.1). Эта ЭДС называется термоэлектродвижущей силой (термоЭДС). Как показывает опыт, в относительно узком интервале температур она пропорциональна разности температур контактов А и В:

$$U(T) = \alpha(T_2 - T_1). \quad (1.1)$$

Коэффициент пропорциональности

$$\alpha = \frac{dU(T)}{dT} \quad (1.2)$$

называют дифференциальной, или удельной термоЭДС. Она зависит от природы соприкасающихся проводников и температуры.

ТермоЭДС складывается из двух составляющих: контактной и объемной. Первая из них обусловлена зависимостью контактной разности потенциалов от температуры. Это непосредственно вытекает из следующих рассуждений. Пусть в металлах 1 и 2 различны работы выхода электронов A_1 и A_2 и энергии Ферми $E_{\phi 1}$ и $E_{\phi 2}$. Если эти металлы находятся в вакууме на некотором расстоянии друг от друга (рис. 1.2) и не заряжены, то между ними нет электрического поля. Обмен электронами между металлами в этом случае маловероятен.

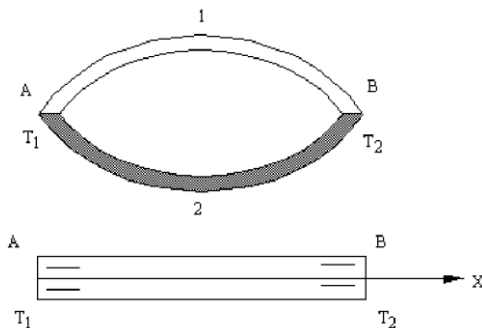


Рис. 1.1. Возникновение термоЭДС при контакте двух металлов

Если же сблизить металлы так, чтобы электроны могли свободно переходить из одного в другой (механический контакт), то через контакт устремится поток электронов из первого металла в другой и обратно.

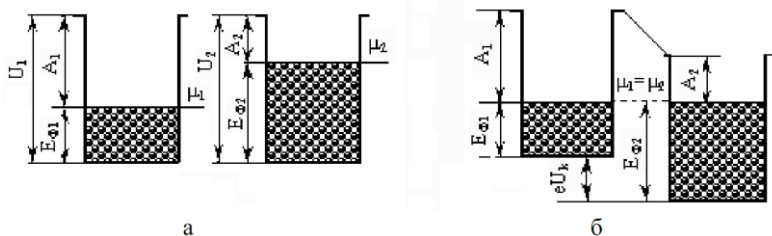


Рис.1.2. Положение уровней энергии Ферми в разделенных металлах (а) и в контактной области (б) механически соединенных металлов

Кинетическая энергия электронов, находящихся на уровнях энергии Ферми в различных металлах, различна ($E_{\phi 1} > E_{\phi 2}$). Поэтому в контакте возникает более интенсивный переход электронов из металла с большим значением энергии E_{ϕ} в металл с меньшим значением E_{ϕ} , в результате которого последний будет заряжаться отрицательно и между металлами возникнет разность потенциалов, препятствующая дальнейшему преимущественному переходу электронов. При этом отметим, что в месте контакта электроны переходят с наивысших заселенных уровней металла 2 на свободные уровни металла 1, прилегающие к $E_{\phi 1}$. Этот быстро протекающий процесс ($\sim 10^{-15}$ с) будет идти до тех пор, пока уровни энергии Ферми в контактной области не сравняются. Наступает равновесие, при котором работа электрона по преодолению сил возникшего поля станет равной разности энергий электронов, идущих через контакт:

$$eU_k = E_{\phi 1} - E_{\phi 2}, \quad (1.3)$$

где e - заряд электрона.

Возникшая при этом разность потенциалов между металлами

$$U_k = \frac{E_{\phi_1} - E_{\phi_2}}{e} = - \frac{E_{\phi_2} - E_{\phi_1}}{e} \quad (1.4)$$

и называется *контактной разностью потенциалов*.

В условиях установившегося равновесия уровень энергии Ферми в обоих металлах должен быть одинаков, энергетические уровни в металле, зарядившемся отрицательно, поднимутся, а в металле, зарядившемся положительно - опустятся.

На опыте установлено, что в замкнутой цепи, состоящей из разнородных проводников, при одной к той же температуре всех проводников, контактные разности потенциалов электродвижущей силы не создают. В этом не трудно убедиться, если просуммировать U_k по всему контуру: $\sum U_k = 0$.

Но так как кинетическая энергия электронов изменяется с температурой, то изменяется и положение уровней энергии Ферми в контактирующих металлах, а, следовательно, и разности $E_{\phi_1} - E_{\phi_2}$. Таким образом, контактная составляющая термоЭДС может проявить себя лишь в том случае, если $T_1 \neq T_2$ (рис. 1.2).

Возникновение объемной составляющей термоЭДС металла также связывается с перепадом температуры. Если на концах проводника температуры различны, то средняя энергия и скорость перемещения электронов на горячем конце больше, чем на холодном. «Горячие» электроны диффундируют к холодному концу проводника. Переходу электронов в направлении холодного конца проводника способствует поток фононов, распространяющийся в том же направлении и увлекающий за собой электроны.

Под фононами понимают минимальную порцию (квант) энергии, которую может поглотить или испустить решетка при тепловых колебаниях. Эта порция соответствует переходу возбуждаемого нормального колебания с данного энергетического уровня на ближайший соседний уровень. В температурном градиенте происходит дрейф фононов. Электроны, двигающиеся в противоположном направлении, сильно рассеиваются

потоком фононов. В результате этого в проводнике возникает электрическое поле, и между его концами устанавливается разность потенциалов. Поскольку концентрация электронов, способных обмениваться энергией с кристаллической решеткой, неодинакова в разных металлах, то и разность потенциалов на их концах, имеющих одну и ту же разность температур, различна.

Обе составляющие термоЭДС определяются концентрациями электронов, расположенных в металлах на энергетических уровнях, близких к уровню энергии Ферми E_ϕ и отстоящих от него на kT .

Для металлов с квадратичной зависимостью энергии электронов от их волнового вектора термоЭДС α описывается уравнением

$$\alpha = \frac{\pi^2 k}{3e} (1 + r) \frac{kT}{E_\phi}, \quad (1.5)$$

где k - постоянная Больцмана; T - температура по абсолютной шкале; E_ϕ - энергия Ферми при 0 К; r - показатель степени в соотношении

$$l \sim E^r, \quad (1.6)$$

выражающем зависимость длины свободного пробега электронов от их энергии E .

Для металлов $\alpha \sim T$ (1.5), это согласуется и с опытом. Так как $kT \ll E_\phi$, то термоЭДС для металлов является величиной незначительной. Так, для серебра $E_\phi = 5,5$ эВ. При $T = 300$ К энергия kT оказывается равной 0,025 эВ, так что по (1.5) $\alpha = 8 \cdot 10^{-6}$ В/К, а опыт дает $\alpha = 5 \cdot 10^{-6}$ В/К.

Из (1.6) следует, что при $r < 0$ электроны с большей энергией обладают меньшей длиной свободного пробега, и поэтому должны диффундировать медленнее, чем электроны, имеющие более низкую энергию. Результирующий поток электронов в этом случае окажется направленным от холодного

конца к горячему, вследствие чего знак объемной составляющей термоЭДС изменится на обратный. Это может привести к изменению знака термоЭДС проводника в целом. Такая картина наблюдается, например, в ряде переходных металлов и сплавов.

