

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Физический факультет  
Кафедра общей физики

## **ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРАКТИКУМ**

А. Г. Костюрина

### **МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ**

Методическое пособие

Методическое пособие состоит из теоретического введения и трех лабораторных работ. Во введении кратко описывается понятие о температуре и приведена сравнительная диаграмма трёх шкал температур: Цельсия, Фаренгейта и Кельвина. В первой лабораторной работе рассматриваются контактные методы измерения температуры, проводится калибровка термоэлектрических датчиков, а затем измерение температуры различных объектов с использованием откалиброванных датчиков. Во второй работе изучаются бесконтактные методы измерения температуры, проводится измерение температуры различных объектов с использованием современного ИК пирометра, а так же определяются коэффициенты излучения объектов с различной степенью черноты. В третьей лабораторной работе изучаются процессы теплопередачи в кристаллических и аморфных телах с использованием контактных и бесконтактных методов измерения температуры. В приложении изложены правила оформления отчёта о лабораторной работе, в котором особое внимание уделено анализу полученных экспериментальных данных, выяснению наличия различного вида погрешностей и способов их уменьшения.

Методическое пособие предназначено для измерительного практикума кафедры общей физики физического факультета НГУ, в котором обучаются студенты 1 курса физического, геолого-геофизического факультетов, 2 курса факультета естественных наук и медицинского факультета, а также может быть использовано при обучении студентов других естественнонаучных и технических факультетов

Методическое пособие подготовлено в рамках реализации программы развития НИУ-НГУ на 2009 –2018 г.

## Оглавление

<b>Методы измерения температуры.....</b>	<b>5</b>
Понятие о температуре.....	5
Типы термометров.....	7
<b>Работа 1. Контактные методы измерения температуры.....</b>	<b>9</b>
Жидкостно-стеклянные термометры .....	9
Электрические контактные термометры.....	9
Термометры сопротивления (терморезисторы).....	10
Термоэлектрический термометр.....	14
Эксперимент.....	22
<i>Задание 1.</i> Калибровка термопары.....	22
<i>Задание 2.</i> Определение температуры различных объектов.....	24
<i>Задание 3.</i> Получение зависимости сопротивления катушки от температуры.....	24
Содержание отчёта.....	25
Библиографический список.....	26
<b>Работа 2. Бесконтактные методы измерения температуры.....</b>	<b>27</b>
Общие сведения о пирометрии.....	27
Классификация пирометров.....	28
Оптические пирометры.....	29
Радиационные пирометры.....	32
ИК пирометры.....	34
Эксперимент.....	39
Характеристики ARKOM PR480 пирометра.....	39
<i>Задание 1.</i> Определение коэффициента излучения исследуемого вещества.....	43
<i>Задание 2.</i> Измерение температуры других материалов.....	44
Содержание отчёта.....	44
Библиографический список.....	45

<b>Работа 3. Изучение процесса теплопередачи.....</b>	<b>46</b>
Теплопередача.....	46
Твёрдые тела.....	49
Фазовые переходы.....	50
Плавление и кристаллизация.....	51
Аморфные тела.....	53
Эксперимент.....	54
<i>Задание 1.</i> Изучение процесса теплопередачи в аморфных телах...55	
<i>Задание 2.</i> Изучение процесса перехода из жидкого состояния – в твёрдое для кристаллического тела.....	56
Контрольные вопросы.....	58
Содержание отчёта.....	58
Библиографический список.....	59
<b>Приложение</b>	<b>60</b>
Правила оформления отчёта.....	60
Анализ экспериментальных данных.....	66

## Методы измерения температуры

### Понятие о температуре

Температурой называют величину, характеризующую тепловое состояние объекта. Согласно кинетической теории температуру определяют как меру кинетической энергии поступательного движения молекул. Поэтому температурой называют условную статистическую величину, прямо пропорциональную средней кинетической энергии молекул тела.

**Единицы измерения температуры.** Измерение температуры можно проводить только косвенным путём, основываясь на зависимости от температуры таких физических свойств тел, которые поддаются непосредственному измерению. Применяемые для этого тела/вещества, называются *термометрическими*, а устанавливаемая с их помощью шкала температуры – *эмпирической*. При построении шкалы температуры качестве исходных значений, служащих для установления начала отсчёта температуры и единицы измерения – *градуса*, применяются температуры перехода химически чистых веществ из одного агрегатного состояния в другое, например температура плавления льда ( $T_0$ ) и кипения воды ( $T_k$ ) при нормальном атмосферном давлении, равном 760 мм рт. ст. Величины  $T_0$  и  $T_k$  в зависимости от типа шкалы имеют следующие значения:

- *Шкала Цельсия* (стоградусная шкала):  $T_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_k = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- *Шкала Фаренгейта*:  $T_0 = 32\text{ }^{\circ}\text{F}$ ,  $T_k = 212\text{ }^{\circ}\text{F}$ .

Связь между температурами, выраженными в градусах Цельсия и Фаренгейта, имеет вид:

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

- *Шкала Кельвина*: температура  $T$  отсчитывается от *абсолютно-го нуля* ( $T = -273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и называется абсолютной температурой. Связь между значениями температуры по шкале Кельвина ( $T\text{ K}$ ) и шкале Цельсия ( $T^{\circ}\text{C}$ ) имеет вид

$$T\text{ K} = T^{\circ}\text{C} + 273,15\text{ }^{\circ}\text{C} \quad \text{или} \quad \text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273,15.$$

Ниже в таблице 1 приведена сравнительная диаграмма трёх шкал температур.

**Примечание.** Слово «градус» не используется со словом Кельвин. Шкала Кельвина удобна для многих научных вычислений, поскольку она начинается с абсолютного нуля, что означает отсутствие отрицательных значений.

Таблица 1

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	
32	0	273	Точка таяния (замерзания) льда (воды) над уровнем моря
-14	-10	263	
-4	-20	253	
-22	-30	243	
-40	-40	233	
-58	-50	223	
-76	-60	213	
-94	-70	203	
-112	-80	193	
-130	-90	183	
-140	-100	173	Самая низкая зафиксированная температура – Восток, Антарктида, июль 1983 г.

