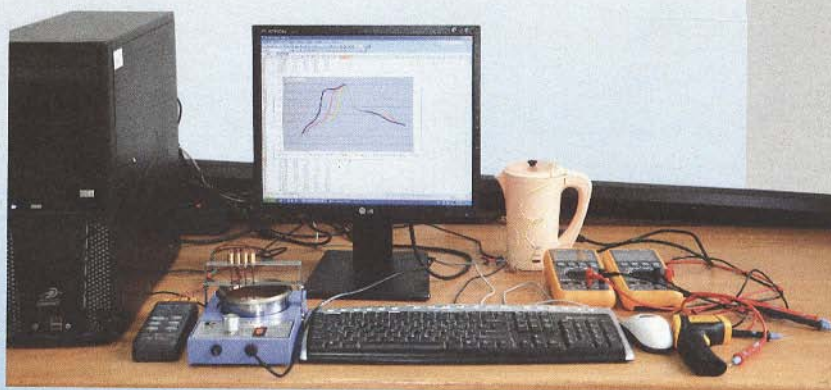




А. Д. Косинов, А. Г. Костюрина

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Физический факультет
Кафедра общей физики

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ

А. Д. Косинов, А. Г. Костюрина

Работа 9

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Учебно-методическое пособие

Новосибирск
2013

УДК 536.5(075.8) + 536.2(075.8)

ББК В3в642я73-5

К712

Косинов А. Д., Костюрина А. Г. Методы измерения температуры: Учеб.-метод. пособие / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2013.

50 с.

В данной лабораторной работе студенты знакомятся с методами измерения температуры в соответствии с программой измерительного практикума кафедры общей физики НГУ, изучают современные методы измерения температуры, проводят калибровку термопары, определяют температурный коэффициент терморезистора, измеряют температуру различных объектов контактным и бесконтактным методами.

Выполняется студентами 1-го курса физического и геолого-геофизического факультетов, а так же студентами 2-го курса медицинского факультета, факультета естественных наук и факультета информационных технологий.

Пособие может быть использовано при обучении студентов других естественнонаучных и технических факультетов.

Рецензент

доц., канд. техн. наук О. А. Брагин

© Интернет версия подготовлена для
сервера Физического факультета НГУ
<http://www.phys.nsu.ru>

Издание подготовлено в рамках реализации *Программы развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования НИУ-НГУ* на 2009–2018 годы.

© Новосибирский государственный
университет, 2013

© А. Д. Косинов, А. Г. Костюрина,
2013

Оглавление

Введение.....	4
Об измерении температуры.....	6
Тепловые свойства материалов.....	7
Теплопередача.....	7
Кристаллические и аморфные вещества.....	9
Способы измерения температуры.....	15
Типы термометров.....	15
Контактные методы.....	16
Жидкостно-стеклянные термометры	16
Электрические контактные термометры.....	17
Термометры сопротивления.....	17
Термоэлектрический термометр (термопара).....	19
Бесконтактные методы измерения температуры.....	26
Термометры излучения – пирометры.....	26
Подготовка к проведению эксперимента.....	30
Выполнение эксперимента.....	34
<i>Задание 1.</i> Регистрация зависимости ЭДС термопары от времени, её калибровка и определение коэффициента излучения олова.....	34
<i>Задание 2.</i> Изучение процесса теплопередачи в аморфных телах...37	37
<i>Задание 3.</i> Изучение зависимости сопротивления резистора от температуры.....	41
Анализ экспериментальных данных.....	42
Контрольные вопросы.....	44
Содержание отчёта.....	44
Защита отчёта.....	45
Приложение	46
Список литературы.....	50

Введение

Чтобы измерять температуру в быту, не нужно знать, что такое температура. Достаточно иметь представление, что «температура – это степень *нагретости* тела». Большинство приборов для измерения температуры, как правило, измеряют какие-то свойства веществ, зависящие от «*степени нагретости*». Это могут быть давление, объём, электрическое сопротивление и др. Далее результаты пересчитываются в единицы температуры.

Определение температуры даётся в курсах общей физики. Отметим, что понятие температуры тесно связано с усреднённой кинетической энергией частиц тела или заключённой в объём среды. В молекулярно-кинетической теории формируется представление, что теплоту можно рассматривать как одну из форм энергии – как кинетическую энергию атомов и молекул. Усреднённая по большому числу беспорядочно движущихся частиц, она однозначно характеризует то, что называется температурой тела.

Поскольку понятие температуры связано с усреднённой кинетической энергией частиц, кажется вполне естественным и в качестве единицы измерения использовать джоуль. Однако эта энергия мала по сравнению с джоулем, и использовать его оказывается неудобным. Температура измеряется другими единицами, которые можно получить из джоулей через коэффициент k . Величина k называется постоянной Больцмана и равна $1,3806505 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Например, если температура T измеряется в кельвинах (К), то для идеального газа средняя кинетическая энергия поступательного движения атомов выражается как

$$E_k = (3/2) kT.$$

Известно, что уравнение состояния идеального газа имеет вид:

$$p = nkT,$$

где $n = N/V$, V – объём, занимаемый газом, N – полное число молекул в этом объёме. Давление p линейно связано с абсолютной температурой через постоянную Больцмана k . С помощью уравнения состояния можно определить термодинамическую температуру T , если все другие параметры и константы известны.

Трудно представить себе более востребованную в жизни физическую величину, чем температура. Каждый день мы интересуемся температурой на улице, ощущаем температуру тела, контролируем температуру воды, создавая комфортные условия жизни, и т. д. В данной лабораторной работе студенты знакомятся с методами измерения температуры в соответствии с программой измерительного практикума НГУ.

Цель работы: изучение основ измерения температуры, проведение калибровки термопары, определение температурного коэффициента терморезистора, измерение температуры различных объектов контактным и бесконтактным методами.

Рекомендации по выполнению работы. Для правильного и быстрого выполнения работы необходимо изучение описания работы до прихода в практикум. Из описания нужно понять цель работы, смысл измеряемой величины, метод измерения, его ограничения, достоинства и недостатки, а также принцип работы приборов.

По возможности проверить используемые расчётные формулы и получить формулу для оценки погрешности. Расчёт погрешности измерительного прибора необходимо делать до проведения измерения, чтобы при записи результата оставлять правильное количество значащих цифр.

Все исходные экспериментальные данные должны записываться в рабочую тетрадь, при этом необходимо соблюдать следующие правила.

1. Расчётные формулы, схемы, исходные данные должны сразу записываться в рабочую тетрадь.
2. Следует также записать тип используемых приборов, их характеристики (например, класс точности, входное сопротивление, цену деления и т. д.).
3. Все результаты следует записывать в таблицы: исходные параметры, первичные, непосредственно измеренные величины с указанием их размерности и расчётные (обработанные).
4. Поскольку графики нагляднее таблиц, желательно представлять результаты эксперимента в графическом виде, при этом разумно выбирая масштаб осей координат и начало отсчёта.

Об измерении температуры

Согласно молекулярно-кинетической теории, под *температурой* понимается физическая величина, определяющая *среднюю* кинетическую энергию хаотического (теплового) движения микрочастиц вещества.

Измерение температуры можно проводить только косвенным методом, основываясь на зависимости от температуры таких физических характеристик тел, которые поддаются непосредственному измерению, их примеры приведены во введении. Применяемые для этого приборы называются *термометрами*, которые либо контактируют с объектом, либо принимают его электромагнитное излучение.

Температурные шкалы. Исторически единицей измерения температуры выбран градус, который равен 1/100 разности температуры кипения воды (T_K) и плавления льда (T_0) при нормальном атмосферном давлении, равном 760 мм рт. ст. В *шкале Цельсия* ($^{\circ}\text{C}$) они были приняты равными 100 $^{\circ}\text{C}$ и 0 $^{\circ}\text{C}$ соответственно, т. е. шкала Цельсия является линейной. Единицей измерения температуры в системе СИ является Кельвин. Кельвин равен градусу Цельсия.

Шкала Кельвина базируется на значении температуры для тройной точки воды, когда вода одновременно находится в трех состояниях: водяного пара, жидкости и льда. Температура тройной точки воды равна 273,16 К или 0,01 $^{\circ}\text{C}$. Шкала Кельвина также является линейной. Нулевая точка (0 К) соответствует температуре, при которой кинетическая энергия всех движущихся частиц равна нулю. Связь между значениями температуры по шкале Кельвина (T_K) и Цельсия ($T^{\circ}\text{C}$) имеет вид:

$$T_K = T^{\circ}\text{C} + 273,15^{\circ}\text{C}.$$

Примечания. 1. Значок «градус» не используется со словом Кельвин.

2. Между шкалами Цельсия и Кельвина существует разница в 0,01 $^{\circ}\text{C}$, вызванная тем, что нуль градусов Цельсия определяется не по тройной точке воды, а температурой, при которой лёд и насыщенный влагой воздух при нормальном атмосферном давлении находятся в динамическом равновесии (точка замерзания воды расположена ниже тройной точки воды на 0,00993 К). Причина этого различия в большой погрешности ранних измерений температуры.

В настоящее время используются также шкалы Фаренгейта и Реомюра.

В *шкале Фаренгейта* разность температур между таянием льда и кипением воды делится на 180 частей, причём температуре таяния льда приписана температура 32 градуса ($T_0 = 32^\circ\text{F}$), а температура кипения воды соответственно равняется $T_k = 212^\circ\text{F}$. Шкала Фаренгейта имеет более крутой наклон, так как $1^\circ\text{C} = 1,8^\circ\text{F}$. Связь между температурами, выраженными в градусах Цельсия и Фаренгейта, имеет вид:

$$\frac{T^\circ\text{C}}{100} = \frac{(T - 32)^\circ\text{F}}{180} \quad \text{или} \quad ^\circ\text{C} = (^\circ\text{F} - 32)/1,8.$$

В некоторых странах используется *шкала Реомюра*, в которой в качестве опорных точек выбрана температура таяния льда (0°R) и температура кипения воды, которой приписывается температура 80°R . Такой выбор определился тем, что термометр заполняется смесью воды со спиртом, которая между точками замерзания и кипения расширяется на 8 %. Связь между температурами, выраженными в градусах Цельсия и Реомюра, имеет вид:

$$T^\circ\text{R} = \frac{4}{5} T^\circ\text{C}.$$

Сравнительные шкалы температур приведены в приложении (табл. П1).