В металлах наряду с электронами проводимости могут быть и дырки. В этом случае от горячего конца проводника к холодному диффундируют одновременно и электроны, и дырки. Может оказаться, что разности потенциалов между концами проводника не возникает, то есть объемная составляющая термоЭДС равна нулю. Таким металлом, в частности, является свинец. Поэтому величину термоЭДС для других металлов обычно определяют по отношению к свинцу (табл.1.1).

Таблица 1.1

Значения α для некоторых металлов и сплавов по отношению к свинцу

Материал	α , мкВ/К	Материал	α , мкВ/К
Сурьма	+ 43	Платина	– 4,4
Железо	+ 15	Натрий	– 6,5
Молибден	+ 7,6	Палладий	– 8,9
Кадмий	+ 4,6	Калий	+ 13,8
Вольфрам	+ 3,6	Никель	– 20,8
Медь	+ 3,2	Висмут	0,68
Цинк	+ 3,1	Хромель	+ 24
Золото	+ 2,9	Нихром	+ 18
Серебро	+ 2,7	Платинородий	+ 2
Свинец	0,0	Алюмель	– 17,3
Олово	– 0,2	Константан	– 38
Алюминий	– 0,4	Копель	– 38

Знак «+» указывает, что ток течет от свинца к данному металлу через более нагретый спай, а знак «-» - через холодный спай.

Приведенные здесь значения условны, так как термоЭДС чувствительна к микропримесям и к ориентации кристаллических зёрен.

Эффект Пельтье. Если в цепи, состоящей из разнородных проводников проходит постоянный электрический ток I , то в местах контакта, как и в любых других участках цепи, выделяется джоулево тепло $Q_{дж} = I^2 R t$, где R - сопротивление контакта, t - время. Вместе с тем, кроме джоулева тепла, выделяется или поглощается (в зависимости от направления тока) дополнительная теплота, вызывающая в первом случае нагревание, а во втором случае - охлаждение контакта. Это явление было открыто в 1834 г. Ж. Пельтье и называется эффектом Пельтье, а дополнительная теплота, выделяемая или поглощаемая в контакте, - теплотой Пельтье, Q_n . Она пропорциональна силе тока и времени его прохождения через контакт:

$$Q_n = \Pi \cdot I \cdot t, \quad (1.7)$$

Коэффициент пропорциональности Π называется коэффициентом Пельтье. Его значение зависит от природы соприкасающихся проводников и температуры.

Между эффектами Пельтье и Зеебека существует непосредственная связь: разность температур вызывает в цепи, состоящей из разнородных проводников, электрический ток, а ток, проходящий через такую цепь, создает разность температур. Количественно эта связь была установлена У. Томсоном, создавшим термодинамическую теорию термоэлектрических явлений. Он показал, что

$$\Pi = \alpha \cdot T. \quad (1.8)$$

Эффект Пельтье возникает вследствие различия средних энергий электронов проводимости в разнородных материалах, приведенных в контакт. Поскольку в электрическом поле происходит направленное перемещение электронов проводимости, а средняя их энергия в каждом металле имеет конкретное и постоянное значение, то перешедшие через контакт электроны поглощают или отдают избыток энергии, охлаждая или нагревая тем самым контактную зону.

Эффект Томсона. Если через однородный проводник, вдоль которого существует градиент температуры dT/dx , проходит постоянный электрический ток силой I , то в зависимости от направления в таком проводнике, кроме джоулева тепла, должно выделяться или поглощаться дополнительное количество теплоты Q_τ , пропорциональное силе тока I , перепаду температур $(T_2 - T_1)$ и времени t ;

$$Q_\tau = \tau I (T_2 - T_1) t. \quad (1.9)$$

Теплоту Q_τ называют теплотой Томсона, а коэффициент пропорциональности τ - коэффициентом Томсона. Он зависит от природы проводника и температуры. Согласно теории У. Томсона, разность коэффициентов Томсона для двух проводников связана с их дифференциальной термоЭДС соотношением

$$\frac{d\alpha_{1,2}}{dT} = \frac{\tau_1 - \tau_2}{T}. \quad (1.10)$$

Возникновение эффекта Томсона обусловлено тем, что при наличии в проводнике градиента температуры поток носителей тока, вызванный внешней разностью потенциалов, переносит не только электрический заряд, но и теплоту. Так, если электрический ток в проводнике течет в направлении, соответствующем перемещению от горячего конца к холодному, то

«нагретые» электроны переходят в более холодные участки проводника, отдают решетке избыточную энергию и вызывают нагревание проводника. При обратном направлении тока проводник охлаждается.

При количественном описании эффекта Томсона следует учитывать наличие в проводнике термоЭДС, которая в первом случае будет тормозить электроны, во втором случае - ускорять. Эта термоЭДС может привести не только к изменению величины, но и знака коэффициента Томсона, так как

$$\tau = T \frac{\partial \alpha_{1,2}}{\partial T} . \quad (1.11)$$

В металловедении метод термоЭДС широко применяется для изучения процессов естественного и искусственного старения, отпуска, а также напряженных состояний металлов и сплавов. Этот метод используется и при идентификации присутствующих в сплаве фаз.

Методика измерения термоЭДС

Для практического определения дифференциальной термоЭДС необходимо к любым двум точкам исследуемого образца с известными температурами T_1 и T_2 подвести два электрода, изготовленных из одного и того же металла и подключенных к высокоомному прибору для измерения термоЭДС $U(T)$, развиваемой при разности температур $T_1 - T_2$. Дифференциальную термоЭДС исследуемой пары при средней температуре $T = 0,5(T_1 + T_2)$ находят по уравнению

$$\alpha_{1,2} = \frac{U(T)}{T_1 - T_2} , \quad (1.12)$$

где $T_1 > T_2$.

Изучение температурной зависимости термоЭДС проводится на образце, выданном преподавателем.

Измерения осуществляют на установке (рис. 1.3), состоящей из нагревательных элементов, регуляторов напряжения, нагревателей, переключателя измерительных цепей и компенсационного потенциометра КП, в качестве которого используют высокоомный потенциометр Р-307.

Образец 10 находится между двумя хромель (Хр) - алюмелевыми (Ал) термопарами. Надежный электрический контакт Хр-Ал термопары с образцом обеспечивается посредством поджимающей пружины 4, установленной в одной из направляющих втулок 6, закрепленных на боковых крышках 7 печи сопротивления. Печь опирается на шайбу 5, жестко соединенную с чехлом данной термопары.

Температурный перепад $\Delta T = T_2 - T_1$ в образце достигается двумя нагревателями 2 и 3, один из которых расположен асимметрично. Остальные обозначения на рис. 1.3 соответствуют: 1 - теплоизолятору, 8 - корпусу печи.

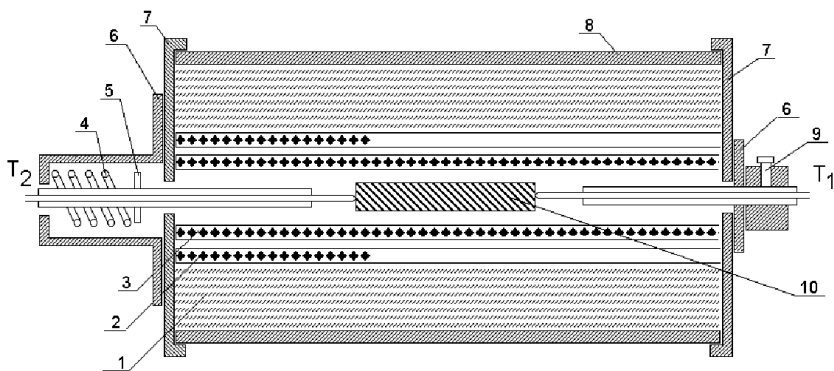


Рис. 1.3. Конструкция теплового узла установки для измерения термоЭДС: 1- теплоизолятор; 2, 3 - нагреватели; 4 - пружина; 5 - шайба; 6 - направляющие втулки; 7 - боковые крышки; 8 - корпус печи; 9 - винт крепления термопары; 10 - исследуемый образец

Принципиальная схема установки показана на рис. 1.4. С помощью общего выключателя с тепловой защитой включаются автотрансформаторы (ЛАТР), с которых снимается напряжение нагревателей V_1 и V_2 . Переключатель Π_1 подключает вольтметр к первому или второму автотрансформатору.