При измерении температуры происходит перенос энергии: она либо отнимается от измеряемого объекта, либо добавляется ему. Последнее происходит в том случае, когда измеряемая температура ниже температуры измерителя (этот теплообмен приводит к погрешностям при измерении). Передача энергии от измеряемого объекта к датчику температуры, или наоборот, осуществляется посредством *теплопроводности, конвекции или излучения*. Перенос тепла

в веществе при отсутствии макродвижения среды называется *теплопроводностью*. В контактных датчиках температуры теплопроводность является основным способом передачи энергии. Передача тепловой энергии движущейся массой (газовый, жидкий поток) называется *тепловой конвекцией*. Передача тепла инфракрасным электромагнитным излучением называется *тепловым излучением*.

## Типы термометров

Измерение температуры производят с помощью устройств, использующих различные термометрические свойства жидкостей, газов и твердых тел.

В таблице 2 приведены наиболее распространенные устройства для измерения температуры и практические пределы их применения.

Таблица 2

Термометрическое свойство	Наименование устройства	Пределы длительного применения, °С	
		Нижний	Верхний
Тепловое расширение	Жидкостные стеклянные термометры	-190	600
Изменение давления	Манометрические термометры	-160	60
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.	20	3000
	Фотоэлектрические пирометры.	600	4000
	Цветовые пирометры	1400	2800

## Работа 1

**Контактные методы измерения температуры**

**Цель работы:** изучение контактных методов измерения температуры, проведение калибровки термопары и терморезистора, измерение температуры различных объектов контактными датчиками.

**Жидкостно-стеклянные термометры**

Действие жидкостно-стеклянных термометров основано на явлении теплового расширения тел. Эти тела могут быть твердыми, жидкими или газообразными. Вследствие различия теплового расширения жидкости и стеклянного (кварцевого) резервуара, в которой 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 от  $-200$  до  $1200$  °С. Для измерения температур от  $-39$  до  $550$  °С применяются термометры из стекла, в которых термометрическим телом является ртуть, а температурным параметром – её объём. Температура кипения ртути под атмосферным давлением равна  $+356,58$  °С, поэтому для измерения более высоких температур (до  $+750$  °) над уровнем ртути должен находиться инертный газ под давлением до  $70$  атм.

Для измерения низких температур до  $-80$  °С, применяются спиртовые термометры, а для температур до  $-200$  °С заполненные пентаном.

Жидкостно-стеклянные термометры отличаются надежностью, точностью, низкой стоимостью и простотой обслуживания.

Недостатками рассмотренных термометров являются: инерционность и невозможность передачи информации для дальнейшей обработки.

**Электрические контактные термометры**

Принцип действия электрических контактных термометров основан на изменении электрических свойств вещества при изменении

температуры. Электрические контактные термометры разделяются на две группы: термометры сопротивления, в которых с изменением температуры изменяется активное сопротивление чувствительного элемента, и термоэлектрические термометры (термопары), в которых при изменении температуры изменяется термоЭДС.

**Термометры сопротивления**

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

Сопротивление чистого металла обусловлено взаимодействием свободных электронов проводимости с колеблющимися атомами кристаллической решетки. С повышением температуры амплитуда колебаний кристаллической решетки увеличивается, что приводит к уменьшению средней длины свободного пробега и сокращению времени между столкновениями. Поскольку время между столкновениями обратно пропорционально температуре, то сопротивление пропорционально абсолютной температуре, следовательно, *температурный коэффициент сопротивления для металлов положительный*.

Таблица 3

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 Ni-Cu + Mn)	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

**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:

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

где  $R(T)$  – сопротивление резистора при температуре  $T$ ,  $R(T_0)$  – его сопротивление при эталонной температуре  $T_0 = 0^\circ\text{C}$ . Коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  определяются при измерении сопротивлений при температурах, соответствующих точкам кипения воды ( $100^\circ\text{C}$ ), затвердевания цинка ( $419,58^\circ\text{C}$ ) и кипения жидкого кислорода ( $-182,96^\circ\text{C}$ ).

Если температурный диапазон измерения не слишком велик, то в формуле (1) достаточно оставить первые два слагаемых. Тогда это уравнение примет вид:

$$R(T) = R(T_0) [1 + \alpha(T - T_0)], \quad \text{при } T_0 = 0^\circ\text{C}, \quad R_T = R_0(1 + \alpha T), \quad (2)$$

из которого следует, что в малом диапазоне температур ( $0$ – $100^\circ\text{C}$ ) датчик можно считать линейным.

Наиболее распространенный тип металлических термометров – платиновый. Это объясняется тем, что платина имеет высокий температурный коэффициент сопротивления, при  $T = 273\text{ K}$ ,  $\alpha = 3,85 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$ . Коэффициенты  $\beta$  и  $\gamma$  малы: при температуре  $273\text{ K}$  они

равны  $\beta = -5,83 \cdot 10^{-7}\text{ K}^{-2}$ ,  $\gamma = -3,14 \cdot 10^{-12}\text{ K}^{-3}$ , т. е. платиновый термометр имеет линейную зависимость сопротивления в широком диапазоне температур. Диапазон измерения температуры платиновым термометром сопротивления от  $-200$  до  $+650^\circ\text{C}$  (для измерения температур выше  $600^\circ\text{C}$  применяются вольфрамовые термометры).

Достаточно широко используются термометры, выполненные из никеля и меди. Никелевый термометр имеет более высокий температурный коэффициент: в диапазоне температур  $0$  –  $100^\circ\text{C}$ ,  $\alpha = 5,8 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$ . Диапазон измеряемых температур никелевыми термометрами от  $0$  до  $300^\circ\text{C}$ . Медь имеет температурный коэффициент  $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3}\text{ K}^{-1}$ , достаточно хорошую линейность, но удельное сопротивление и температурный коэффициент зависят от примесей. При высоких температурах медные термометры легко окисляются, поэтому они используются в малом температурном диапазоне от  $-150$  до  $+150^\circ\text{C}$ .