Тепловые свойства материалов

Теплопередача

Теплопередача (или теплообмен) – это совокупность процессов, приводящих к передаче тепловой энергии от одного тела к другому. Теплообмен происходит между телами или частями одного тела, нагретыми до различной температуры. Передача теплоты путём теплообмена может осуществляться как при непосредственном контакте тел (теплопроводность и конвекция), так и через лучеиспускание (испускание или поглощение электромагнитного излучения).

Теплопроводность – механизм переноса тепла ΔQ от более нагретых участков тела к менее нагретым частям за счёт теплового движения атомов, молекул, ионов и т. п. Этот вид теплопередачи

характерен как для твёрдых веществ, так и для жидкостей и газов.

Количественной мерой переноса тепла является вектор плотности теплового потока q Вт/м², указывающий направление переноса и численно равный количеству теплоты, проходящему через площадь стенки ΔS при градиенте температуры dT/dx :

$$q = dQ/dt = \Delta S dT/dx, \quad (1)$$

где Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности материала стенки.

Формулу (1) можно преобразовать следующим образом:

$$q = \frac{\Delta T}{\frac{\Delta x}{\Delta S}} = \frac{\Delta T}{R_T},$$

где величина R_T называется тепловым сопротивлением по аналогии с электрическим сопротивлением, т. е. коэффициент теплопроводности играет такую же роль, как и удельная электропроводность в формуле для электрического сопротивления.

Теплопроводность разных веществ не одинакова. Самую высокую теплопроводность имеют металлы (см. табл. 1).

Таблица 1

Значения коэффициента теплопроводности для некоторых веществ

Вещество	Температура, °С	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Медь	20	293 – 398
Латунь	20	109
Железо	20	5,85 – 7,10
Кирпич	20	0,4
Дерево	20	0,2
Средние значения		
Асбест	100	0,12 – 0,24
Лёд	0	2,1
Вода	20	0,6
Водяной пар	100	0,023
Воздух	0	0,024

Теплообмен с жидкостью или газом практически всегда сопровождается *конвекцией* – переносом теплоты *движущимися массами* жидкости или газа. При конвективном теплообмене плотность теплового потока определяется суммой молекулярной и конвективной составляющих $q = q_{\text{мол}} + q_{\text{конв}}$.

Теплообмен *излучением* осуществляется электромагнитными волнами, следовательно, при этом виде теплообмена не требуется непосредственного контакта между объектами или объектом и измерителем. Поглощение излучаемой энергии приводит к изменению теплового состояния тела, точно так же и излучение определяется тепловым состоянием (температурой) тела. Если среда, разделяющая поверхности с различной температурой, прозрачна для теплового излучения, то *радиационный* и *конвективный* теплообмен происходят одновременно.

Излучающая способность тел характеризуется коэффициентом излучения. Максимальный коэффициент излучения равен 1, что соответствует абсолютно чёрному телу – идеальному источнику электромагнитных излучений. Излучающая способность зависит от длины волны излучения. Например, белый лист бумаги в видимом диапазоне спектра обладает хорошей отражающей способностью и почти не излучает видимого света. Но в дальнем инфракрасном (ИК) диапазоне его отражающая способность значительно уменьшается, а излучающая способность возрастает до 0,92, что делает белую бумагу хорошим источником ИК-излучения.

Кристаллические и аморфные вещества

Свойства тел зависят от того, как они устроены. Любое тело состоит из множества маленьких частиц (атомов, молекул), расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Между частицами действуют силы притяжения и отталкивания, зависящие от расстояния между ними. В газообразном состоянии силы взаимодействия малы, поэтому газ заполняет весь, предоставленный ему объём. В твёрдом и жидком состоянии молекулы притягиваются настолько сильно, что тела *сохраняют объём*, а *твёрдое* тело – ещё и *форму*.

Все вещества при достаточно низких температурах находятся в твёрдом состоянии. Это означает, что, когда скорости теплового движения частиц становятся малыми, силы взаимодействия между ними настолько ограничивают перемещение атомов, что тело при-

обретает способность сохранять форму. По своим физическим свойствам и молекулярной структуре твёрдые тела разделяются на **кристаллические** и **аморфные**.

В кристаллических телах атомы или другие частицы, образующие кристалл (ионы, молекулы), располагаются в строгом порядке, образуя пространственные периодически повторяющиеся структуры (*кристаллические решётки*) во всем объёме тела (дальний порядок). Кристаллы, как правило, *анизотропны*, т. е. свойства кристаллов неодинаковы по различным направлениям. При температурах ниже точки кристаллизации кристаллическое состояние является устойчивым для всех твёрдых тел, при этом потенциальная энергия взаимодействия атомов минимальна. Это возможно только при такой конфигурации атомов в кристалле, при которой силы притяжения и отталкивания равны. Установлению идеального порядка в расположении атомов, т. е. образованию твёрдого тела, препятствует тепловое движение.

Чтобы вещество находилось в твёрдом состоянии, его тепловая энергия должна быть ниже потенциальной энергии взаимодействия атомов. *Идеальным* кристалл, в котором все атомы находятся в равновесии и обладают минимальной энергией, может быть только при *абсолютном нуле*.

Характерной особенностью аморфных тел является их *изотропность*, т. е. независимость всех физических свойств (механических, оптических и т. д.) от направления внешнего воздействия. Молекулы и атомы в изотропных твердых телах располагаются хаотично. По своей структуре аморфные тела очень близки к жидкостям, т. е. рассматриваются как переохлаждённые жидкости с аномально большим коэффициентом вязкости. При определённой температуре они могут находиться в твёрдом состоянии.

Кристаллические и аморфные вещества значительно отличаются по тепловым свойствам. Чтобы расплавить *кристаллическое* тело, его необходимо не только нагреть до температуры плавления (участок 1, рис. 1), но и продолжить подвод тепловой энергии, которая расходуется на разрушение кристаллической структуры. Следовательно, во время плавления температура кристаллического тела не меняется (участок 2), т. е. процесс плавления протекает изотермически.

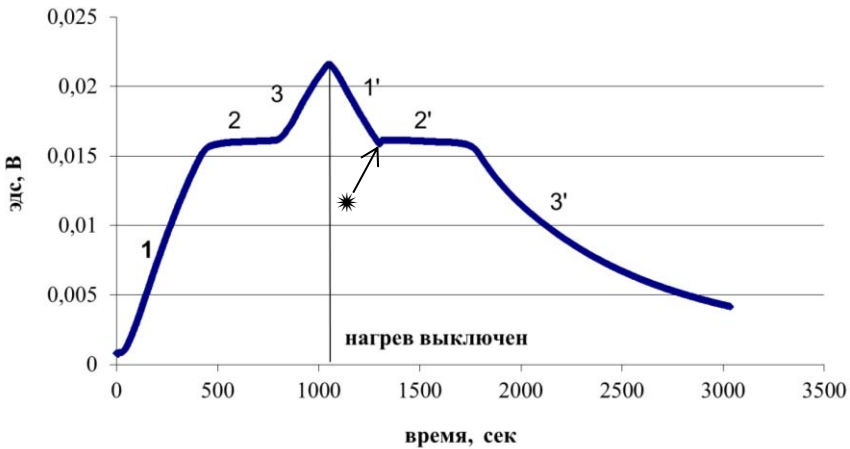


Рис. 1. Диаграмма плавления и кристаллизации олова

После образования жидкой фазы происходит процесс нагрева как однородной жидкости (участок 3). Следует отметить, что кривизна и наклон кривой нагревания зависят от массы нагреваемого тела, его свойств и мощности нагревателя.

После прекращения нагрева температура жидкости будет понижаться и кривая зависимости пойдет вниз (участок 1'). При достижении температуры плавления начнётся процесс кристаллизации, при котором происходит выделение теплоты кристаллизации, равной теплоте плавления. Выделяемая теплота расходуется на образование кристаллической решётки, поэтому температура вещества остаётся постоянной (участок 2'). По окончании процесса кристаллизации выделение теплоты кристаллизации прекратится, и тело начнёт охлаждаться (участок 3').

Примечание. Процесс кристаллизации происходит в двухфазной системе, где уже имеются зародыши твёрдой фазы в виде мельчайших кристалликов. Если зародышей нет, то может происходить переохлаждение жидкости (участок * на рис. 1). При достаточно сильном переохлаждении начинается самостоятельное образование зародышей, и жидкость кристаллизуется.

Поведение *аморфных* тел при нагревании существенно отличается. При повышении температуры вязкость аморфных тел уменьшается, т. е. они постепенно размягчаются (не имея определённой температуры плавления) и плавно превращаются в маловязкую жидкость (1, 2), т. е. становятся полностью изотропными. Для аморфных тел нет определённой температуры перехода в жидкое состояние. Можно лишь указать *интервал температур*, в пределах которого происходит размягчение тела (рис. 2).

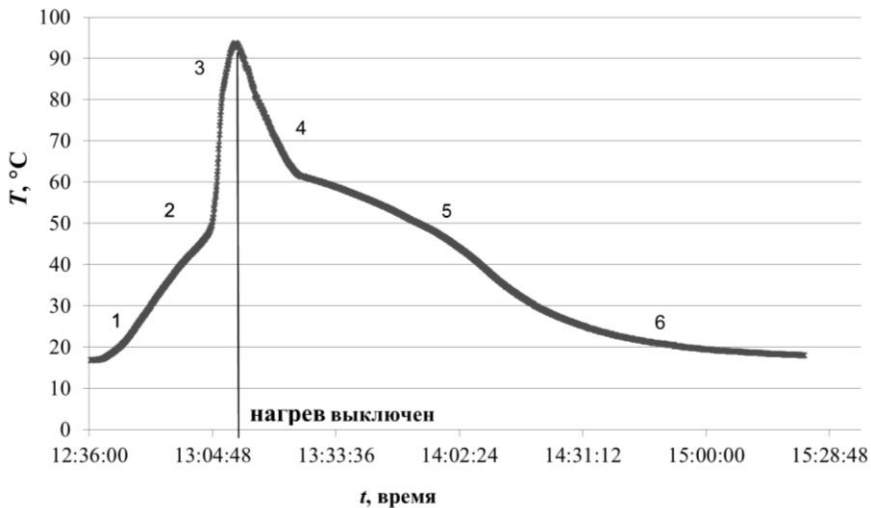


Рис. 2. Диаграмма размягчения и затвердевания аморфного тела

Затвердевание аморфного тела происходит тоже постепенно, но при этом можно различать три стадии: первая — охлаждение расплавленного аморфного тела (4), вторая — его затвердевание (5), третья — охлаждение застывшего тела (6).