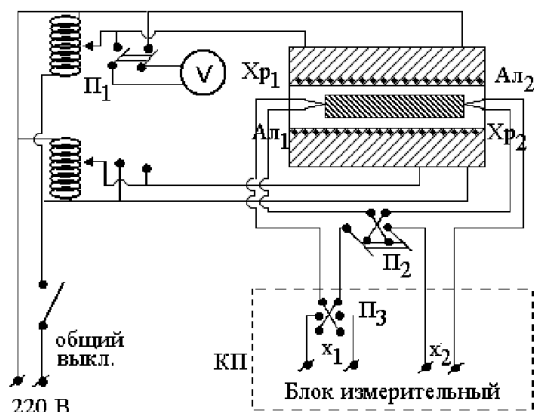


Рис. 1.4. Принципиальная схема установки для измерения термоЭДС: $V_{1,2}$ - регуляторы напряжений на основном и дополнительном нагревателях; $\Pi_{1,2,3}$ - переключатели измерительных цепей

С помощью переключателя Π_2 осуществляется коммутация измерительных цепей.

В верхнем положении переключатель Π_2 подключает термопары $Хр_1$ - $Ал_1$ и $Хр_2$ - $Ал_2$ к клеммам X_1 и X_2 компенсационного потенциометра.

В нижнем положении переключатель Π_2 подключает к соответствующим клеммам прибора X_1 и X_2 лишь хромелевые ветви термопар ($Хр$ - $Хр$) либо алюмелевые ($Ал$ - $Ал$). В этом случае ЭДС образца измеряется относительно металла зондов ($Хр$ либо $Ал$) и соответствует измеряемой $\Delta T = T_2 - T_1$.

ТермоЭДС α определяется по уравнению (1.12) и считается постоянной в интервале температур ΔT .

Зондами при измерении $U(T)$ служит проволока самих термопар, горячие спаи которых имеют электрический контакт с образцом. Поэтому измеряемая термоЭДС $\alpha_{\text{Me-Xp}}$ и $\alpha_{\text{Me-Al}}$ по правилу аддитивности описывается соотношениями

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{Me-Xp}} &= \alpha_{\text{Me}} - \alpha_{\text{Xp}}; \\ \alpha_{\text{Me-Al}} &= \alpha_{\text{Me}} - \alpha_{\text{Al}};\end{aligned}\tag{1.13}$$

отсюда

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{Me}} &= \alpha_{\text{Me-Xp}} + \alpha_{\text{Xp}}; \\ \alpha_{\text{Me}} &= \alpha_{\text{Me-Al}} + \alpha_{\text{Al}}.\end{aligned}\tag{1.14}$$

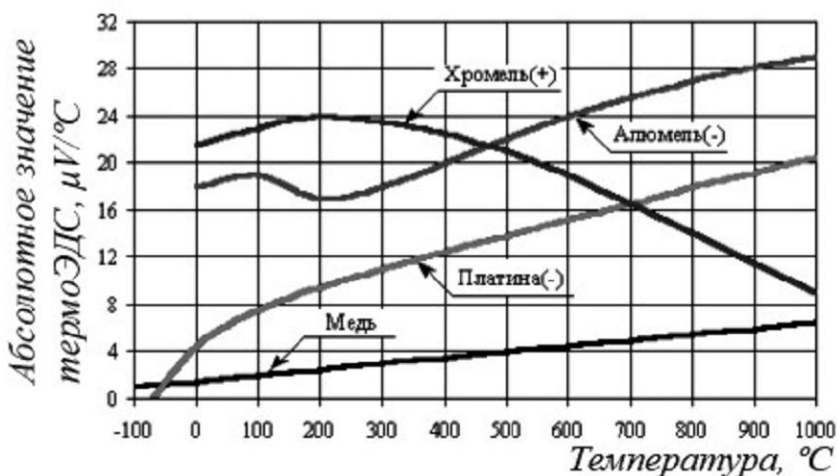


Рис. 1.5. Зависимость абсолютной термоЭДС некоторых металлов от температуры

Здесь α_M , α_{Xp} , α_{Al} - значения абсолютных термоЭДС, соответственно, исследуемого металла, хромеля и алюмеля. Для нахождения значения абсолютной термоЭДС исследуемого

вещества достаточно знать $\alpha_{\text{Хр}}$, $\alpha_{\text{Ал}}$ при соответствующих температурах. Эта информация представлена на графике (рис. 1.5).

Задание на работу

1. Ознакомиться с устройством установки для измерения термоЭДС.
2. Измерить термоЭДС никелевого образца при трех-четырех значениях температуры в интервале 400-800 К.
3. Рассчитать по уравнению (1.14) значения абсолютной термоЭДС исследуемого материала и построить графическую зависимость $\alpha_M = f(T)$. Объяснить температурный ход кривой $\alpha_M = f(T)$.

Порядок выполнения работы

1. Включить установку с помощью общего выключателя, расположенного на передней панели лабораторного стола.
2. Установить с помощью автотрансформаторов, закрепленных на панели пульта управления, напряжение нагревателей $V_1 = 0$ и $V_2 = 15$ В. При измерении V_2 тумблер переключателя Π_1 должен находиться в нижнем положении, а V_1 - в верхнем.
3. Через 20 мин после выполнения требований пункта 2 с помощью высокоомного моста Р-307 и хромель-алюмелевых термопар измерить температуру на холодном T_1 и горячем T_2 концах исследуемого образца. При этом переключатель Π_2 на пульте управления должен соответствовать положению «+», а Π_3 - положению «Т». Перевод полученных значений $E(T)$ хромель-алюмелевых термопар в градусы Кельвина производить по соответствующей таблице или графику. При измерении температуры холодного конца образца $E(T_1)$ переключатель потенциометра Р-307 должен находиться в положении « X_1 », а при измерении $E(T_2)$ - в положении « X_2 ».

4. После определения $E(T_i)$ и соответствующих им значений T_1 и T_2 с помощью потенциометра Р-307 находится термоЭДС исследуемого образца. Для этого необходимо переключатель Π_2 на пульте управления поставить в положение « $U_{1,2}$ »; переключатель потенциометра Р-307 поставить в положение « X_1 » или « X_2 » (по выбору). В первом случае термоЭДС замеряется относительно алюминия, во втором - хромеля.

Если термоЭДС исследуемого образца не удастся скомпенсировать с помощью моста Р-307, то нужно поставить переключатель Π_3 на пульте управления в положение «-». При этом термоЭДС образца будет иметь отрицательный знак.