Для измерения низких температур используются сопротивления из некоторых сплавов, например бронзы.

Достоинства металлических термометров: хорошая воспроизводимость, стабильность, точность, линейность.

Все термометры сопротивления должны иметь влагозащиту. В чувствительных элементах платиновых и медных термометров сопротивления тонкая проволока ( $0,05$ – $0,10\text{ мм}$ ) наматывается на каркас изоляционного материала, например кварца, либо проволочная спираль помещается в керамический каркас, а спираль заполняется изолирующим порошком этим и обеспечивается герметизация чувствительного элемента. Форма термометров сопротивления бывает различной, она определяется конструкцией установки.

В заключение отметим, что терморезисторы относятся к классу датчиков *абсолютной* температуры, т. е. их показания соответствуют абсолютной температурной шкале.

**В полупроводниках изменение сопротивления** связано с изменением числа свободных зарядов. Чем выше температура, тем большее число электронов из валентной зоны преодолевают запрещенную зону и попадают в зону проводимости. 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 ( $T$  °К) имеет вид:

$$R(T) = A \exp(b/T), \text{ или } R = R_0 e^{b(1/T - 1/T_0)} \quad (3)$$

коэффициенты  $A$  и  $b$  зависят от свойств материала и геометрических размеров. Из уравнения (3) следует, что при повышении температуры сопротивление полупроводника очень быстро уменьшается. Чувствительность полупроводникового датчика на один – два порядка больше, чем металлического (см. Табл. 4). Такой чувствительный к температуре полупроводниковый резистор, называют **термистором**.

**Примечание.** Из соотношения (3) следует, что при температуре абсолютного нуля полупроводник становится изолятором, так как нет электронов, обладающих достаточной энергией, для преодоления запрещенной зоны.

Таблица 4

Характеристики некоторых термопреобразователей

Параметр	Термометр сопротивления	Термопара	Термистор
Чувствительность	0,1 – 10 Ом/°С	10–50 мкВ/°С	0,1–1,0 кОм/°С
Стабильность	0,01%	0,5%	1%
Воспроизводимость	0,05 °С	0,1 °С	0,5 °С
Диапазон температур	–183 до +630 °С	от –200 до +1600 °С	от –100 до +350 °С

Термисторы изготавливаются из керамических полупроводников, состоящих, как правило, из оксидов переходных металлов. Сопротивления термисторов зависят от химического состава и степени окисления и находятся в пределах от долей Ом до многих мегаОм.

Термисторы также относятся к классу датчиков абсолютной температуры, т. е. их показания соответствуют абсолютной температурной шкале. Имеется два типа термисторов: NTC – с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления и PTC – с положительным коэффициентом.

Полупроводниковые термометры сопротивления выпускаются для измерения температуры в диапазоне от –200 до +300 °С. Обычно каждый такой термометр требует индивидуальной градуировки. Зависимость сопротивления полупроводниковых термометров от температуры приближенно описывается выражением

$$R_T = R_0 \exp b(1/T - 1/T_0),$$

где  $R_0$  – сопротивление при эталонной температуре;  $R_T$  – сопротивление при измеряемой температуре  $T$ ;  $b$  – параметр, зависящий от материала преобразователя ( $b = 3\,000 - 4\,000$  К);  $T$  – абсолютная температура объекта (К).

### Термоэлектрический термометр

Термоэлектрический термометр (термопара) – активный термоэлектрический преобразователь температуры, применяемый в измерительных и преобразовательных устройствах, а также в автоматизированных системах управления и контроля. Термопары относятся к классу *относительных* датчиков, поскольку их выходное напряжение определяется разностью температур между двумя спаями и практически не зависит от абсолютной температуры каждого соединения.

Принцип действия термопары можно пояснить, воспользовавшись моделью свободных электронов. Согласно этой модели, электроны проводимости рассматриваются как электронный газ, заполняющий кристаллическую решетку металла. Работа выхода и концентрация свободных электронов являются индивидуальными характеристиками вещества и у разных металлов различны. В результате, если два разнородных проводника привести в соприкосновение в одной точке на атомарном уровне, то свободные электроны за счёт диффузии будут перемещаться через место соединения. При этом исходно электронейтральные проводники зарядятся, и на их свободных концах появится разность потенциалов (контактная ЭДС).

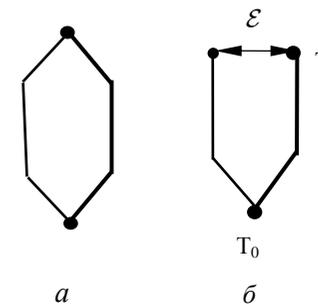


Рис. 1. Термопара

Созданное таким образом элек-

трическое поле уравнивает процесс диффузии и в результате установится некоторое равновесие. Если контур замкнут (рис. 1, а) и оба соединения находятся при одинаковой температуре, то электрические поля взаимно уничтожаются. Если контур разомкнут (рис. 1, б) и соединения находятся при разных температурах  $T_0 \neq T$ , то между ними возникнет разность потенциалов  $\mathcal{E}$  (термоЭДС), аналитическое выражение для которой можно записать в виде степенного ряда от разности температур  $(T - T_0)$ :

$$\xi = \alpha_1(T - T_0) + \alpha_2(T - T_0)^2 + \dots + \alpha_n(T - T_0)^n, \quad (4)$$

где  $T_0$  – заданная температура калибровки,  $\alpha_i$  – температурный коэффициент (коэффициент Зеебека). При увеличении  $n$  это выражение будет более точно описывать поведение термопары.