Следует отметить, что аморфные тела, как правило, имеют большой коэффициент термического расширения (сжатия) и малую теплопроводность (см. табл. 1). Поэтому при их охлаждении в первую очередь охлаждаются и сокращаются поверхностные слои и истончённые участки. Вследствие неравномерного охлаждения в отдельных участках возникают внутренние напряжения, которые могут привести к деформации поверхности.

В данной работе исследуемым аморфным веществом является пчелиный воск или парафин.

Воски – исторически сложившееся название разных по составу и происхождению продуктов, преимущественно природных, которые по свойствам близки пчелиному воску.

Природные воски представляют собой пластичные легко размягчающиеся при нагревании продукты, большинство из которых плавится в интервале $40 \div 90$ °С.

Состав **пчелиного воска** – смесь сложных эфиров (72 %), насыщенных углеводов (12 ÷ 15 %) и свободных жирных кислот (15 %), относительные количества которых зависят от условий питания пчёл и других факторов. В нём также имеются красящие, ароматические вещества, вода, минералы, смолы, прополис, пыльцевые зёрна, остатки коконов личинок и т. д. В целом воск содержит около 300 различных веществ.

Свойства пчелиного воска. Пчелиный воск – биологически активный продукт с обширными фармацевтическими и лечебными свойствами, сохраняющимися даже после его переработки.

Основными физическими свойствами воска являются:

- Плотность $0,95 \div 0,96$ г/см³, т. е. воск легче воды в твердом состоянии, а при плавлении его удельная масса ещё снижается.
- Температура плавления $62 \div 68$ °С.
- Вязкость.
- Растворимость.
- Взаимоотношение с металлами.

С точки зрения физических свойств воск представляет собой твёрдое вещество от белого до жёлто-бурого цвета с характерным медовым запахом. При температуре 35 °С он становится пластичным. Плавится при температуре $62 \div 68$ °С, кипит при температуре 100 °С, а гореть начинает при 300 °С.

Воск нерастворим в воде и глицерине, плохо растворяется в спирте, но хорошо растворяется в жирах, эфирных маслах, парафине, скипидаре, бензине, хлороформе, эфире. Большое количество эфиров предохраняет воск от вступления в химические реакции с другими веществами (кроме щелочей). Поэтому воск может храниться десятилетиями, не меняя своих свойств.

Применение. Пчелиный воск входит в состав многих лекарственных препаратов, косметических средств. Он обладает антибиотическим действием, сдерживая рост и развитие ряда болезнетворных микроорганизмов.

Воск широко используется в современной промышленности: деревообрабатывающей, литейной, пищевой, автомобильной, авиационной, парфюмерной, в электротехнике, кожевенном производстве и т. д. Воск входит в состав красок для живописи, применяется в изготовлении анатомических препаратов и муляжей для обучения студентов медицинских вузов.

Твёрдый парафин представляет собой плотную массу, состоящую из предельных и циклических углеводородов, получаемых из нефти. Различают легкоплавкие парафины, с температурой плавления $40 \div 48$ °С, и высокоплавкие, с температурой плавления $52 \div 56$ °С. В зависимости от условий охлаждения парафин имеет вид либо чешуйчатой грубо кристаллической массы, либо прозрачной аморфной. Парафин достаточно широко используется в медицине, технике, для приготовления парафиновой бумаги, при пропитке резиновых изделий, изготовлении свечей, спичек, в электротехнике (изоляция), химической промышленности и т. д.

Способы измерения температуры

Измерение температуры производится с помощью устройств, использующих различные термометрические свойства жидкостей, газов и твёрдых тел.

Типы термометров

В таблице 2 приведены наиболее распространённые устройства для измерения температуры и примерные диапазоны применения.

Таблица 2

Термометрическое свойство	Наименование устройства	Пределы длительного применения, °C	
		Нижний	Верхний
Тепловое расширение	Жидкостные стеклянные термометры	–190	600
Изменение электрического сопротивления	Электрические термометры сопротивления	–200	500
	Полупроводниковые термометры сопротивления	–90	180
Термоэлектрические эффекты	Термоэлектрические термометры (термопары) стандартизованные	–50	1600
	Термоэлектрические термометры (термопары) специальные	1300	2500
Тепловое излучение	Оптические пирометры	700	6000
	Радиационные пирометры	–50	3000
	Фотоэлектрические пирометры	600	4000
	Цветовые пирометры	1400	2800

При измерении температуры происходит перенос тепловой энергии: она либо отнимается от измеряемого объекта, либо добавляется. Последнее происходит в том случае, когда измеряемая температура ниже температуры датчика. Теплообмен между объектом и датчиком может приводить к систематическим погрешностям при измерении.

Поскольку теплообмен может осуществляться как при непосредственном контакте тел, так и через электромагнитное излучение, то, соответственно, измерение температуры можно проводить контактными и бесконтактными методами, принцип действия которых рассмотрим далее.

Контактные методы измерения

Жидкостно-стеклянные термометры

Действие жидкостно-стеклянных термометров основано на явлении теплового расширения тел, которые могут быть твёрдыми, жидкими и газообразными. Вследствие существенно большего теплового расширения жидкости в сравнении со стеклянным (кварцевым) резервуаром, в который она заключена, при изменении температуры изменяется длина столбика жидкости, находящейся в капилляре. Температуру определяют по положению мениска относительно шкалы, нанесённой непосредственно на капилляр.

Жидкостные термометры применяют для измерения температур в диапазоне от -200 до 750 °C. При измерении температур от -39 до 550 °C применяются термометры из стекла, в которых термометрическим телом является ртуть, а температурным параметром – её объём. Температура кипения ртути при атмосферном давлении равна $+356,58$ °C, поэтому для измерения более высоких температур (до $+750$ °C) над уровнем ртути должен находиться инертный газ под давлением до 70 атм.

Для измерения низких температур до -80 °C применяются спиртовые термометры, а для температур до -200 °C – заполненные пен-таном.

Электрические контактные термометры

Принцип действия электрических контактных термометров основан на зависимости электрических свойств вещества от температуры. Электрические контактные термометры разделяются на две группы: термометры сопротивления, в которых активное сопротивление чувствительного элемента изменяется от температуры, и термоэлектрические термометры (термопары), в которых при изменении температуры изменяется термоэдс.

Термометры сопротивления

Электрическое сопротивление любого материала зависит от температуры. Если эта зависимость известна и достаточно точно воспроизводима, то её можно использовать и перейти от измерения температуры к измерению сопротивления. На этом принципе основана работа термометров сопротивления – *терморезисторов*. Терморезисторы могут быть изготовлены из чистых металлов (платина, медь, никель, железо) или из полупроводников.

Металлический термометр представляет собой резистор, выполненный из чистой металлической проволоки или плёнки и имеющий известную зависимость электрического сопротивления от температуры, которую для чистых металлов можно записать в виде степенного ряда:

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \gamma(T - T_0)^3 + \dots], \quad (2)$$

где $R(T)$ – сопротивление резистора при температуре T , $R(T_0)$ – его сопротивление при определённой эталонной температуре T_0 .

Если температурный диапазон измерения не слишком велик, то в формуле (2) достаточно оставить первые два слагаемых. Тогда это уравнение примет вид:

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha(T - T_0)], \quad \text{при } T_0 = 0^\circ\text{C}, \quad R_T = R_0(1 + \alpha T), \quad (3)$$

т. е. в малом диапазоне температур зависимость сопротивления от температуры можно считать линейной.

Температурные коэффициенты α , β и γ определяются через измерение сопротивлений при определённых температурах.

Наиболее распространённый тип металлических термометров – платиновый, так как платина имеет высокий температурный коэф-

коэффициент сопротивления α , который при $T = 273 \text{ К}$ равен $\alpha = 3,85 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$, коэффициенты же β и γ малы ($\beta = 5,83 \cdot 10^{-7} \text{ К}^{-2}$, $\gamma = -3,14 \cdot 10^{-12} \text{ К}^{-3}$), поэтому платиновый термометр имеет практически линейную зависимость сопротивления от температуры в широком диапазоне температур. Диапазон измерения температуры платиновым термометром сопротивления от -200 до $+1100 \text{ }^\circ\text{С}$.

Достаточно широко используются термометры, выполненные из никеля и меди. Никелевый термометр имеет более высокий температурный коэффициент: в диапазоне температур ($0 \div 100$) $^\circ\text{С}$, $\alpha = 5,8 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$. Диапазон температур, измеряемых никелевыми термометрами, – от 0 до $300 \text{ }^\circ\text{С}$. Медь имеет температурный коэффициент $\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ и достаточно хорошую линейность. Но при высоких температурах медь легко окисляется, поэтому медные термометры используются в малом температурном диапазоне от -50 до $+150 \text{ }^\circ\text{С}$.

Достоинством металлических термометров являются хорошая воспроизводимость, стабильность, точность, линейность.

В **полупроводниках изменение сопротивления** связано с изменением числа свободных носителей заряда. При повышении температуры число свободных носителей заряда увеличивается согласно соотношению:

$$n = n_0 e^{-E_g/2kT},$$

где E_g – энергия, необходимая для преодоления запрещенной зоны, k – постоянная Больцмана. Для идеальных полупроводников (количество дырок и электронов одинаково) зависимость сопротивления R от температуры ($T \text{ К}$) имеет вид:

$$R(T) = A \exp(b/T), \quad (4)$$

Коэффициенты A и b зависят от свойств материала и геометрических размеров. Из уравнения (4) следует, что *при повышении температуры сопротивление полупроводников резко уменьшается*, т. е. они имеют отрицательный температурный коэффициент. Чувствительность полупроводникового датчика *значительно выше*, чем металлического (см. табл. 3). Такой чувствительный к температуре полупроводниковый резистор называют *термистором*.