5. Найденные (см. п.п. 3 и 4) значения U_1 , U_2 , $E(T_1)$, $E(T_2)$, T_1 , T_2 занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Экспериментальные и расчетные данные для определения термоЭДС образца

Температура						ТермоЭДС			
$E(T_1)$	T_1	$E(T_2)$	T_2	ΔT	T_{cp}	$U_1(Xp)$	$U_2(Al)$	$\alpha_{1,2}$	α_{abc}

6. Повторить измерения (п.п. 3-5) не менее двух раз с интервалом 5-6 мин. Измерения при данном режиме закончить, если результаты последних трех измерений совпадут с точностью $\pm 1\%$.

7. Провести аналогичные измерения (см. п.п. 3-6) для новых температурных условий. При этом напряжения V_1 и V_2 на нагревателях печи для соответствующих средних температур должны приближенно быть равны следующим значениям:

Таблица 1.3

Напряжение, В	T_{cp}, K				
	350	400	500	600	700
V_1	0	10	20	32	45
V_2	14	20	28	38	50

8. По уравнению (1.14) с учетом данных рис. 1.5 рассчитать значения абсолютных термоЭДС металла при исследуемых температурах. Результат занести в табл. 1.2.

9. Выключить установку (общий выключатель на пульте управления) и освободить от фиксированного положения кнопку «точно» потенциометра Р-307.

Требования к отчету

1. Привести принципиальную электрическую схему установки.

2. Оформить результаты измерений и расчетов в виде таблиц и графиков.

3. Построить график зависимости $\alpha = f(T)$. Объяснить ход кривой $\alpha = f(T)$.

Контрольные вопросы:

1. В чем заключается эффект Томсона?

2. Что такое эффект Пельтье?

3. Что такое эффект Зеебека?

4. Что называют термоэлектрическими явлениями?

5. Причина появления эффектов Томсона, Пельтье и Зеебека.

6. Как связаны между собой эффекты Томсона, Пельтье и Зеебека?

7. Составляющие термоЭДС

8. Чему равна сумма напряжений в замкнутом контуре (цепи)?

9. О чем говорит объемная составляющая термоЭДС?

10. Назовите материалы для изготовления термопар.

11. Как строится градуировочная кривая?

2.2. Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ

Цель работы: экспериментальное изучение работы термоэлектрического преобразователя в режиме теплового насоса для охлаждения рабочего вещества.

Введение

Физической основой работы термоэлектрических преобразователей служат следующие экспериментально установленные эффекты.

Эффект Зеебека. Если концы (спаи) разомкнутой цепи (рис.1, поз. 3, 3'), составленной из разнородных проводников (1, 2) находятся при различной температуре, то в цепи появляется электродвижущая сила – термоЭДС dE :

$$dE = \alpha \cdot dT, \text{ В} \quad (2.1)$$

где α - коэффициент термоЭДС, зависящий от материала электродов, образующих цепь.

Эффект Пельтье. Если по той же цепи пропускать ток I от источника 4, то на границе разнородных электродов (на спае) выделяется (горячий спай) или поглощается (холодный спай) тепловая энергия (теплота Пельтье) с мощностью

$$dW_{II} = II \cdot dI, \text{ Вт} \quad (2.2)$$

где II - коэффициент Пельтье, связанный с коэффициентом термоЭДС спая зависимостью

$$II = \alpha \cdot T, \text{ В} \quad (2.3)$$

Эффект Томсона. Если в той же цепи существует градиент температуры (dT / dx), то при прохождении тока I на спаях выделяется (или поглощается) тепловая энергия (теплота Томсона) с мощностью

$$dW_T = \tau_T \cdot dI \cdot \frac{dT}{dx} \cdot dx, \text{ Вт} \quad (2.4)$$

где τ_T - коэффициент Томсона, связанный с коэффициентом термоЭДС соотношением

$$\tau_T = \bar{T} \cdot \frac{d\alpha}{dT}, \text{ В/К} \quad (2.5)$$

где $\bar{T}$ - среднее значение температуры на спае.

Эффект Джоуля. При пропускании тока по цепи происходит выделение теплоты Джоуля, мощность которой

$$W_D = I^2 \cdot R_{\text{ц}}, \text{ Вт} \quad (2.6)$$

где $R_{\text{ц}}$ - полное сопротивление цепи.

Если реальный термоэлектрический преобразователь (термоэлемент на рис. 2.1) работает в узком диапазоне изменения температуры (несколько Кельвинов или десятки Кельвинов), то можно считать, что $\alpha \neq f(T)$ тогда

$$\tau_T = \bar{T} \cdot \frac{d\alpha}{dT} \cong 0,$$

и эффектом (теплотой) Томсона можно пренебречь.

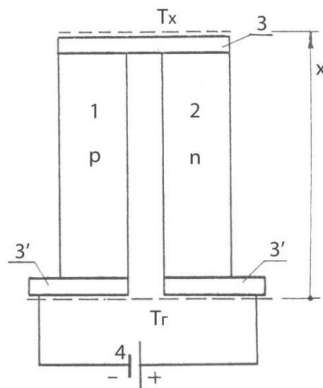


Рис. 2.1. Термоэлектрический преобразователь

Можно также показать, что независимо от наличия перепада температур на спаях теплота Джоуля будет выделяться примерно поровну (пополам) на горячих и холодных спаях.

Обычно несколько термоэлементов, установленных параллельно, образуют термобатарею. В установившемся режиме уравнение баланса тепловой энергии (закон сохранения) для холодных спаев термопреобразователя (термобатареи) в целом можно записать в виде

$$W_x = W_{II} - 0,5W_1 - q\lambda, \quad (2.7)$$

$$W_x = \Pi_x I - 0,5I^2 R_{II} - \sigma_{TB}(T_r - T_x), \quad (2.8)$$

где $q\lambda = \sigma_{TB}(T_r^{cp} - T_x^{cp})$ - тепловой поток, обусловленный теплопроводностью λ_{TB} от горячих спаев к холодным (вредный приток тепла, уменьшающий эффективность охлаждения на холодных спаях); σ_{TB} - полная тепловая проводимость термобатареи, Вт/К; S - площадь батареи.

Из уравнения (2.8) можно оценить максимально достижимый перепад температур между холодным и горячим спая-

ми термобатареи (соответствующий идеальной теплоизоляции $W_x = 0$, т.е. без перекачки теплоты)

$$\Delta T_{МАКС} = \frac{1}{\sigma_{ТБ}} \left[\Pi_x \cdot I^* - \frac{1}{2} (I^*)^2 \cdot R_{\text{ц}} \right]. \quad (2.9)$$

Соответствующее значение тока I^* можно оценить, приравняв нулю производную ($\partial \Delta T / \partial I$)

$$(\partial \Delta T / \partial I) = \frac{1}{\sigma_{ТБ}} \left(\Pi_x - \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot I^* \cdot R_{\text{ц}} \right) = 0$$

Откуда

$$I^* = \frac{\Pi_x}{R_{\text{ц}}}. \quad (2.10)$$

Подставив выражение (2.10) в уравнение (2.9), получим

$$\Delta T_{МАКС} = \frac{R_{\text{ц}}}{2\sigma_{ТБ}} (I^*)^2, \quad R_{\text{ц}} \cong R_{ТБ}. \quad (2.11)$$

Если в выражение (2.11) вместо I^* подставить уравнение (2.10), получим

$$\Delta T_{МАКС} = \frac{1}{2\sigma_{ТБ}} \cdot \frac{\Pi_x^2}{R_{\text{ц}}}$$

и, заменив $\Pi_x = \alpha T_x$, имеем

$$\Delta T_{МАКС} = \frac{\alpha^2}{2\sigma_{ТБ} \cdot R_{\text{ц}}} \cdot T_x^2. \quad (2.12)$$