Поэтому простейшая конструкция, состоящая из двух соединений в одной точке проводников, может служить термометром, если для этой пары металлов зависимость  $\mathcal{E}(T)$  известна. Таким образом, чтобы измерить температуру какого-либо объекта достаточно измерить термоЭДС термопары, спай которой находится в тепловом контакте с этим объектом, а затем рассчитать температуру, используя либо табличные данные, либо аналитическую зависимость  $\mathcal{E}(T)$ . Но для измерения ЭДС термопары необходимо подключить термоэлектроды (рис. 2) непосредственно к регистрирующему прибору (потенциометру или микровольтметру с большим входным сопротивлением). В результате в точках контактов термоэлектродов с клеммами прибора получим ещё два «термопарных спаев», поэтому регистрирующий прибор покажет суммарную ЭДС, равную

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{AB}(T_x) + \mathcal{E}_{AKл}(T_0) + \mathcal{E}_{BKл}(T_0),$$

где  $\mathcal{E}_{AB}$  – термоЭДС рабочего спая;  $\mathcal{E}_{AKл}$ ,  $\mathcal{E}_{BKл}$  – термоЭДС возникающие в местах контактов термоэлектродов с клеммами прибора;  $T_x$  – температура рабочего спая термопары;  $T_0$  – температура клемм прибора.

Так как при равенстве температур всех спаев суммарная ЭДС термопары должна равняться нулю, то это выражение можно преобразовать к виду:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{AB}(T_x) - \mathcal{E}_{AB}(T_0).$$

Отсюда видно, что термопарой измеряется разность  $T_x - T_0$ . Поэтому

значение  $T_0$  нужно знать и при проведении измерений поддерживать постоянным, причем тем же самым, что и при градуировке термопары, когда определялась зависимость  $\mathcal{E}(T)$ . Каких-либо физических ограничений на выбор величины  $T_0$  не существует, но общепринято термостатировать свободные концы термоэлектродов при  $T_0 = 0^\circ\text{C}$ . В таблицах номинальных статических характеристик термопар всегда приводят значения  $\mathcal{E}(T)$  соответствующее температуре  $T_0 = 0^\circ\text{C}$ .

Таким образом, если термоэлектроды подключить непосредственно к клеммам прибора, температуру клемм придется поддерживать равной  $0^\circ\text{C}$ , что технически сложно. Поэтому применяют специальные способы подключения термопар.

Основной способ подключения термопары показан на рис. 2.

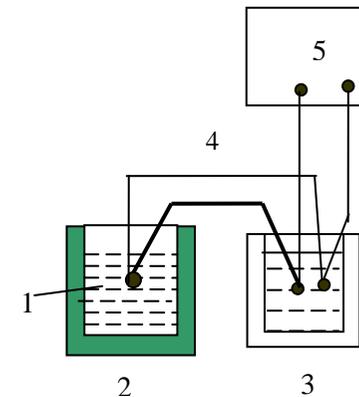


Рис. 3. Способ подключения термопары к регистратору:

- 1 – тигель с исследуемым веществом, 2 – нагреватель,
- 3 – нуль термостата, 4 – дифференциальная термопара,
- 5 – регистратор,

Здесь термоэлектроды надставлены медными проводами, которые и присоединены к клеммам прибора. Так как клеммы потенциометра и чувствительных вольтметров изготавливают из меди или из сплавов, имеющих близкую к нулю контактную ЭДС, то паразитные ЭДС не возникают. Соединения медных проводов с термоэлектродными (холодные спаи) помещают в сосуд с плавящимся льдом – термостатируют при температуре  $0^\circ\text{C}$ .

Другой способ подключения термопары показан на рис. 3.

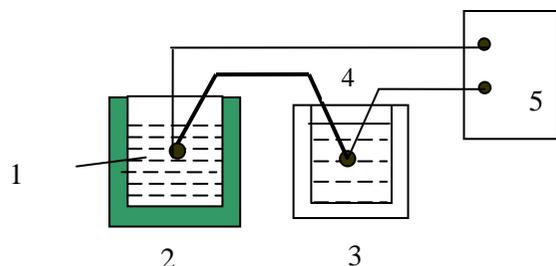


Рис. 3. Схема дифференциальной термопары

Здесь изображена так называемая дифференциальная термопара, представляющая собой, две «обычные» термопары, включенные встречно. При таком соединении контактные ЭДС на клеммах прибора взаимно компенсируются, так как они одинаковы по величине и противоположны по знаку. ЭДС дифференциальной термопары пропорциональна разности температур её спаев. Поэтому дифференциальную термопару используют обычно не для абсолютного измерения температуры, а для измерения разности температур (различных объектов или в разных точках одного объекта). Однако её можно использовать и для абсолютных измерений. В этом случае один из спаев (все равно какой) дифференциальной термопары используется как рабочий, второй («холодный спай») – термостатируется при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  также, как и у «обычной» термопары.

Коэффициент пропорциональности  $\alpha$ , называемый *чувствительностью*, зависит от температуры, определяется соотношением  $\alpha = d\mathcal{E}/dT$  и у разных металлов разный (см. Табл. 5). Соответственно, разность потенциалов, возникающая между концами разных проводников, так же будет различной.

Таблица 5

Характеристики некоторых термопар

Термопара	Обозначение	Коэффициент термоЭДС мкВ/ $^{\circ}\text{C}$ (при $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )	Диапазон рабочих температур, $^{\circ}\text{C}$
Платинородий/платина	R	6,0	0 до + 1550
Железо/константан	J	51,7	-270 до + 1000
Медь/константан	T	40,9	-270 + 600
Хромель/алюмель	K	40,6	-270 до +1300
Хромель/константан	E	60,9	-200 до + 1000
Хромель/копель	L	64	-200 до + 600

Платинородий/платина	R	6,0	0 до + 1550
Железо/константан	J	51,7	-270 до + 1000
Медь/константан	T	40,9	-270 + 600
Хромель/алюмель	K	40,6	-270 до +1300
Хромель/константан	E	60,9	-200 до + 1000
Хромель/копель	L	64	-200 до + 600

При подборе материалов термоэлектродов стремятся к тому, чтобы чувствительность была максимальной и не зависела от температуры. Наилучшей линейностью характеристики среди термопар с термоэлектродами из неблагородных металлов обладает хромель-алюмелевая (ХА) термопара ( $\alpha = 40\text{ мкВ/К}$  при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha = 43\text{ мкВ/К}$  при  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), наивысшей чувствительностью – хромель-копелевая (ХК) термопара ( $\alpha = 63\text{ мкВ/К}$  при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\alpha = 88\text{ мкВ/К}$  при  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Как видно из приведенных численных значений, чувствительность термопары зависит от температуры. Однако если измерения производятся в сравнительно небольшом интервале температур, то уравнение (4) примет следующий вид  $\xi = \alpha_1(T - T_0)$ , и в первом приближении можно считать  $\alpha = const$ . В этом случае (при термостатировании «холодных» спаев при  $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$ ) температура может быть рассчитана по формуле:

$$T_x = (\mathcal{E} / \alpha) ^{\circ}\text{C}.$$

Значение  $\alpha$  можно рассчитать по экспериментально измеренной ЭДС термопары  $\mathcal{E}$  при какой-либо известной температуре  $T$ .