Таблица 3

Характеристики некоторых термопреобразователей

Параметр	Термометр сопротивления	Термопара	Термистор
Чувствительность	0,1–10 Ом/°C	10–50 мкВ/°C	0,1–1,0 кОм/°C
Стабильность	0,01 %	0,5 %	1 %
Воспроизводимость	0,05 °C	0,1 °C	0,5 °C
Диапазон температур	от –200 °C до +850 °C	от –200 °C до +1600 °C	от –100 °C до +350 °C

Полупроводниковые термометры сопротивления имеют высокий температурный коэффициент, малые размеры и малую инерционность. Их недостатком является нелинейная зависимость сопротивления от температуры. Термисторы используются для измерения температуры в диапазоне от –100 до +300 °C. Термисторы относятся к классу датчиков абсолютной температуры.

Термоэлектрический термометр (термопара)

Термоэлектрический термометр, или термопара – давно известный и до сих пор очень распространённый в технических устройствах температурный датчик. Основной принцип действия термопары объясняется эффектом, который впервые был описан Томасом Зеебеком в 1822 г. Суть его состоит в следующем: если однородный проводник имеет разную температуру на измерительных контактах, то между контактами возникает разность потенциалов. В литературе даются также другие определения эффекта Зеебека, например, отмечается возникновение тока в замкнутой цепи из двух разнородных проводников при наличии градиента температур между спаями. Однако описанная Зеебеком суть этого явления объясняет основной принцип работы и устройства термопары. Согласно этому явлению, возникновение термоэдс происходит не только в месте спая, но и по всей длине термоэлектрода. Так или иначе, но сама природа термоэлектричества накладывает ограничение на точность измерений с помощью термопары. Поскольку генерирование

термоэдс происходит по длине термоэлектрода, то показания термопары существенно зависят от протяжённости области максимального градиента температуры вдоль проводников.

Опыт показывает, что если два разных металлических проводника привести в состояние контакта, то между проводниками возникает разность потенциалов, которую будем называть контактной разностью потенциалов. Величина контактной разности потенциалов не зависит ни от формы, ни от размера проводников и определяется лишь тем, какие это металлы и какова температура контакта.

Возникновение контактной разности потенциалов можно пояснить, воспользовавшись моделью свободных электронов. Согласно этой модели, электроны проводимости рассматриваются как электронный газ, заполняющий кристаллическую решётку металла. *Работа выхода* и *концентрация свободных электронов* являются индивидуальными характеристиками вещества и у разных металлов различны. В результате, если два разнородных проводника, находящиеся даже при *равной* температуре, привести в соприкосновение в одной точке, то произойдёт обмен электронами. Например, металл (при определённых условиях), имеющий меньшее значение работы выхода электронов, легче их теряет и заряжается положительно, а металл с большей работой выхода накапливает электроны и заряжается отрицательно. Появление контактной разности потенциалов E_0 в этом случае не зависит от температуры. С другой стороны, свободные электроны за счёт диффузии могут перемещаться через место контакта, а вызываемая этим механизмом контактная разность потенциалов $\mathcal{E}(T)$ зависит напрямую от абсолютной температуры. Благодаря этим двум механизмам исходно электронейтральные проводники могут зарядиться, и на их свободных концах появится контактная разность потенциалов. Электрический потенциал материала, принявшего электроны, становится отрицательным, а отдавшего — положительным. Разные концентрации электронов с двух сторон соединения создают электрическое поле, которое уравнивает процесс диффузии, в результате чего может устанавливаться некоторое равновесие.

Таким образом, если два разнородных проводника соединить в контакт (рис. 3, а), то на свободных концах проводников разность потенциалов \mathcal{E} будет равна:

$$\mathcal{E} = E_0 + \mathcal{E}(T).$$

Если контур замкнуть (рис. 3, б) а соединения оставить при *одинаковой* температуре, то электрические поля взаимно уничтожаются ($\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2$). Эквивалентная схема такой цепи приведена на рис. 3, в.

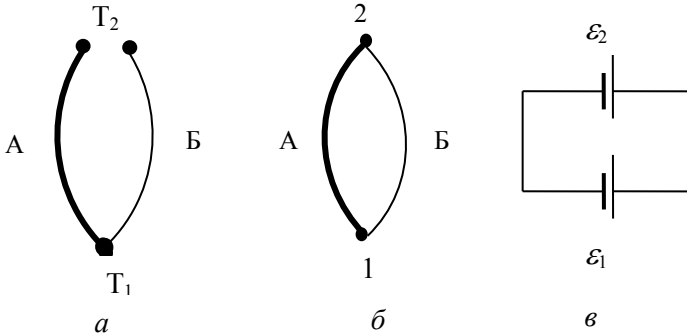


Рис. 3. Термопара и её эквивалентная схема

Если спаи 1 и 2 поддерживать при *разных* температурах, то возникающие за счет диффузии свободных электронов в контактах разности потенциалов будут различными, а результирующая ЭДС будет отличаться от нуля и вызовет появление тока в цепи. Величина этой ЭДС зависит только от разности температур ($T_1 - T_2$). Именно этот случай наиболее просто использовать для измерения температуры (разности температур). Так как величина термоэдс является мерой разности температур между двумя контактами, то выражение для неё можно записать в виде степенного ряда:

$$\mathcal{E}(T) = \alpha_1 (T - T_0) + \alpha_2 (T - T_0)^2 + \dots + \alpha_n (T - T_0)^n, \quad (5)$$

где T_0 – известная температура холодного спаи, α_n – n -ый температурный коэффициент. При увеличении n выражение (5) будет более точно описывать поведение термопары. Каждая термопара характеризуется собственным рядом *температурно-независимых* коэффициентов α_n , которые называются коэффициентами Зеебека. Коэффициенты пропорциональности α (чувствительность) зависят от температуры и у разных металлов разные (см. табл. 4 и рис. 4). Соответственно, разность потенциалов, возникающая между свободными концами спаянных (разных) проводников, также будет различной.

Таблица 4

Характеристики некоторых термопар

Термопара	Обозначение	Коэффициент термоэдс мкВ/К (при 25 °С)	Диапазон рабочих температур, °С
Платинородий/ платина	R	6,0	от 0 до +1550
Железо/ константан	J	51,7	от -270 до +1000
Медь/ константан	T	40,9	от -270 до +600
Хромель/ алюмель	K	40,6	от -270 до +1300
Хромель/ константан	E	60,9	от -200 до +1000
Хромель/ копель	L	63	от -200 до +600

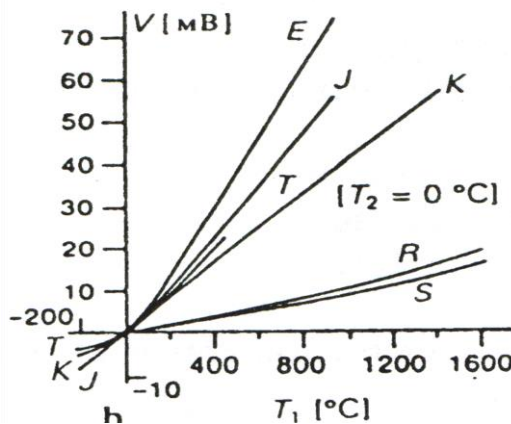


Рис. 4. Характеристики некоторых термопар

Если измерения производятся в сравнительно небольшом интервале температур, то можно в первом приближении считать зависимость линейной $\alpha = \text{const}$. Тогда, термостатируя «холодный» спай

при $T_0 = 0$ °С, измеряемую температуру можно рассчитать по формуле:

$$T = (\varepsilon/\alpha) \text{ } ^\circ\text{C}.$$

При подборе материалов для термоэлектродов стремятся к тому, чтобы чувствительность термопары была максимальной и не зависела от температуры.

Наилучшей линейностью характеристики среди термопар с термоэлектродами из неблагородных металлов обладает *хромель-алюмелевая* (ХА) термопара ($\alpha \doteq 40$ мкВ/К при 0 °С, $\alpha = 43$ мкВ/К при 500 °С), *наивысшей чувствительностью* – *хромель-копелевая* (ХК) термопара ($\alpha = 63$ мкВ/К при 0 °С, $\alpha = 88$ мкВ/К при 500 °С).

Подключение измерительного прибора. Для измерения термоэДС необходимо к свободным концам термопары подключить измерительный прибор (потенциометр или милливольтметр с большим входным сопротивлением).

Возможны два способа подключения термопары к измерителю (рис. 5): простой (а) и дифференциальный (б).

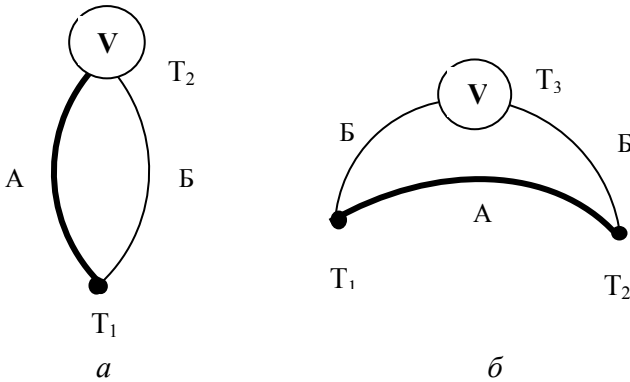


Рис. 5. Схема подключения измерительного прибора к термопаре

В первом случае измерительный прибор подключается непосредственно к двум термоэлектродам. При этом в месте подключения термоэлектродов к вольтметру/измерителю возникает дополнительная контактная разность потенциалов. В результате на вход измерительного прибора поступает сумма сигналов от рабочей термопары

(термоэдс) и дополнительная контактная разность потенциалов, возникшая в местах подключения термопары к измерителю.

При такой схеме подключения измерителя необходимо использовать специальные согласующие разъёмы, в которых компенсируется контактная разность потенциалов. Данный способ подключения термопары можно использовать только с такими разъёмами или с их аналогами.

Во втором случае (рис. 5, б) измерительный прибор включается в разрыв одного из проводников термопары. В результате получается встречное включение двух одинаковых термопар, при котором контактные эдс на клеммах измерительного прибора взаимно компенсируются (если находятся при одинаковой температуре), так как они равны по величине и противоположны по знаку. Такая термопара называется дифференциальной.

Дифференциальную термопару можно использовать для измерения разности температур между различными объектами или в разных точках одного объекта, т. е. для измерения *относительного* значения температуры. Обычно один из спаев помещают в термостат с известной температурой, что позволяет измерить и определить температуру объекта при изменении его теплового состояния.

Если последовательно соединить несколько (n) термопар, то получим *термоэлектрическую батарею*. Термоэдс такого прибора в n раз выше, чем у обычной термопары, соответственно, в n раз выше и чувствительность.