Если длины и поперечные сечения каждого электрода одинаковы, то комплекс $\alpha^2 / (2\sigma_{TB} \cdot R_{II})$ не зависит от геометрии батареи, определяется только материалом электродов и называется эффективностью термобатарей:

$$Z = \frac{\alpha^2}{\sigma_{TB} \cdot R_{TB}} = \frac{\alpha^2}{\lambda \cdot \rho} \quad (2.13)$$

При использовании термоэлектрического преобразователя в качестве охлаждающего устройства важной его характеристикой является холодильный коэффициент

$$E = \frac{W_x}{W_{эл}}, \quad (2.14)$$

где $W_{эл}$ - мощность (электрическая) системы питания, затрачиваемая на джоулевы потери $W_{ДЖ} = I^2 R_{II}$ и на преодоление термоЭДС W_α :

$$\begin{aligned} W_\alpha &= E_\alpha \cdot I = \alpha \cdot (T_\Gamma - T_X) \cdot I \\ W_{эл} &= \alpha_{TB} \cdot (T_\Gamma - T_X) \cdot I + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R_{II} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Подставив в выражение (2.14) величину $W_{эл}$, (2.15) и W_x (2.8), получим

$$\varepsilon = \left[P_x \cdot I - \frac{1}{2} I^2 \cdot R_{II} - \sigma_{TB} (T_\Gamma - T_X) \right] / [\alpha \cdot (T_\Gamma - T_X)] \quad (2.16)$$

Продифференцировав ε по I и приравняв нулю, можно найти величину тока I^{**} для $\varepsilon_{МАКС}$:

$$I^{**} = \frac{\alpha}{M \cdot R_{\text{ц}}} (T_{\Gamma} - T_X); \quad M = \sqrt{1 + \frac{Z}{2} (T_{\Gamma} - T_X)}, \quad (2.17)$$

и, подставив в уравнение (2.16)

$$\varepsilon_{\text{МАКС}} = \frac{T_X}{T_{\Gamma} - T_X} \cdot \frac{M - T_{\Gamma}/T_X}{M}. \quad (2.18)$$

При возрастании Z растет M , второй сомножитель в выражении (2.18) стремится к 1, а $\varepsilon_{\text{МАКС}}$ к своему пределу $\varepsilon_{\text{МАКС МАКС}}$

$$\varepsilon_{\text{МАКС МАКС}} = \frac{T_X}{T_{\Gamma} - T_X}, \quad (2.19)$$

т.е. к величине холодильного коэффициента идеальной холодильной машины в цикле Карно.

Рассмотрим режим максимальной холодопроизводительности (2.8), приняв

$$\partial W_X / \partial I = 0 \quad (2.20)$$

В этом случае (сравнить с (2.10))

$$I^{***} = \frac{\alpha \cdot T_X}{R_{\text{ц}}} = I^*,$$

т.е. ток I один и тот же для максимального охлаждения холодного спая и максимальной холодопроизводительности.

Холодильный коэффициент

$$\varepsilon(W_{X \text{ МАКС}}) = \frac{1}{2T_r} [T_x - 2(T_r - T_x)/(Z \cdot T_x)] \quad (2.21)$$

Сравнив выражения (2.21) и (2.18), можно видеть, что $\varepsilon(W_{X \text{ МАКС}}) < \varepsilon_{\text{МАКС}}$.

Описание лабораторной установки

Устройство установки и измерительная схема изображены на рис. 2.2.

Многоспайная ($N=18$) полупроводниковая термобатарея 1 дискового типа, рассчитанная на токи $I < 20$ А, подключена к блоку питания 2. Горячими спаями T_r батарея крепится к массивному алюминиевому блоку (термостату) 3, который при длительных или многократных измерениях принудительно термостатируется проточной жидкостью от термостата 4 при комнатной температуре.

На холодные спаи T_x устанавливается медный цилиндр 5 с массой M и удельной теплоемкостью $C_{\text{Cu}} = 390$ Дж/(кг·К). В отверстие цилиндра устанавливается термопара 6 для измерения скорости его охлаждения $v = \partial T / \partial \tau$ с помощью измерительного прибора 7 или самописца 8

$$v = \frac{\Delta T}{\Delta \tau} = \alpha \cdot \frac{E(\tau_1) - E(\tau_2)}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (2.22)$$

где α , К/мВ - коэффициент термоЭДС термопары. Для термопар медь-константан $\alpha = 24,4$ К/мВ, τ_i - время.

Уравнение теплового баланса охлаждаемого цилиндра (индекс «ц»)

$$W_X(\tau) = C_{\Sigma} \cdot \vartheta(\tau) + \sigma_{\text{заз}} (T_{\text{ср}} - T_{\text{ц}}(\tau)), \quad (2.23)$$

где $C_E = C_{\text{Cu}} \cdot M_{\text{ц}}$ - полная теплоемкость образца, Дж/К, $\sigma_{\text{заз}}$ - тепловая проводимость между окружающей средой (воздух) и охлаждаемым цилиндром, Вт/К.

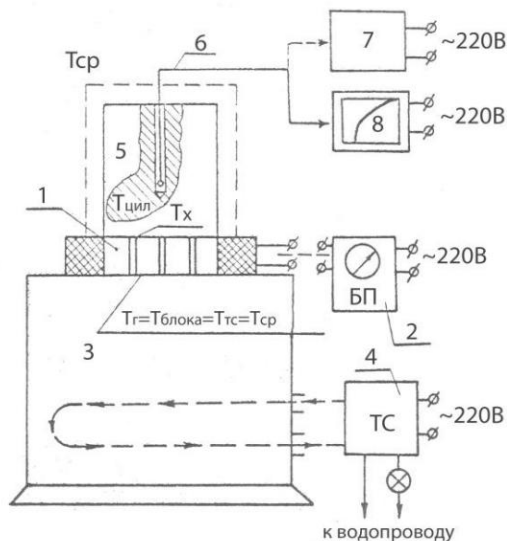


Рис. 2.2. Экспериментальная установка.

График $\sigma_{\text{заз}} = f(T_{\text{ц}})$ представлен на рис. 2.3.

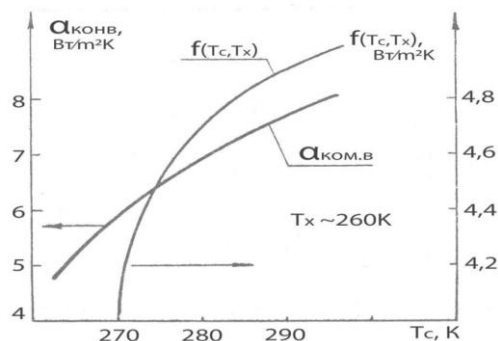


Рис. 2.3. Зависимость $\sigma_{\text{ззз}} = f(T_u)$

Если изменение температуры цилиндра записывается на диаграммную ленту, то измерение скорости охлаждения "в" проводится следующим образом:

$$v \approx \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{j+1} - x_j},$$

где параметры y_i , x_j (рис. 2.4) связаны с искомым параметром «в»

$$\tau_2 - \tau_1 = (x_{j+1} - x_j) \cdot \omega,$$

где ω – скорость движения ленты, x_j – расстояние в мм, $\omega = 0,2$ мм/с (для конкретного прибора уточнить у лаборанта)

$$T(\tau_{i+1}) - T(\tau_i) = (y_{i+1} - y_i) \cdot K_y \cdot \alpha_T,$$

где K_y – масштабный коэффициент оси y ; $K_y = 6,65$ мВ/мм (узнать у лаборанта).