Таблица 6

## Номинальная статическая характеристика термоэлектрического преобразователя хромель – алюминель (ХА)

$t, C$	$\mathcal{E}, мВ$	$t, C$	$\mathcal{E}, мВ$	$t, ^\circ C$	$\mathcal{E}, мВ$	$t, ^\circ C$	$\mathcal{E}, мВ$	$t, ^\circ C$	$\mathcal{E}, мВ$
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 7

## Номинальная статическая характеристика термоэлектрического преобразователя хромель – копель (ХК)

$t, C$	$\mathcal{E}, мВ$	$t, C$	$\mathcal{E}, мВ$	$t, ^\circ C$	$\mathcal{E}, мВ$	$t, ^\circ C$	$\mathcal{E}, мВ$	$t, ^\circ C$	$\mathcal{E}, мВ$
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

**Примечание**

При использовании терморезисторов/термопар, как и любых других контактных преобразователей, надо иметь в виду, что они измеряют не температуру тела/объекта, с которым он приведен в тепловой контакт, а температуру своего чувствительного элемента. Эти температуры могут отличаться. Так же необходимо учитывать инерционность термодатчика. Например, при внесении терморезистора в среду с температурой  $T_{cp}$  его температура будет изменяться во времени  $t$  по закону:

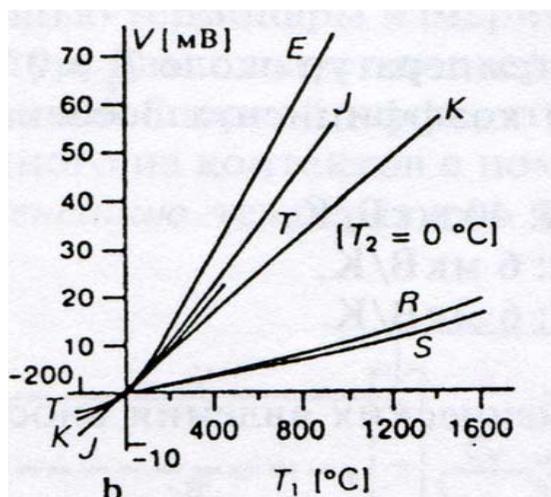


Рис. 4. Характеристики некоторых термопар

Достоинствами термопар являются малая инерционность, возможность измерения небольшой разности температур. Термопары незаменимы при измерении высоких температур (вплоть до  $2200^\circ C$ ) в агрессивных средах. Термопары могут обеспечивать высокую точность измерения температуры (на уровне  $\pm 0,01^\circ C$ ), вырабатывают на выходе термоЭДС в диапазоне от микровольт до милливольт, однако требуют стабильного усиления для последующей обработки.

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 тонкопленочная технология позволяет получать дешевые и удобные в употреблении термоэлектрические батареи с большим числом термопар, сосредоточенных на малой площади.

Измерение температур с помощью термопар получило широкое распространение из-за надежной конструкции датчика, простоте, удобству монтажа, возможности измерения локальной температуры.

Следует отметить, что поскольку термоЭДС очень малы, то при использовании длинных соединительных проводов возможно влияние различных помех.

$$T = T_0 + (T_{cp} - T_0) \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (5)$$

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

Контактные методы измерения высоких температур основаны на использовании переходного процесса нагрева термодатчика. Используя соотношение (5), достаточно точное для регулярного теплового режима, можно определить температуру объекта, не ожидая пока термодатчик нагреется до температуры объекта. Ограничив время погружения его в высокотемпературную среду  $\sim 0,5$  с, получим начальный участок переходного процесса, по которому можно вычислить температуру среды.

## Эксперимент

### Задание 1. Калибровка термопары и определение типа термопары

**Оборудование:**– дифференциальная термопара, тигель с оловом, источник питания, нуль термостат, регистратор (АЦП), персональный компьютер.

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. 5. Измерительная термопара (3), один спай которой помещен в тигель с оловом (1), а другой – в нуль-термостат (сосуд с водно-ледяной смесью), подключена к аналого-цифровому преобразователю (АЦП) (4), при помощи которого осуществляется периодическое (с заданным периодом) измерение ЭДС термопары. Результаты измерений отображаются в графическом виде на экране монитора персонального компьютера (5) и запоминаются в файле экспериментальных данных.

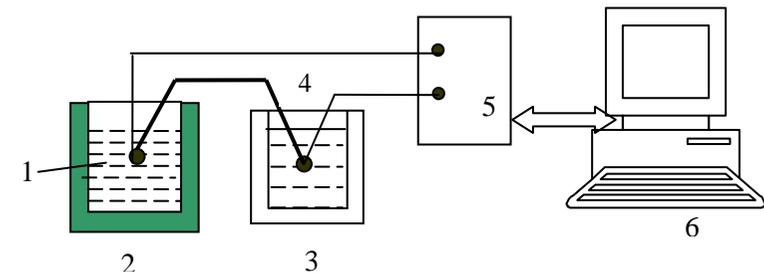


Рис. 3. Схема установки для изучения процесса плавления и кристаллизации олова: 1 – тигель с исследуемым веществом, 2 – нагреватель, 3 – нуль термостат, 4 – дифференциальная термопара, 5 – регистратор, 6 – компьютер

Так как фазовые переходы первого рода протекают при постоянной температуре, то на зависимости ЭДС от времени будут наблюдаться характерные «полки» при температуре плавления и кристаллизации олова равной 231,9 °С.