Современная тонкоплёночная технология позволяет получать дешёвые и удобные в употреблении термоэлектрические батареи с большим числом термопар, сосредоточенных на малой площади.

Измерение температуры с использованием термопары можно проводить как контактным, так и бесконтактным методами. При бесконтактном методе чувствительным элементом является зачернённая пластинка небольшого размера, а термопара или батарея термопар подсоединяется к ней с тыльной стороны.

Измерение температуры с помощью термопар имеет широкое распространение благодаря надёжной конструкции датчика, простоте, удобству монтажа, возможности измерения практически локальной температуры.

Достоинствами термопар являются малая инерционность, возможность измерения небольшой разности температур. Термопары

незаменимы при измерении высоких температур (вплоть до 2200 °С) в агрессивных средах. Термопары могут обеспечивать высокую точность измерения температуры (на уровне $\pm 0,01$ °С), вырабатывают на выходе термоэдс в диапазоне от микровольт до милливольт, однако требуют стабильного усиления для регистрации измерений.

Примечание

При использовании терморезисторов/термопар, как и любых других контактных преобразователей, надо иметь в виду, что преобразователь измеряет не температуру объекта, с которым находится в тепловом контакте, а температуру своего чувствительного элемента. Эти температуры могут отличаться. Также необходимо учитывать инерционность термодатчика. Например, при внесении терморезистора в среду с температурой $T_{\text{ср}}$ его температура будет изменяться во времени t по закону:

$$T = T_0 + (T_{\text{ср}} - T_0) [1 - \exp(-t/\tau)], \quad (6)$$

где T_0 – начальная температура датчика до внесения в среду, а τ – его постоянная времени. Для проволочного датчика τ может составлять от 0,1 с до 10 с.

Зная переходные характеристики датчика, можно определить температуру объекта, не дожидаясь, пока термодатчик нагреется до теплового равновесия с объектом, используя соотношение (6). Ограничив время погружения его в высокотемпературную среду, например, величиной $\sim 0,5$ с, получим начальный участок переходного процесса, по которому далее вычислим температуру среды.

Бесконтактные методы измерения температуры

Термометры излучения – пирометры

Если тело нагрето значительно выше температуры окружающей среды, то его теплообмен со средой происходит не только благодаря теплопроводности и конвекции, но и посредством электромагнитного излучения. Интегральная излучающая способность E абсолютно чёрного тела пропорциональна четвёртой степени температуры его поверхности:

$$E = \sigma T^4, \quad (7)$$

где σ – универсальная постоянная Стефана – Больцмана, равная $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴). Для тел, не являющихся абсолютно чёрными, интегральная излучающая способность описывается выражением:

$$E = \eta \sigma T^4, \quad (8)$$

где η – коэффициент излучающей способности, определённый для полного излучения тела.

Закон Стефана – Больцмана определяет мощность излучения, испускаемого поверхностью с температурой T в пространство с абсолютно нулевой температурой. При измерении температуры излучения тепловыми датчиками необходимо учитывать излучение от датчика к объекту, т. е. тепловые датчики определяют только разность между мощностью излучения тела и датчика. В результате полезная мощность измеряемого излучения равна

$$E_{\text{ит}} - E_{\text{ид}} = E_{\text{пол}} = A \sigma (T_m^4 - T_d^4),$$

где T_m и T_d – температура тела и датчика соответственно, а A – коэффициент излучающей способности данного тела.

Воспринимая это излучение, можно измерять температуру без непосредственного контакта с нагретым телом. Термометры, построенные на этом принципе, называют **термометрами излучения** или **пирометрами**. Поскольку интенсивность теплового излучения резко убывает с уменьшением температуры, то пирометрия используется для измерения относительно высоких температур. При температурах ниже 1000 °С они не являются основными средствами измерения, при $T > 1000$ °С – основные, а при $T > 3000$ °С – являются практически единственным методом измерения температуры.

При измерении температуры пирометрами излучение нагретого тела с помощью оптики фокусируется и направляется на тепловой приёмник, которым может быть термопара, термометр сопротивления, фоторезистор, фотодиод или фототранзистор.

Чувствительность термопар и термометров сопротивления практически не зависит от длины волны, поэтому они используются при измерении сравнительно низких температур. Остальные приёмники являются чувствительными в узком спектральном интервале длин волн, но температурная чувствительность у них существенно выше, чем у термопар и терморезисторов.

По принципу действия термометры излучения делят на *оптические* пирометры (яркостные и цветовые) и пирометры *полного излучения* (иногда называемые радиационными).

Яркостные (квазимонохроматические) пирометры – приборы, работающие в узком спектральном диапазоне. Они позволяют визуально определять температуру нагретого тела сравнением его цвета с цветом нити накаливания специальной пирометрической лампы. Если излучающая способность объекта близка к абсолютно чёрному телу, то регистрируемая пирометром температура будет равна истинной температуре объекта. Наибольшая точность измерений температуры в диапазоне $10^3 \div 10^4$ °С.

Цветовые (пирометры спектрального отношения) определяют температуру объекта, основываясь на результатах сравнения теплового излучения в двух диапазонах длин волн. Энергия излучения нагретого тела неравномерно распределяется между колебаниями с разной длиной волны. Потому выделив в спектре излучения накаливаемого тела два монохроматических излучения с разными длинами волн λ_1 и λ_2 , по соотношению яркостей этих излучений можно определить температуру накаливаемого тела.

Диапазон измерений температур пирометрами спектрального отношения $1400 \div 2500$ °С.

Пирометры полного излучения, которые иногда называют ИК термометрами (инфракрасные радиационные термометры), принимают излучение в максимально широком спектральном диапазоне. Определение температуры происходит посредством пересчёта значения мощности теплового излучения, поступающего на приёмник. В качестве приёмника в ИК термометрах используются звездооб-

разные термобатареи, состоящие из нескольких V-образных термопар, свободные концы которых скреплены и зачернены со стороны, на которую поступает излучение.

Положительной особенностью пирометров является то, что их можно применять для измерения:

- невысоких температур, при которых объект измерения не даёт видимого излучения;
 - температуры тел, более холодных, чем окружающая среда.
- В этом случае во время теплообмена между объектом измерения и теплоприёмником он не нагревается, а охлаждается.

Пирометры полного излучения применяются для измерения температур в диапазоне от -40 до 2500°C .

Несмотря на то что по точности пирометры уступают контактными датчикам температуры, они незаменимы там, где необходимо быстро и безопасно определить температуру поверхности.

Пирометры используют при:

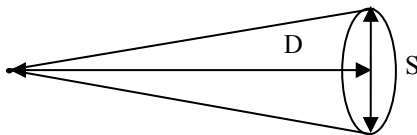
- измерении температуры удалённых и труднодоступных объектов;
- измерении температуры движущихся частей;
- обследовании частей, находящихся под напряжением;
- контроле высокотемпературных процессов;
- измерении температуры тонкого поверхностного слоя;
- обследовании частей, не допускающих прикосновения;
- обследовании материалов с низкой теплопроводностью;
- измерении высоких температур в газовых потоках при высоких скоростях.

Одним из самых новых применений инфракрасных термометров является медицинская практика. Приборы, дающие возможность получить изображение распределения температуры по поверхности объекта, называют тепловизорами.

Параметры ИК термометров

Большинство современных ИК термометров являются портативными и, как правило, очень простыми в обращении, но при их использовании для получения наиболее точных результатов необходимо учитывать оптическое разрешение и излучательную способность.

Оптическое разрешение определяется отношением диаметра пятна (круга) S на поверхности, излучение с которого регистрируется пирометром, к расстоянию до объекта D .



Пирометры измеряют среднюю температуру поверхности, находящейся в области чувствительности. Область чувствительности

пирометра можно представить конусом, вершина которого упирается в объектив прибора, а основание располагается на поверхности объекта. Чем больше величина D/S , тем более мелкие предметы пирометр может различать.

Необходимо иметь в виду, что точность измерений температуры значительно снизится, если происходит нацеливание ИК термометра на большую площадь, чем площадь измеряемого объекта. Большинство современных пирометров для точного наведения на объект измерения имеют специальный лазерный целеуказатель.

Коэффициент излучения. Коэффициент излучения (называемый иногда «степень черноты») характеризует способность поверхности тела излучать инфракрасную энергию. Этот коэффициент определяется как отношение энергии, излучаемой конкретной поверхностью при определенной температуре (8), к энергии излучения абсолютно чёрного тела при той же температуре (7). Он может принимать значения от очень малых, ниже 0,1, до близких к 1. ИК термометры, как правило, дают возможность устанавливать для каждого объекта свой коэффициент излучения. Неправильный выбор коэффициента излучения является основным источником погрешности для всех пирометрических методов измерения температуры. Для выбора коэффициента излучения существуют справочные таблицы для разных материалов и различной обработки поверхности (см. табл. 5). На коэффициент излучения сильно влияет окисление поверхности металлов. Например, если для окисленной стали коэффициент излучения равен $\sim 0,85$, то для полированной стали он снижается до 0,075.

Спектральный диапазон определяется как нижний и верхний предел длины волны (в мкм или нм) при достижении спектральной чувствительности 50 % от пика чувствительности.

Подготовка к проведению эксперимента

Во всех упражнениях данной работы для измерения температуры используется пирометр ARKOM PR480, характеристики которого приведены ниже.

Пирометр ARKOM PR480 предназначен для бесконтактного измерения температуры поверхности. Данный прибор позволяет безопасно измерять температуру горячих и труднодоступных объектов.

Особенности

- Жидкокристаллический дисплей с цифровым индикатором.
- Лазерный указатель цели.
- Автоудержание показаний.
- Индикация текущего заряда батареи.
- Автовыключение после 15 секунд бездействия.

Элементы прибора

1. Инфракрасный датчик, лазерный указатель цели.
2. Жидкокристаллический дисплей с цифровым индикатором и подсветкой.
3. Кнопка «°C/°F» – переключатель шкалы.
4. Кнопка «EMS» – изменение коэффициента излучения.
5. Кнопка \bigcirc/Δ – вкл./выкл. подсветки указателя.
6. Курок – включение прибора, начало измерения.
7. Отсек питания (в рукоятке).