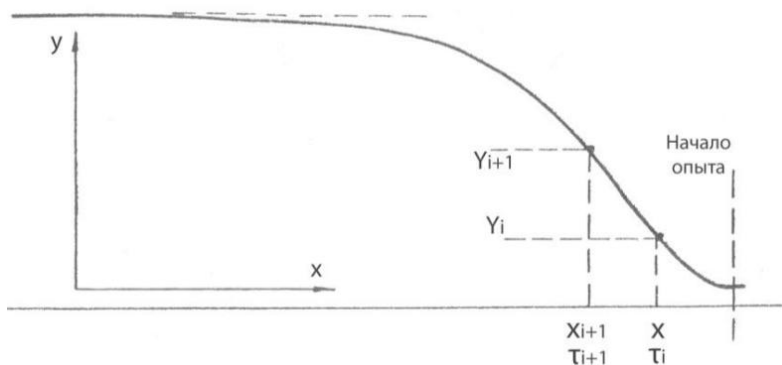


Рис. 2.4

Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с конструкцией установки 1 и схемой измерения.
2. Записать наименования, марки и номера измерительных приборов, их класс точности и диапазон, в котором проводится измерение.
3. Получив разрешение преподавателя, включить измерительную аппаратуру и, если задано, термостатирующую жидкостную систему.
4. Установить заданную преподавателем величину тока питания I и регистрировать изменения температуры охлаждаемого объекта во времени или на диаграмму самописца.
5. Провести аналогичные измерения для заданных значений тока питания термоэлектрического преобразователя.
6. Сообщить преподавателю о завершении программы эксперимента и отключить питание термобатареи, измерительную аппаратуру и термостат.

Обработка результатов эксперимента

В начальный момент включения термобатареи (1-2 мин) или, если блок 3 термостатирован, выполняются следующие условия:

$$T_{\Gamma} = T_{X \text{ нач}} = T_{\Pi \text{ нач}} = T_{cp}.$$

В этих условиях переток теплоты от горячих спаев к холодным

$$q_{\lambda} = \sigma_{TB} (T_{\Gamma} - T_{X})_{\tau=0} = 0 ;$$

теплоприток к охлаждаемому цилиндру от окружающей среды

$$q_{cp} = \sigma_{343} (T_{cp} - T_{\Pi})_{\tau=0} = 0 ;$$

и из уравнений (2.8) и (2.23) можно найти

$$\alpha \approx \frac{1}{T_{cp} \cdot I} \left(C_{\Sigma} \cdot \vartheta + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot R_{\Pi} \right) \quad (2.24)$$

На конечном участке опыта при максимальном перепаде температур $T_{cp} - T_{\Pi \text{ кон}}$, подставив найденные ранее α и $W_x = \sigma_{TB}(T_{cp} - T_{\Pi \text{ кон}})$ в выражение (2.8), оценим

$$\sigma = \left[\alpha \cdot T_{\Pi \text{ кон}} \cdot I - \frac{1}{2} I^2 \cdot R - \sigma_{343} (T_{cp} - T_{\Pi}) \right] / (T_{B1} - T_{\Pi \text{ кон}}), \quad (2.25)$$

приняв приближенно, что $T_{\Gamma} = T_{B1}$, $T_X = T_{\Pi \text{ кон}}$.

Оформление отчета

1. Представить таблицы $E(\tau)$ и диаграммную ленту.

2. Представить значения холодопроизводительности $W_x(\tau)$ для нескольких значений времени (6-7 точек), значения α (2.24), σ_{TB} (2.25), Z (2.13) и $T_{x \text{ мин}}$ (2.9). Напомним, что R_{TB} изучаемой термобатареи равно $R_{TB} = 0,235 \text{ Ом}$.

3. Оценить относительную погрешность единичного измерения $\Delta W_x / W_x$.

Контрольные вопросы

1. Из каких основных элементов собрана лабораторная установка 1?

2. В чем заключается принцип работы термоэлектрического преобразователя в режиме теплового насоса охлаждения?

3. Какими аналитическими соотношениями описывается поглощение тепла на холодных спаях и выделение его на горячих?

4. Каково качественное влияние определяющих параметров, входящих в формулы на исследуемые характеристики термобатареи?

5. Какова размерность измеряемых параметров?

6. Как измеряется температура в опыте? Это прямые или косвенные измерения?

7. Как оценить погрешность единичного измерения, серии измерений?

2.3. Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В ОТОПИТЕЛЬНОМ ЦИКЛЕ

Цель работы: экспериментальное изучение работы термоэлектрического преобразователя в отопительном цикле режима теплового насоса.

Описание лабораторной установки

Схематическое изображение лабораторной установки 2 показано на рис. 3.1. Основу установки представляет многоспайная термобатарея 1 с каналами 2, 3 для подвода и отвода жидкости (воды от сети водопровода или от термостата). На входе и выходе жидкости из каналов установлены термопары 4, 5, 6, 7 для измерения температуры $T_{вх}$ жидкости на входе в канал и разности температур ΔT входа и выхода в результате нагрева или охлаждения жидкости в канале.

Все термопары выведены на блок холодных спаев БХС 8, обеспечивающий стабилизацию и равенство температур электродов термопар. Переключателем 9 термопары могут быть подключены непосредственно или как дифференциальная термопара к прибору 10 для измерения термоЭДС термопар. Ввиду малых уровней ЭДС термопар (от микровольтов до милливольт) измерение ЭДС производится гальванометрами типа М 195/1 (чаще для дифференциальных термопар), цифровыми приборами микровольтового диапазона либо потенциометрами типа ПП-63.

Термобатарея установлена в корпусе 1 лабораторной установки и закреплена к снованию корпуса (рис. 3.2). Передняя панель 2 корпуса может быть открыта (вперед) для доступа к термобатарее и термопарам. На откидной панели также смонтированы блок холодных спаев БХС 3, переключатель

термопар 4 и клеммы 5 для подключения термопар к прибору для измерения их ЭДС.

На неподвижной части передней панели установлены поплавковые расходомеры 6 РМ (РС) для измерения расходов жидкости в каналах термобатареи (холодного G_x и горячего G_g потока).

На заднюю стенку корпуса выведены шланги и патрубки подачи и отвода жидкости и клеммы питания термобатареи.

Для исследования работы термобатареи в режиме теплового насоса (как в холодильном, так и в отопительном циклах) к клеммам термобатареи подключается источник питания 2 (см. рис. 3.1) постоянного тока - выпрямитель. Рабочее напряжение измеряется вольтметром 12, а ток амперметром 13.

Для изучения работы термобатареи в режиме электрического генератора в каналы подается нагретая вода от термостата 15 и холодная - от водопроводной сети, а к клеммам батареи подключается дискретный набор сопротивлений внешней нагрузки (14) или регулируемое сопротивление (реостат).