### Проведение эксперимента

Соберите схему согласно рис.5.

#### 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 нагревателя исследуемым веществом, рекомендуемая мощность нагрева различна. При наполнении ~0,5 объема оптимальная мощность соответствует 3 делениям регулятора нагревателя.

- По окончании эксперимента нажмите кнопку "STOP&Write" и сохраните файл под своим именем с расширением .dat.

2. Используя полученную экспериментальную зависимость, определите значение термоЭДС, соответствующее температуре кристаллизации олова. (Оптимальным будет значение термо ЭДС, определенное по начальному участку полочки). По формуле  $\alpha = (\mathcal{E} / T_{кр})^{\circ} m B / ^{\circ} C$  рассчитайте чувствительность термопары и погрешность её определения.

3. Воспользовавшись таблицей 6 для номинальных статических характеристик термопреобразователей, определите тип термопары.

### Задание 2. Определение температуры различных объектов

**Оборудование:** термопара, мультиметр GDM8145, нуль термостат, исследуемый объект.

Данная лабораторная работа комплектуется двумя совершенно одинаковыми термопарами, одна из которых используется в эксперименте с оловом, а вторая – для измерения температуры других объектов.

1. Установите на мультиметре режим измерения постоянного напряжения – кнопки **V, DC**. Подключите термопару к мультиметру, один спай поместите в нуль термостат, другой – к измеряемому объекту: Измерьте термоЭДС, соответствующие:

- комнатной температуре;
- температуре кипения воды;
- температуре тела.

2. Зная чувствительность термопары, рассчитайте соответствующие температуры. Оцените погрешности полученных значений температур.

### Задание 3. Получение зависимости сопротивления катушки от температуры

**Оборудование:** резистор (катушка медного провода), измеритель сопротивления (мультиметр GDM8145), нагреватель, термопара, измеритель температуры (мультиметр VC97), нуль термостат.

1. Подключите концы терморезистора к мультиметру GDM8145, установите на нём режим измерения сопротивления; свободные концы термопары к разъёмам **TEMP** мультиметра VC97 – режим измерения температуры.

2. Поместите один спай термопары в нуль термостат, другой вместе с терморезистором/катушкой в нагреватель, включите нагреватель и снимите зависимость сопротивления **R** от температуры **T** в интервале от 7 до 97 °C с шагом ~ 2 градуса.

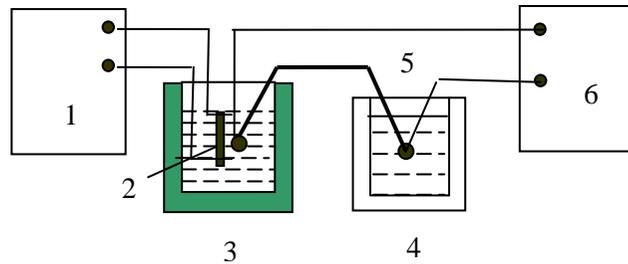


Рис. 6. Установка для измерения зависимости сопротивления катушки от температуры: 1 – мультиметр GDM-8145, 2 – исследуемый образец, 3 – нагреватель, 4 – нуль термостат, 5 – дифференциальная термопара, 6 – мультиметр VC 97

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

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

4. Далее постройте график зависимости  $(R/R_0 - 1)$  от  $(T - T_0)$ , из которого определите температурный коэффициент  $\alpha$  металла, и используя данные таблицы 3 определите тип металла.

### Содержание отчёта

**Отчёт должен содержать:**

1. Название работы.
2. Цель работы
3. Список используемых приборов, с указанием класса точности (погрешности измерений).
4. Схемы используемых установок для проведения измерений.
5. Расчётные формулы всех определяемых величин и их погрешностей.
6. График зависимости термоЭДС от времени.

7. Чувствительность термопары, с указанием погрешности.

8. Величину комнатной температуры, температуру кипения воды и температуру тела.

9. Для терморезистора/катушки:

– таблицу исходных данных,

– график зависимости сопротивления  $R$  от температуры  $T$ ,

– график зависимости  $(R/R_0 - 1)$  от  $(T - T_0)$  и температурный коэффициент термометра сопротивления с указанием погрешности и тип металла.

### Библиографический список

1. Клаассен К.Б. Основы измерений (датчики и электронные приборы). Изд. дом. Интеллект. Долгопр., 2008.
2. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений. М.: Мир, 1990.
3. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2005.
4. Физические величины, Справочник, М., Энергоатомиздат, 1991.

## Работа 2

## Бесконтактные методы измерения температуры

**Цель работы:** знакомство с бесконтактными методами измерения температуры, измерение температуры различных объектов с использованием ИК пирометра, определение коэффициента излучения различных объектов.

**Оборудование:** мультиметры типа VC97, GDM8145 (или аналогичные); терморпара; нуль-термостат; два тигля для плавления металлов; один с чистым оловом, другой с неизвестным сплавом; сосуд для кипячения воды, пирометр ARKOM PR480.

### Общие сведения о пирометрии

Если тело нагрето значительно выше температуры окружающей среды, то его теплообмен со средой происходит не только теплопроводностью и конвекцией, но и электромагнитным излучением. Интегральная излучательная способность  $E$  абсолютно чёрного тела пропорциональна четвёртой степени его абсолютной температуры:

$$E = \sigma T^4.$$

Величина  $\sigma$  – универсальная постоянная Стефана – Больцмана, равная  $5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup> К<sup>4</sup>). Для тел не являющихся абсолютно чёрными

$$E = \alpha \cdot \sigma T^4,$$

где  $\alpha$  – коэффициент излучающей способности, определенный для полного излучения тела.

Воспринимая это излучение, можно измерять температуру без непосредственного контакта с нагретым телом. Термометры, построенные на этом принципе, называют **пирометрами**.

По сравнению с другими устройствами для измерения температуры пирометры позволяют определять её бесконтактно при теоретически неограниченном верхнем пределе измерения.