Рис. 6. Элементы пирометра ARKOM PR480

Таблица 5

Технические характеристики

Параметр	Диапазон	Погрешность	Дискретность
Диапазон, погрешность, дискретность	– 50 ÷ 0 °С	±1,5 % или ±1,5 °С *	0,1 °С
	0 ÷ 480 °С.	±2 % или ±3 °С	
Повторяемость	±1 % или ±0,1 °С		
Оптическое разрешение **	12:1		
Время отклика	≤ 500 мс; 95% отклик		
Коэффициент Излучения	Регулируемый: 0,10 ÷ 1,00		
Спектральная Чувствительность	8 ÷ 14 мкм		

* Результирующая погрешность определяется большей величиной.

** Отношение расстояния D к размеру области измерения S .

Принцип действия

Оптика прибора воспринимает излучаемую, отраженную и проходящую тепловую энергию, которая собирается и фокусируется на детекторе. Электронная система прибора передаёт информацию на устройство, рассчитывающее температуру, и выводит её на дисплей.

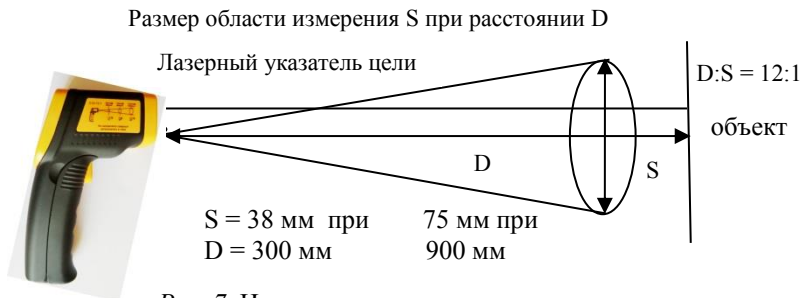





Рис. 7. Иллюстрация к пояснению принципа действия пирометра ARKOM PR480

Меры предосторожности

1. Не направляйте лазерный указатель цели в глаза или на сильно отражающую поверхность.
2. Прибор следует беречь от электромагнитных полей, воды и перепадов температуры.
3. На точность измерений влияют пар, пыль, дым и другие частицы, создавая помехи оптическим элементам прибора.

Индикаторы дисплея



1. **HOLD** – удержание показаний.
2. **SCAN** – измерение температуры
3.  – лазерный указатель включён.
4.  – подсветка включена.
5.  – текущий уровень заряда батареи.
6. «°C/°F» – единицы измерения.
7. **888.8** – измеренная температура.


Порядок работы

1. Для включения прибора и начала измерения нажмите и удерживайте курок. На дисплее появится мерцающий индикатор **SCAN**.



2. Наведите лазерный указатель на цель. На дисплее появятся показания.

3. Отпустите курок. Показания зафиксируются. Появится индикатор **HOLD**.

4. Для включения/выключения подсветки/указателя используйте кнопку /.

5. При включении лазерного указателя на дисплее появится индикатор , при выключении – индикатор исчезнет.

6. Для изменения коэффициента излучения нажмите кнопку «**EMS**».

Для увеличения коэффициента излучения нажмите кнопку /, для уменьшения – кнопку «°C/°F».

Коэффициент излучения следует задать в зависимости от объекта измерения вручную (см. табл. 6).

7. Для переключения единиц измерения нажмите кнопку «°C/°F».

8. Выключение произойдёт автоматически после 15 секунд бездействия.

С увеличением расстояния до цели D увеличивается размер области измерения S . Размер цели должен быть больше размера области S .

Таблица 6

Таблица средних значений коэффициента излучения

Материал	Коэффициент излучения	Материал	Коэффициент излучения
Алюминий	0,30	Железо	0,70
Асбест	0,95	Свинец	0,50
Асфальт	0,95	Известняк	0,98
Базальт	0,70	Масло	0,94
Латунь	0,50	Краска	0,93
Кирпич	0,90	Бумага	0,95
Уголь	0,85	Пластмасса	0,95
Керамика	0,95	Резина	0,95
Бетон	0,95	Песок	0,90
Медь	0,95	Кожа	0,98
Земля	0,94	Снег	0,90
Замороженная пицца	0,90	Сталь	0,80
Горячая пицца	0,93	Текстиль	0,94
Стекло плоское	0,85	Вода	0,93
Олово не окисленное	0,04	Лёд	0,98

Выполнение эксперимента

Задание 1. *Регистрация зависимости эдс термопары от времени, её калибровка и определение коэффициента излучения олова.*

Оборудование: дифференциальная термопара, тигель с оловом, источник питания, нуль-термостат, аналого-цифровой преобразователь, персональный компьютер, пирометр марки ARKOM PR480.

1. Определение эдс термопары, соответствующей температуре плавления/кристаллизации олова.

Схема установки для регистрации зависимости эдс термопары от времени при изменении температуры олова показана на рис. 8

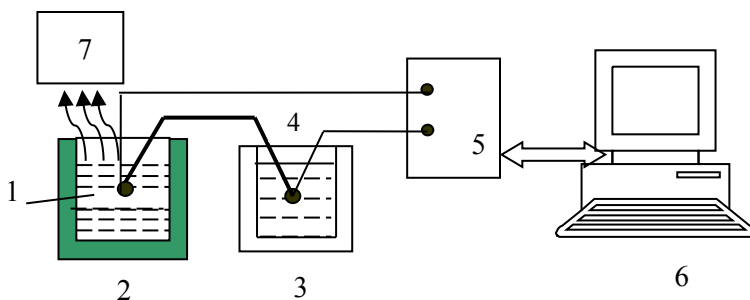
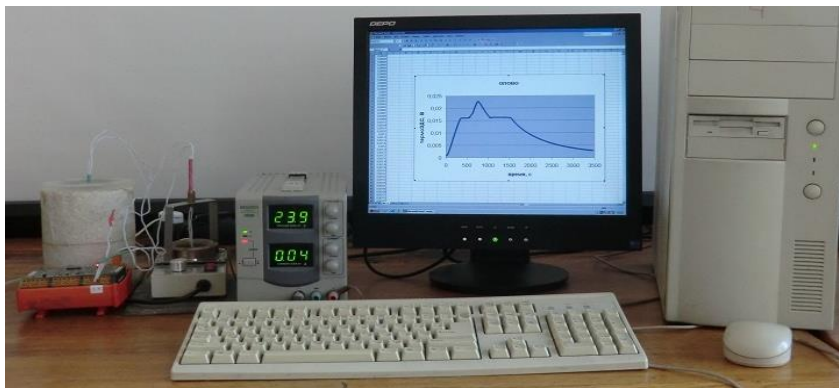


Рис. 8. Схема установки для изучения процесса плавления и кристаллизации олова: 1 – тигель с исследуемым веществом, 2 – нагреватель, 3 – нуль-термостат, 4 – дифференциальная термопара, 5 – регистратор, 6 – компьютер, 7 – пирометр

Измерительная термопара (4), один спай которой помещён в тигель с оловом (1), а другой – в нуль-термостат (сосуд с водно-ледяной смесью), подключена к аналого-цифровому преобразователю (АЦП) (5), при помощи которого осуществляется периодическое (с заданным периодом) измерение эдс термопары. Результаты измерений отображаются в графическом виде на экране монитора персонального компьютера (6) и запоминаются в файле экспериментальных данных.

Поскольку фазовые переходы первого рода протекают при постоянной температуре, то на зависимости эдс от времени будут наблюдаться характерные горизонтальные участки при температуре плавления и кристаллизации олова, равной 231,9 °С.

Проведение эксперимента

Соберите схему согласно рис. 8.

Работа с автоматизированной системой измерения эдс термопары.

- Включите регистратор и персональный компьютер.
- Найдите на рабочем столе иконку с подписью "tx_measure" и двойным нажатием левой клавиши мыши раскройте программу измерения зависимости температуры от времени.
- Выставьте "**Port com 1**".
- Установите периодичность отсчета, равной 1 сек: "**period 1 сек**".
- Кнопкой "**RUN**" проведите запуск программы.
- Введите имя для сохранения экспериментальных данных в файле.
- Включите нагреватель и запишите зависимость термоэдс от времени как при нагревании, так и при остывании олова.

Замечание. В зависимости от наполнения тигля исследуемым веществом рекомендуемая мощность нагрева различна. При наполнении ~ 0,5 объёма оптимальная мощность соответствует 3 делениям регулятора нагревателя.

Необходимо измерить температуру среды в нуль-термостате до и после эксперимента любым доступным способом.

2. При появлении на диаграмме «полочки» измерьте пирометром температуру поверхности олова. Предварительно установите коэффициент излучения «1» и определите расстояние от поверхности олова, на которое необходимо установить пирометр, если его разрешающая способность 12:1, а размер измеряемой поверхности равен 1 см. При наведении оптической системы на цель учтите, что расстояние между центрами лазерного указателя и оптической системы равно 2 см.

3. Нагревание олова после его плавления необходимо проводить до тех пор, пока эдс термопары не увеличится примерно на 10 %, затем отключите нагреватель, дождитесь появления полочки при кристаллизации и вновь измерьте пирометром температуру поверхности олова. Измерения можно провести при окисленной и условно чистой поверхности. Сравните полученные значения температур, объясните разницу и, зная температуру плавления олова (231,9 °C), рассчитайте коэффициент излучения и сравните с табличным значением.

4. Закончите процесс регистрации при достижении температуры, близкой к исходной, для этого нажмите кнопку "**STOP&Write**" и сохраните файл под своим именем с расширением **.dat**.

5. Используя полученную экспериментальную зависимость, определите значение термоэдс, соответствующее температуре **кристаллизации** олова. Оптимальным будет значение, определённое по начальному участку полочки. По формуле $\alpha = (\varepsilon / T_{кр})$ мВ/°C рассчитайте чувствительность термопары и погрешность её определения.

6. Воспользовавшись таблицами ПЗ, П4 для номинальных статических характеристик термопреобразователей, определите тип термопары.

Для обработки данных и построения графиков в Excel необходимо выполнить.

1. Перенос данных из файла в формате .dat в Excel.

Откройте **Блокнотом** файл с расширением **.dat**.

В открытом окне **Блокнота** необходимо выполнить команду **Выделить всё**, используя сочетание клавиш **Ctrl + A** (или меню

Правка => Выделить всё). Далее скопируйте данные клавишами **Ctrl + C** (или меню **Правка => Копировать**).