В режиме отопительного цикла за счет затрат энергии от источника питания термобатарея позволяет обеспечить передачу тепла от менее нагретых тел T_x к более нагретым T_g за счет эффекта Пельтье. При этом на холодном спае поглощается тепловая энергия с мощностью

$$W_{II} = \alpha \cdot T_x \cdot I \quad , \quad \text{Вт} \quad , \quad (3.1)$$

которая частично компенсируется (уменьшается) теплопритоком через вещество электродов термобатареи

$$q_{\lambda} = \sigma_{TB} (T_g - T_x) \quad , \quad \text{Вт} \quad (3.2)$$

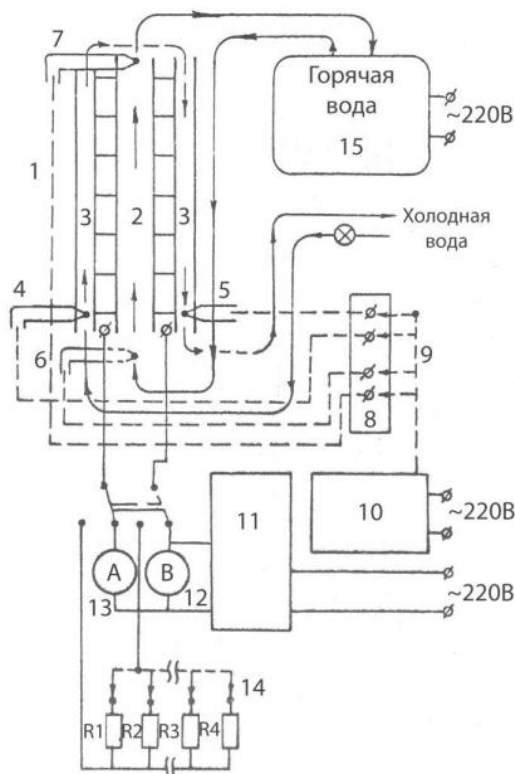


Рис. 3.1. Схема лабораторной установки

Кроме того, на холодном спае выделяется еще, и половина Джоулевых потерь за счет внутреннего сопротивления термо-батареи:

$$\frac{1}{2}W_{\text{д}} = \frac{1}{2}I^2 \cdot R \quad (3.3)$$

В результате действия перечисленных факторов от холодных спаев может быть отведено количество тепловой энергии потока

$$W_x = I \cdot \alpha \cdot T_x - \sigma_{\text{ТБ}}(T_{\Gamma} - T_x) - \frac{1}{2} I^2 \cdot R, \text{ Вт} \quad (3.4)$$

Как видно из уравнения (3.4), термобатарея может работать в отопительном цикле лишь при условии, что теплота (мощность) Пельтье превышает кондуктивный теплоприток и половину Джоулевых потерь.

На горячем спае термобатареи в результате действия тех же факторов будет выделяться тепловая энергия мощностью

$$W_{\Gamma} = \alpha \cdot T_{\Gamma} \cdot I + \frac{1}{2} I^2 \cdot R - \sigma_{\text{ТБ}}(T_{\Gamma} - T_x) \text{ , Вт} \quad (3.5)$$

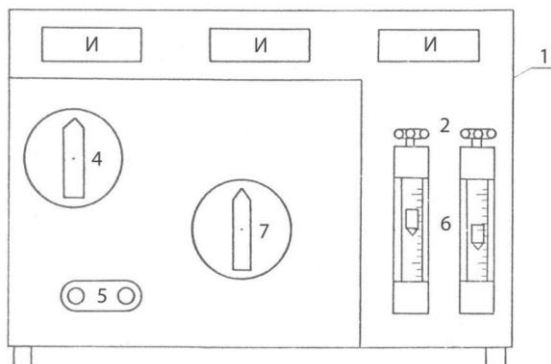


Рис. 3.2

Характеристиками рассматриваемого процесса являются: холодопроизводительность W_x ; теплопроизводительность W_{Γ} ; холодильный коэффициент $E = W_x/W_{\text{эл}}$; отопительный коэффициент $\mu_{\text{отоп}} = W_{\Gamma}/W_{\text{эл}}$.

Порядок проведения работы

1. Ознакомиться с конструкцией установки и схемой измерения.

2. Записать наименования, марки и номера измерительных приборов, их класс точности и диапазон, в котором проводятся измерения.

3. Получив разрешение преподавателя, включить измерительную аппаратуру и подачу жидкости в каналы термобатареи (от водопроводной сети). Установить заданный расход жидкости кранами расходомеров. В случае необходимости включить термостат, установить заданный преподавателем уровень температуры и подать нагретую жидкость на термобатарею.

4. Включить в сеть блок питания (выпрямитель) и установить заданные значения тока I питания термобатареи.

5. Дождавшись установления стационарного режима (ориентировочное время узнать у преподавателя), измерить изменения температуры на входе и выходе по каналам нагретой T_2 и холодной T_x жидкости $\Delta T_x = T_{x\text{ вх}} - T_{x\text{ вых}}$, $\Delta T_2 = T_{2\text{ вх}} - T_{2\text{ вых}}$ и величину расхода холодной G_x (кг/с) и нагретой G_2 жидкости (градуировки расходомеров хранятся у преподавателя (лаборанта).

Провести аналогичные измерения для других заданных значений тока питания I .

6. Сообщить преподавателю о завершении программы эксперимента и отключить питание термобатареи, подачу воды, питание измерительной аппаратуры. Показать преподавателю результаты измерений и подписать их.

Обработка результатов измерений и оформление отчета

1. Воспользовавшись справочными данными по теплоемкости воды при измеренных температурах T_2 и T_x , вычислить

$$W_x = c_p(T_x) \cdot G_x \cdot \Delta T_x \quad (3.8.)$$

$$W_G = c_p(T_G) \cdot G_G \cdot \Delta T_G \quad (3.9)$$

при различных значениях I и, сопоставив с аналогичными величинами, найденными из выражений (3.4), (3.5), оценить расхождение между ними.

2. Оценить погрешность единичного определения $\Delta W_{x,G}/W_{x,G}$ по формулам (3.4), (3.5) и (3.8), (3.9).

3. Рассчитать величину холодильного E (3.6) и отопительного $\mu_{\text{отоп}}$ (3.7) коэффициентов. Построить графики: W_x (3.4), (3.8); W_z (3.5), (3.9); E ; $\mu_{\text{отоп}}$ как функции тока питания I .

Контрольные вопросы

1. Из каких основных узлов состоит лабораторная установка?

2. В каких случаях термобатарея может работать в отопительном цикле?

3. Какими выражениями описывается выделение тепла на горячих спаях и поглощение на холодных спаях термобатареи?

4. Какова размерность параметров, входящих в расчетные формулы? Каково их качественное влияние на исследуемые характеристики термобатареи?

5. Как измеряют температуры и перепады температур в работе? Прямые это измерения или косвенные?

6. Как изменится погрешность измерения исследуемых характеристик с увеличением числа измерений?

2.4. Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В РЕЖИМЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

Цель работы: экспериментальное изучение работы термоэлектрического преобразователя в режиме генерирования электрической энергии.

Введение

Если в каналы термобатареи (см. рис. 3.1 в работе №3) подать жидкость различной температуры, то на клеммах батареи (при разорванной внешней цепи) появится ЭДС холостого хода $E_{xx} = f(\Delta T)$, $\Delta T = T_r - T_x$.

Если к клеммам батареи подключить внешнюю нагрузку R_H , то в цепи будет протекать ток

$$I = \frac{E}{R_{TB} - R_H} = \frac{\alpha \cdot \Delta T}{(m+1) \cdot R_{TB}}, \quad m = \frac{R_H}{R_{TB}} \quad (4.1)$$

Полезная мощность $W_{эл}$, выделяющаяся на нагрузке,

$$W_{эл} = I^2 \cdot R_H = \frac{\alpha^2 \cdot (\Delta T)^2}{R_{TB}} \cdot \frac{m}{(m+1)^2}. \quad (4.2)$$

Коэффициент полезного действия КПД термобатареи η оценивается как отношение полезной мощности $W_{эл}$ к тепловой энергии, подведенной к батарее (к горячим спаям)

$$\eta = \frac{W_{эл}}{Q_r} = \frac{T_r - T_x}{T_r} \cdot \frac{m}{m+1} \cdot \left(1 + \frac{\lambda \cdot \rho}{\alpha^2} \cdot \frac{m+1}{m} - \frac{1}{2} \cdot \frac{T_r - T_x}{T} \cdot \frac{1}{m+1} \right)^{-1} \quad (4.3)$$

где λ , p - теплопроводность и удельное электросопротивление материала электродов термобатареи; $Z = \alpha^2/(\lambda \cdot p)$ - параметр термоэлектрической эффективности.