Пирометры используют при:

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

### Классификация пирометров

Пирометры можно разделить по некоторым основным признакам: принципу действия, числу диапазонов измерения, конструктивному исполнению.

**По принципу действия** пирометры излучения разделяют на оптические пирометры частичного излучения (яркостные и цветовые) и радиационные.

- **Яркостные** (квазимонохроматические) пирометры – приборы, работающие в узком спектральном диапазоне. Они позволяют визуально определять температуру нагретого тела сравнением его цвета с цветом эталонной нити.
- **Цветовые** (мультиспектральные) – пирометры спектрального отношения, определяют температуру объекта, основываясь на результатах сравнения теплового излучения в двух диапазонах длин волн.
- **Радиационные** (пирометры полного излучения) – принимают излучение в максимально широком спектральном диапазоне. Определение температуры происходит посредством пересчёта значения мощности теплового излучения.

### По температурному диапазону

**Низкотемпературные.** Способны показывать температуры объектов, имеющих даже отрицательные значения этого параметра.

**Высокотемпературные.** Оценивают температуру сильно нагретых тел.

### По исполнению

**Переносные.** Должны обладать хорошими подвижными свойствами. Обычно имеют небольшой дисплей, отображающий графическую или текстово-цифровую информацию.

**Стационарные.** Предназначены для более точной оценки температуры объектов. Используются в основном для непрерывного контроля технологического процесса.

### Визуализация величин

**Текстово-цифровой метод.** Измеряемая температура отображается в градусах на цифровом дисплее.

**Графический метод.** Позволяет видеть наблюдаемый объект в спектральном разложении областей низких, средних и высоких температур, выделенных различными цветами.

**По спектральному диапазону** пирометры могут быть разделены на: полного, широкополосного, узкополосного (монохроматические) излучений.

## Оптические пирометры

### Квазимонохроматический (яркостный) пирометр.

Принцип действия яркостного пирометра основан на сравнении монохроматической яркости излучения накаливаемого тела с монохроматической яркостью излучения нити специальной пирометрической лампы накаливания. Принципиальная схема оптического пирометра приведена на рис. 1.

Для получения монохроматического света в окуляре установлен красный светофильтр, пропускающий лучи длиной волны ( $\lambda = 65\text{--}66\text{ мкм}$ ). В объектив помещен серый поглощающий светофильтр, служащий для расширения пределов измерений.

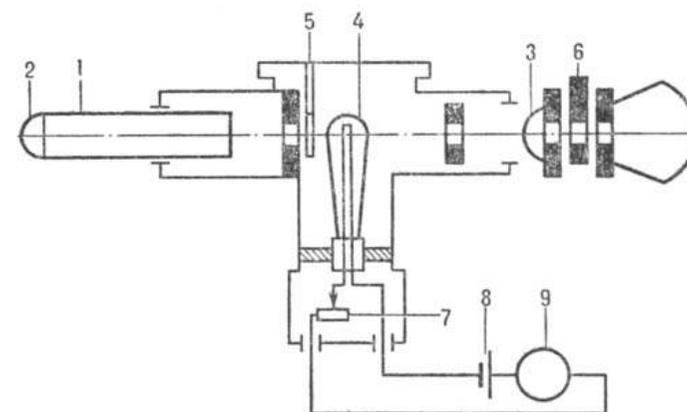


Рис. 1. Квазимонохроматический пирометр: 1 – трубка; 2, 3 – линзы; 4 – лампа накаливания; 5, 6 – серый и красный светофильтры; 7 – реостат; 8 – источник питания; 9 – милливольтметр.

При подготовке оптической системы к измерению трубку наводят на раскаленное тело и передвигают объектив до получения четкого изображения тела и нити лампы. Включив источник тока, регулируют яркость нити до тех пор, пока её средняя часть не сольется с освещенным телом. В момент выравнивания яркостей тела и нити (когда нить становится неразличимой) прибор показывает температуру, равную яркостной температуре объекта измерения. Если объект измерения по излучающей способности близок к абсолютно черному телу, то показываемая пирометром яркостная температура равна истинной температуре объекта.

### Пирометры спектрального отношения (цветовые пирометры)

Известно, что с изменением температуры меняется цвет накаливаемого тела. Тело, нагретое приблизительно до  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , излучает невидимые инфракрасные тепловые лучи. Дальнейшее увеличение температуры приводит к появлению в спектре излучения видимых световых лучей. Сначала появляется красный цвет, который постепенно переходит в желтый, а затем, после  $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$  свечение приближа-

ется к белому цвету, представляющему собой смесь излучений разной длины волны.

Энергия излучения неравномерно распределяется между колебаниями с разной длиной волны. Чем выше температура, тем большая доля энергии приходится на излучение с меньшей длиной волны. Например, в солнечном свете значительную долю составляет ультрафиолетовое излучение с малой длиной волны.

Если в спектре излучения накаливаемого тела выделить два монохроматических излучения с длинами волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  (соответствующих, например, красному и синему свету), то с изменением цвета будет меняться соотношение яркостей этих излучений, по которому и определяется температура накаливаемого тела.

Для абсолютно чёрного тела отношение монохроматических яркостей излучений  $R$  длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  равно

$$R = \left[ \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right]^{-5} e^{-\frac{c_2}{T} \left( \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}, \text{ или } \ln R = \frac{c_2}{T} \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) - 5 \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2}.$$

Из этих формул следует, что отношение монохроматических яркостей для двух длин волн является однозначной функцией температуры.