Откройте иконку *Excel* (находится на рабочем столе), создайте новый файл с расширением *.xls* и вставьте скопированные данные клавишами **Ctrl + V** (или меню **Правка => Вставить**).

2. Преобразование данных в Excel.

Разбивка по столбцам. Поскольку вставленные данные располагаются в одном столбце, то необходимо произвести их разделение по столбцам. Для этого на панели инструментов выберите: **Данные => Текст по столбцам с разделителем => Далее => Пробел => Готово**.

Замена точки на запятую. Ввиду того что в числовом формате *Excel* в качестве разделителя целых и дробных частей используется запятая, а программа, фиксирующая данные о температуре и ЭДС, записывает этот разряд в виде точки, то необходимо произвести соответствующую замену. Для этого необходимо: **Выделить столбцы (Shift + клик мышкой сверху) => Правка=> Заменить, точку на запятую => Заменить всё => ОК => Закрыть**.

Построение графика. Выберите в меню **Вставка => Диаграмма => Точечная => Далее => Готово**;

Файл => Сохранить.

Затем введите название диаграммы и осей *X* и *Y* => **Готово**.

На этом преобразование данных в файл *Excel* завершено.

Задание 2. Изучение процесса теплопередачи в аморфных телах

Распределение температуры по толщине цилиндрического слоя неограниченной длины описывается соотношением:

$$T_c = T_{c1} - \frac{T_{c1} - T_{c2}}{\ln(d_2/d_1)} \ln \frac{d}{d_1},$$

где T_{c1} и T_{c2} – температура обогреваемой и охлаждаемой поверхностей, °C; d_1 , d_2 – соответствующие диаметры цилиндрического слоя исследуемого материала, м; d – текущее значение диаметра, м. Это соотношение справедливо, если обогреваемая и охлаждаемая поверхности являются *изотермическими*, а тепловой поток – равномерный.

Экспериментальная установка

Оборудование: нагреватель SOLDERPOTST-31C, исследуемое вещество, четырехканальный измеритель температуры CENTER 309, персональный компьютер, пирометр ARKOM PR480

Экспериментальная установка (рис. 9) состоит из нагревателя с исследуемым веществом (воск/парафин).

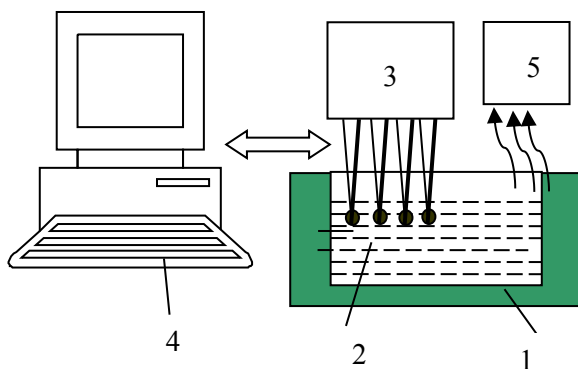
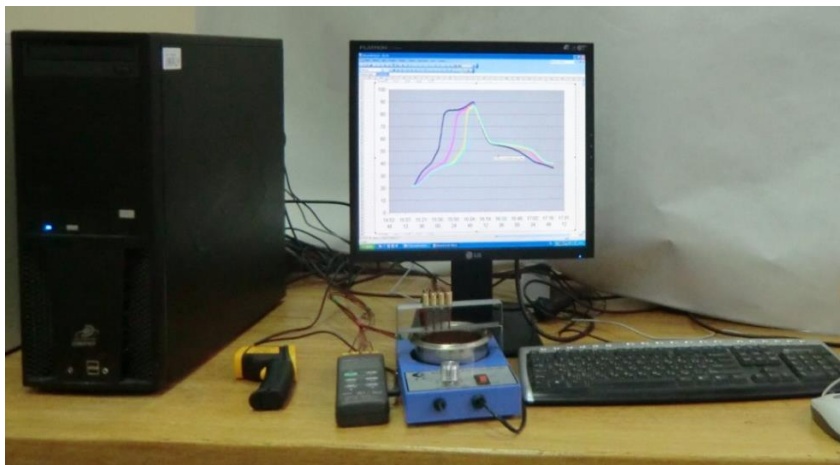


Рис. 9. Установка для измерения теплопередачи:

- 1 – нагреватель, 2 – исследуемый материал,
- 3 – четырехканальный измеритель температуры,
- 4 – персональный компьютер, 5 – пирометр

Четыре термопары измерителя температуры CENTER 309 помещены в исследуемое вещество с равными расстояниями (1 см) друг от друга и от внутренней стенки нагревателя до центра. Регистрация зависимости температуры от времени производится персональным компьютером.

Используемый в данной работе нагреватель SOLDERPOTST-31C позволяет выдавать температуру до 450 °С. Поскольку изучаемые в данной работе материалы (парафин/воск) имеют температуру плавления в пределах 50 ÷ 70 °С, то необходимо **до включения** нагревателя ручку регулировки выходного напряжения **установить в минимальное положение (повернуть против часовой стрелки до упора)**.

Измеритель температуры CENTER 309 многофункционален, имеет четыре входа с одновременной цифровой индикацией температуры, а также обеспечивает обмен информацией с компьютером по интерфейсу RS-232. Датчиками температуры являются хромель-алюмелевые термопары, градуировка которых проведена при температуре 23 °С ± 5 °С. Основная абсолютная погрешность прибора при измерении температуры в пределах от –200 до +200 °С равна ± (0,2 % + 1 °С). Скорость измерения температуры – одно измерение в 3 сек.

***Примечание.** Поскольку аморфные вещества имеют малый коэффициент теплопроводности, то время проведения эксперимента (до возвращения к исходной температуре) достаточно большое (приблизительно 2 ч 30 мин). Поэтому рекомендуется после **отключения нагревателя** приступить к выполнению задания 3.*



Проведение эксперимента

1. Регистрация диаграммы нагревания и охлаждения аморфного вещества.

Работа с автоматизированной системой измерения

- Включите персональный компьютер, введите имя пользователя **Student**, вход без пароля.
- Найдите на рабочем столе иконку с подписью "Тепло" и двойным нажатием левой клавиши мыши раскройте программу измерения зависимости температуры от времени. После раскрытия на экране монитора появится изображение лицевой панели измерителя температуры и окно "**Real – Time Graph**",

в котором будет отображаться зависимость температуры от времени для всех четырёх термопар.

- Установите периодичность отсчета равной **5 сек**: "**Real-Time Setup**".
- Включите нагреватель.
- Кнопкой  проведите запуск программы, после чего начнётся автоматическая регистрация зависимости температуры от времени.
- После установления одинаковых температур на всех термопарах (~30 мин) **выключите** нагреватель и продолжите регистрацию изменения температуры при естественном охлаждении вещества до комнатной температуры.
- По окончании эксперимента нажмите кнопку  и сохраните файл под своим именем с расширениями .GHF и .TXT.

2. В процессе регистрации зависимости температуры от времени измерьте температуру образца с использованием пирометра, сравните с показаниями измерителя температуры CENTER 309, объясните разницу (определите коэффициент излучения).

3. Используя полученные экспериментальные данные, постройте график зависимости температуры от времени для всех термопар в одних координатных осях.

Для обработки данных и построения графиков в Excel необходимо выполнить.

1. Перенос данных из файла в формате .TXT в Excel.

Откройте файл с расширением .TXT.

Правка => Выделить всё (или Ctrl +A).

Правка => Копировать (Ctrl + C).

Откройте *Excel* (находится на рабочем столе), создайте новый файл с расширением .xls и вставьте данные клавишами **Ctrl + V** (или меню **Правка => Вставить**).

2. Построение графиков в Excel.

Выделите последние пять столбцов (**Ctrl +A**).

Выберите в меню **Вставка => Диаграмма => Точечная => Далее**.

В окне мастера диаграмм активизируйте **Далее**.

Затем введите название диаграммы и осей X и $Y \Rightarrow$ **Готово**.

Файл \Rightarrow **Сохранить**.

На этом преобразование данных в файл *Excel* завершено.

4. Сравните диаграммы зависимостей температуры/термоэДС от времени для аморфных и кристаллических тел и объясните их разницу.

Задание 3. Изучение зависимости сопротивления резистора от температуры

Оборудование: резистор, измеритель сопротивления (мультиметр VC97), нагреватель, термопара, измеритель температуры (мультиметр VC97), пирометр ARKOM PR480.

Установка для измерения зависимости сопротивления резистора (катушки) от температуры (рис. 10) состоит из исследуемого терморезистора (2), измерителя сопротивления (1), нагревателя (3), термопары (4), измерителя температуры (5).

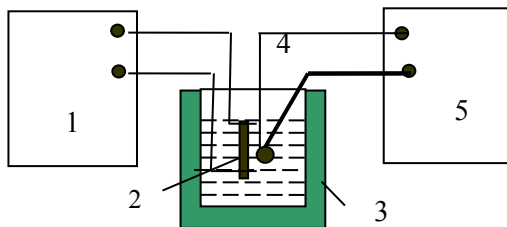


Рис. 10. Схема установки для измерения зависимости сопротивления катушки от температуры:

1 – мультиметр VC 97, 2 – терморезистор, 3 – нагреватель, 4 – термопара, 5 – мультиметр VC 97

1. Подключите терморезистор к мультиметру VC97, установите на нём режим измерения сопротивления; свободные концы термопары подсоедините к разъёмам **ТЕМП** мультиметра VC97, установите режим измерения температуры.

2. Поместите катушку и спай термопары в нагреватель, включите нагреватель и снимите зависимость сопротивления R от температуры T в интервале от 7 до 97 °С с шагом ~ 2 градуса.

3. Измерьте пирометром начальную и конечную температуру вещества в нагревателе. Зная коэффициент излучения льда и воды (см табл. 5), рассчитайте соответствующие температуры, сравните со значениями, полученными при измерении термопарой.

Исходные экспериментальные данные по всем измеряемым параметрам должны быть занесены в таблицу.

4. Постройте график зависимости сопротивления R от температуры T и методом наименьших квадратов проведите прямую.

5 Далее постройте график зависимости $(R/R_0 - 1)$ от $(T - T_0)$, из которого определите температурный коэффициент α металла и, используя данные таблицы П1, определите тип металла.