Каждая термобатарея проектируется таким образом, чтобы обеспечить или приблизиться (насколько возможно по конструктивным и технологическим ограничениям) к оптимальному соотношению геометрических S_i , l_i и физических параметров λ_i , p_i .

$$\frac{S_1}{S_2} = \sqrt{\frac{\rho_1 \cdot \lambda_1}{\rho_2 \cdot \lambda_2}},$$

где S_i - поперечное сечение ветвей термоэлемента.

Как и другие генераторы, термобатарея вырабатывает максимальную мощность при $m = 1$, т.е. $R_{TB} = R_H$. При этом КПД батареи

$$\eta = \frac{1}{2} \eta_k \left(1 + \frac{2}{Z \cdot T_\Gamma} - \frac{1}{4} \eta_k \right)^{-1}, \quad \eta_k = (T_\Gamma - T_X)/T_\Gamma, \quad (4.4)$$

где η_k соответствует КПД идеального цикла Карно.

Для получения максимального на данном уровне температур КПД необходимо обеспечить условие

$$m(\eta_{MAKC}) = M^* - \sqrt{1 + Z \cdot T_\Gamma \cdot \eta_k / 2}$$

и тогда

$$\eta_{MAKC} = \eta_k \left(M^* - 1 \right) / \left(M + T_\Gamma / T_X \right). \quad (4.5)$$

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с конструкцией установки 2 и схемой измерений.

2. Записать наименования, марки и номера измерительных приборов, их класс точности и диапазон измерений.

3. Получить разрешение преподавателя, включить измерительную аппаратуру и термостат.

4. Задать на термостате необходимый уровень температуры нагретой жидкости.

5. Подать холодную и нагретую жидкость в каналы термобатарей и дожидаться установления стационарного режима (ориентировочное время узнать у преподавателя).

6. Измерить напряжение холостого хода E_{xx} (при разомкнутой внешней цепи $R_n = \infty$) и затем, устанавливая переключателем различные (заданные преподавателем) значения внешней нагрузки, записать значения токов $I = f(R_n)$.

7. Провести аналогичные измерения для других значений температуры нагретой жидкости согласно заданию.

8. Сообщить преподавателю о завершении программы эксперимента и отключить: термостат, подачу жидкости к термобатарее и измерительные приборы. Показать преподавателю результаты измерений и подписать их.

Обработка результатов измерений и оформление отчета

1. Для каждого заданного уровня температур холодной и нагретой жидкости вычислить $W_{эл} = I^2 R_n$ и построить графики $W_{эл} = f(R_n)$.

2. По максимуму $W_{эл}(R_n)$. оценить величину $R_{ТБ}$, исходя из условия $m = 1$ (4.1).

3. Оценить η_k и $\eta_{эсп}$, приняв $\eta_{эсп} = W_{эл}/Q_r$,

где $Q_r = c_p(T_r) \cdot G_r \cdot \Delta T_r$.

4. Оценить погрешность единичного определения $W_{эл}$, Q_r , η_k , $\eta_{эсп}$.

Контрольные вопросы

1. Из каких основных узлов состоит лабораторная установка 2?
2. В каких условиях термобатарея может работать в качестве электрического генератора?
3. Как оценить мощность в генераторном режиме?
4. Какова размерность параметров в расчетных соотношениях?
5. Каково качественное влияние определяющих параметров на η и Q_r ?
6. Как измеряются в опыте температуры и перепады температур? Прямые это измерения или косвенные?
7. Какими путями можно снизить погрешность измерений исследуемых характеристик термобатареи?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Заключение по каждой работе должно содержать краткие выводы по результатам выполненной работы, оценку полноты решения поставленных задач, рекомендации по конкретному использованию результатов работы, её экономическую, научную, социальную значимость. Оценить возможные применения проделанной работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гриднев С.А. Термоэлектрические материалы: учебное пособие. - Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2014. – 130 с.
2. Гриднев С.А. Расчет термоэлектрических устройств: учебное пособие. - Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2014. – 114 с.
3. Охотин А.С. Методы измерения характеристик термоэлектрических материалов и преобразователей [Текст]: монография / А.С. Охотин, А.С. Пушкарский, Р.П. Боровикова, В.А. Симонов. – М.: Наука, 1974. – 159 с.
4. Гриднев С.А. Перспективные термоэлектрические материалы [Текст] / С.А. Гриднев, Ю.Е. Калинин, В.А. Макагонов, А.С. Шуваев // Альтернативная энергетика и экология. - 2013. - № 01/2 (118). - С. 117-125.
5. Гольцман Б.М. Полупроводниковые термоэлектрические материалы на основе Bi_2Te_3 [Текст]: монография / Б.М. Гольцман, В.А. Кудинов, И.А. Смирнов. – М.: Наука, 1972. – 320 с.
6. Булат Л.П. Термоэлектрическое охлаждение [Текст]: текст лекций / Л.П. Булат, М.В. Ведерников, А.П. Вялов; под ред. Л.П. Булата. – СПб: СПбГУНиПТ, 2002. – 147 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	1
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЛАБОРАТОРНОМ ПРАКТИКУМЕ.....	1
1.1. Задачи выполнения лабораторных работ.....	1
1.2. Тематика лабораторных работ.....	2
2. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ	
2.1. Лабораторная работа №1.....	3
Введение.....	3
Методика измерения термоЭДС.....	11
Задание на работу.....	15
Порядок выполнения работы.....	15
Требования к отчету.....	17
Контрольные вопросы.....	17
2.2. Лабораторная работа № 2.....	18
Введение.....	18
Описание лабораторной установки.....	24
Порядок проведения работы.....	27
Обработка результатов эксперимента.....	28
Оформление отчета.....	28
Контрольные вопросы.....	29
2.3. Лабораторная работа № 3.....	30
Описание лабораторной установки.....	30
Порядок проведения работы.....	33
Обработка результатов измерений и оформление отчета.....	34
Контрольные вопросы.....	35
2.4. Лабораторная работа № 4.....	36
Введение.....	36

Порядок выполнения работы.....	38
Обработка результатов измерений и оформление отчета.....	38
Контрольные вопросы.....	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	39
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	40

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению и оформлению лабораторных работ
по дисциплине «Термоэлектрические материалы и устройства
на их основе» для студентов направления 16.04.01
«Техническая физика» (магистерская программа «Прикладная
физика твердого тела»), по дисциплине «Термоэлектрические
системы охлаждения» для студентов направления 16.04.01
«Техническая физика» (магистерская программа «Физика
и техника низких температур») и по дисциплине «Физика
термоэлектрических и пьезоэлектрических явлений»
для студентов направления 16.03.01 «Техническая физика»
(профиль «Физическая электроника») очной формы обучения

Составитель Гриднев Станислав Александрович

В авторской редакции

Компьютерный набор С.А. Гриднева

Подписано к изданию 19.10.2017.
Уч.- изд. л. 2,4.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
технический университет»
394026 Воронеж, Московский просп., 14