Анализ экспериментальных данных на примере задания 1. (Определение чувствительности термопары)

В небольшом диапазоне температуры зависимость ЭДС термопары от температуры можно считать линейной, поэтому чувствительность термопары рассчитываем по формуле $\alpha = \frac{\mathcal{E}}{T}$.

Из построенного графика зависимости эдс от времени, определим термоэдс, соответствующую кристаллизации вещества, которая, предположим, равна 0,01663 В (16,63 мВ). Температура кристаллизации олова задана (231,9 °С).

Соответственно, рассчитанная чувствительность термопары равна:

$$\alpha = \frac{\mathcal{E}}{T} = \frac{16,63}{231,9} \approx 0,072 \frac{\text{мВ}}{^\circ\text{C}}.$$

Из полученного значения чувствительности следует, что используемая нами термопара – хромель-копелевая (см. табл. П4).

Далее необходимо рассчитать погрешность полученного значения чувствительности.

Поскольку чувствительность термопары определена косвенным образом, то суммарная погрешность рассчитывается по формуле:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{\Delta\mathcal{E}}{\mathcal{E}} + \frac{\Delta T}{T}.$$

Отдельно определим относительную погрешность температуры по её заданному значению и погрешность измеренной термоэдс, соответствующей данной температуре.

Температура кристаллизации чистого олова равна $231,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, считаем, что значение температуры приведено с погрешностью $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. $T_{\text{кр}} = 231,9 \pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Тогда относительная погрешность приблизительно равна

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{0,1 \times 100}{231,9} = 0,043 \approx 0,04\text{ } \%$$

Абсолютную погрешность измерения термоэдс получаем из графика, в нашем случае она равна $\Delta \mathcal{E} = 0,01\text{ мВ}$. Оценка относительной погрешности дает величину:

$$\frac{\Delta \mathcal{E}}{\mathcal{E}} = \frac{0,01}{16,63} \times 100 \approx 0,06\text{ } \%$$

Следовательно, оценка относительной погрешности для чувствительности термопары будет $\frac{\Delta \alpha}{\alpha} \approx (0,04 + 0,06)\text{ } \% \approx 0,1\text{ } \%$.

Нужно учитывать, что в определённой нами величине не учтена погрешность, связанная с неполным анализом методики проведения эксперимента с целью выявления источников погрешностей. Кратко рассмотрим их происхождение. Погружая спай термопары в сосуд с тающим льдом, мы принимали эту температуру равной $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. В действительности, отклонение температуры от нулевого значения было возможным по нескольким причинам:

- спай термопары мог касаться кусочка льда, стенки сосуда или его дна. Во всех перечисленных вариантах отклонение от нуля может быть как в положительную, так и в отрицательную сторону;
- плотность воды максимальна при температуре $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (см. табл. П5), т. е. температура воды в придонном слое равна $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Соответственно, перепад температуры по высоте может составлять $4\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- вода из водопроводного крана имеет различные примеси и, следовательно, замерзает при более низкой температуре.

Кроме того, используемая нами температура плавления / кристаллизации приведена для химически чистого олова. Но, во-первых, мы не знаем этого, во-вторых, после многократных плавлений / кристаллизации чистота олова может значительно ухудшиться, соответственно, должна измениться и температура плавления.

Из сказанного выше следует, что для получения более правдоподобных результатов (*это не означает, что они будут более точными, чем описано выше!*) необходимо сделать предварительную проработку методики измерений ещё до проведения эксперимента и спланировать измерения с учётом выявленных источников погрешностей.

Контрольные вопросы

1. Что такое температура?
2. Какие методы измерения температуры используются?
3. Какие типы датчиков температуры используются в данной работе?
4. Что такое теплопередача?
5. Какие тела считаются твёрдыми?
6. В чём отличие кристаллических и аморфных тел?
7. Какой может быть ожидаемый вид зависимости температуры от времени: при нагревании, плавлении, последующего нагревания и охлаждения кристаллического и аморфного тела?
8. При каких условиях температуру можно считать постоянной во всех точках образца при его нагревании, плавлении, охлаждении и кристаллизации?
9. Что называют центром кристаллизации?
10. Назовите источники методических погрешностей.

Содержание отчёта

1. Название работы.
2. Цель работы.
3. Оборудование.
4. Результаты.
5. Выводы.

Отчёт должен включать:

- а) Список используемых приборов, с указанием класса точности (погрешности измерений).
- б) Схемы установок, используемых для проведения измерений.

в) Расчётные формулы всех определяемых величин и формулы их погрешностей.

Задание 1. а) График зависимости термоэДС от времени.

б) Оценка чувствительности термопары, с указанием погрешности.

в) Полученные коэффициенты излучения олова, льда, воды.

Задание 2. а) Исходные диаграммы нагревания и охлаждения аморфного тела, графики зависимости температуры от времени для всех термопар, построенные в одних координатных осях.

б) Определенный в измерениях коэффициент излучения аморфного тела.

Задание 3. Для терморезистора (катушки):

а) таблицу исходных данных;

б) график зависимости сопротивления R от температуры T ;

в) график зависимости $(R/R_0 - I)$ от $(T - T_0)$ и температурный коэффициент термометра сопротивления с указанием погрешности и тип металла;

г) начальную температуру нагревателя и температуру кипения воды.

Защита отчёта

При защите работы необходимо сформулировать и объяснить:

- Цель работы и её актуальность.
- Методы и схемы измерений.
- Достоинства и недостатки методов, возможности их улучшения.
- Соответствие полученных экспериментальных данных ожидаемым (табличным).
- Существующие погрешности и способы их уменьшения.

Приложение

Таблица III

Сравнительные значения трёх шкал температур в целых значениях

Шкала температур			
Фаренгейт	Цельсий	Кельвин	
212	100	373	Точка кипения воды над уровнем моря
194	90	363	
176	80	353	
158	70	343	
140	60	333	
122	50	323	
104	40	313	
86	30	303	
68	20	293	
50	10	283	Точка таяния (замерзания) льда (воды) над уровнем моря
32	0	273	
+14	–10	263	
–4	–20	253	
–22	–30	243	
–40	–40	233	
–58	–50	223	
–76	–60	213	
–94	–70	203	
–112	–80	193	Самая низкая зафиксированная температура – Восток, Антарктида, июль 1983 г.
–130	–90	183	
–140	–100	173	

Таблица П2

Температурный коэффициент сопротивления некоторых материалов

Проводник	$\alpha, 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
Алюминий	4,2
Вольфрам	5
Железо	6
Золото	4
Константан (сплав <i>Ni-Cu + Mn</i>)	0,05
Латунь	0,1 ÷ 0,4
Магний	3,9
Медь	4,3
Никель	5,8
Нихром (сплав никеля хрома железа и марганца)	0,17
Олово	4,4
Платина	3,9
Ртуть	1,0
Свинец	3,7
Серебро	4,1
Сталь	1 ÷ 4
Цинк	3,7

Таблица ПЗ

Номинальная статическая характеристика термоэлектрического преобразователя хромель – алюмель (ХА)

$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \text{мВ}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \text{мВ}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \text{мВ}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \text{мВ}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \text{мВ}$
0	0,000	50	2,022	100	4,095	150	6,137	200	8,137
10	0,397	60	2,436	110	4,508	160	6,539	210	8,537
20	0,798	70	2,850	120	4,919	170	6,939	220	8,938
30	1,203	80	3,266	130	5,327	180	7,338	230	9,341
40	1,611	90	3,681	140	5,733	190	7,737	240	9,745

Таблица П4

Номинальная статическая характеристика термоэлектрического преобразователя хромель – копель (ХК)

$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \text{мВ}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \text{мВ}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \text{мВ}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \text{мВ}$	$T, ^\circ\text{C}$	$\varepsilon, \text{мВ}$
0	0,000	50	3,306	100	6,860	150	10,621	200	15,363
10	0,639	60	3,998	110	7,597	160	11,396	210	16,174
20	1,289	70	4,700	120	8,342	170	12,176	220	16,990
30	1,951	80	5,411	130	9,094	180	12,964	230	17,812
40	2,623	90	6,131	140	9,854	190	13,758	240	18,639

Таблица П5

Температура кипения воды при различных давлениях

<i>P</i> , Торр	<i>T</i> , °C	<i>P</i> , Торр	<i>T</i> , °C	<i>P</i> , Торр	<i>T</i> , °C
680	96,9138	725	96,6846	770	100,3666
685	96,1153	730	98,8757	775	100,5484
690	97,3156	735	99,0657	780	100,7293
695	97,5146	740	99,2547	785	100,9092
700	97,7125	745	99,4426	790	101,0881
705	97,9092	750	99,6294	795	101,2661
710	98,1048	755	99,8152	799	101,4079
715	98,2992	760	100,000		
720	98,4925	765	100,1838		

Таблица П6

Плотность воды при различных температурах

<i>T</i> , °C	ρ , г/см ³	<i>T</i> , °C	ρ , г/см ³	<i>T</i> , °C	ρ , г/см ³
0	0,99987	12	0,99952	24	0,99732
1	99993	13	99940	25	99707
2	99997	14	99927	26	99681
3	99999	15	99913	27	99654
4	1,00000	16	99897	28	99626
5	0,99999	17	99880	29	99597
6	99997	18	99862	30	99567
7	99993	19	99843	31	99537
8	99988	20	99823	32	99505
9	99981	21	99802	33	99472
10	99973	22	99780	34	99440
11	99963	23	99757	35	99406

Список литературы

1. *Клаассен К. Б.* Основы измерений (датчики и электронные приборы). Долгопрудный: Интеллект, 2008.
2. *Мейзда Ф.* Электронные измерительные приборы и методы измерений. М.: Мир, 1990.
3. *Фрайден Дж.* Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2005.
4. *Кикоин И. К., Кикоин А. К.* Молекулярная физика. СПб.: Лань, 2007.
5. *Физические величины:* Справочник, М.: Энергоатомиздат, 1991.
6. Информационный портал temperatures.ru. Режим доступа: <http://temperatures.ru/pages/spravochnik>.

Учебное издание

Косинов Александр Дмитриевич
Костюрина Александра Георгиевна

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ

Работа 9

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Учебно-методическое пособие

Редактор *Н. А. Борзенкова*

Подписано в печать 2013

Формат 60×84 /16. Уч.-изд. л. 3,2. Усл. печ. л. 3.

ТИРАЖ ЭКЗ. Заказ

Редакционно-издательский центр НГУ
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2