На рис.2 приведена схема пирометра спектрального отношения. Измеряемое излучение объекта через защитное стекло 1 и объектив 2 попадает на фотоэлемент 4. Между фотоэлементом и объективом

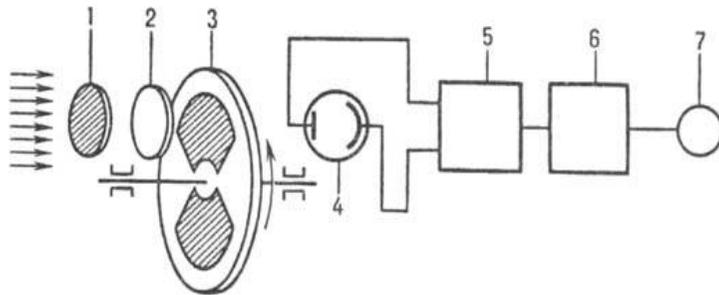


Рис. 2. Пирометр спектрального отношения: 1 – защитное стекло; 2 – объектив; 3 – обтюратор с красным и синим светофильтром; 4 – фотоэлемент; 5 – усилитель; 6 – логарифмическое устройство; 7 – милливольтметр.

установлен вращающийся диск с двумя отверстиями, закрытыми двумя различными, например, красным и синим светофильтрами. При вращении диска на фотоэлемент попеременно попадают излучения разной интенсивности, поэтому на его выходе поочередно появляются импульсы тока, пропорциональные соответствующим интенсивностям излучения. Предварительно усиленный переменный ток, преобразуется электронным логарифмическим устройством в постоянный ток, величина которого пропорциональна  $\ln R$ , т.е. линейно зависит от обратной величины абсолютной температуры тела ( $1/T$ ). Выходной ток определяется по регистрирующему прибору, шкала которого градуирована в градусах. Диапазон измерений температур 1400–2500 °С.

В отличие от пирометров с исчезающей нитью на показания пирометра спектрального отношения практически не влияют изменения коэффициента излучающей способности тела, обусловленные изменением его температуры, состояния поверхности, состава и другими причинами, а также не влияет ослабление излучения не вполне прозрачной атмосферой между объектом и датчиком. Благодаря этому цветовой пирометр обеспечивает высокую точность измерения.

### Радиационные пирометры

В отличие от оптических радиационные пирометры воспринимают излучение во всём спектральном диапазоне и преобразовывают его в соответствующий сигнал, поэтому радиационные пирометры называются также пирометрами полного излучения.

В пирометрах этого типа излучение нагретого тела при помощи оптики фокусируется и направляется на приёмник. Различают следующие виды приемников/преобразователей теплового излучения: *термопары, термометры сопротивления, фотоэлементы, фоторезисторы, фотодиоды и фототранзисторы*. Чувствительность термопар и термометров сопротивления практически не зависит от длины волны, включая ультрафиолетовую и инфракрасную области излучения. Поэтому они пригодны для измерения сравнительно низких температур (до 1500 °С). Остальные приемники излучения являются чувствительными только в узком спектральном интервале, их характеристики сильно зависят от длины волны. Но абсолютная

чувствительность у них существенно больше, чем у термопар или термометров сопротивления.

В радиационных пирометрах излучение через плёнку 6 пропускающую инфракрасные лучи, падает на сферическое зеркало 4, которое фокусирует его на звёздообразную термобатареею состоящую из нескольких миниатюрных последовательно соединённых V-образных хромель-копелевых или нихром-константановых термопар 2 (рис.3). Рабочие спаи термопар зачернены и нагреваются излучением объекта измерения (1), фокусируемых с помощью оптической системы (3). Возникающая при этом термо-ЭДС измеряется милливольтметром или автоматическим потенциометром (4), градуированном в градусах по температуре излучения абсолютно чёрного тела. По измеренной температуре (900–2000 °С) истинную температуру нагретого тела находят из специальной таблицы.

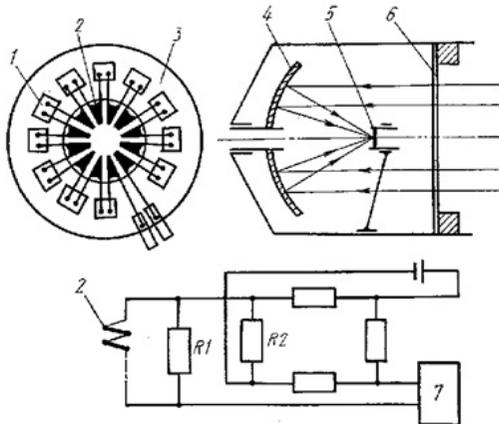


Рис. 3. Пирометр полного излучения: 1 – металлические полоски; 2 – термопары; 3 – приёмник излучения (преобразователь); 4 – сферическое зеркало; 5 – теплоприёмник; 6 – защитная плёнка.

Точное определение количества поступающей в пирометр энергии излучения провести невозможно, так как между приемником излучения и окружающей средой происходит теплообмен. Несмотря на это, пирометры полного излучения имеют широкое применение, так как они могут быть установлены стационарно, что позволяет

применять дистанционную передачу показаний, проводить автоматическую запись и регулировать температуру.

Положительной особенностью радиационных пирометров является то, что их можно применять:

- для измерения невысоких температур, при которых объект измерения не дает видимого излучения;

- для измерения температуры тел, более холодных, чем окружающая среда. В этом случае во время теплообмена между объектом измерения и термобатареей она не нагревается, а охлаждается.

В условиях, когда разница температур объекта измерения и окружающей среды невелика, необходимо термостатирование свободных концов термопар или всего корпуса телескопа пирометра.

В настоящее время радиационные пирометры применяются для измерения температур в диапазоне от – 40 до 2500°С. Особенно удобно применение радиационных пирометров для бесконтактного измерения невысоких температур, при которых методы оптической и цветовой пирометрии неприемлемы, например, для измерения невысоких температур движущихся предметов.

При измерениях радиационным пирометром необходимо следить, чтобы изображение объекта, создаваемое объективом на рабочих спаях термопар, полностью покрывало рабочие спаи. При слишком малой излучающей поверхности показания прибора будут заниженными. Источником погрешностей измерения может быть также недостаточная прозрачность среды между телескопом и объектом измерения и загрязнение оптики телескопа.

### ИК- пирометры

В настоящее время бесконтактные термометры, которые стали называть ИК- термометрами (инфракрасные радиационные термометры), стали особенно популярным видом температурных приборов. Несмотря на то, что по точности пирометры уступают контактными датчикам температуры, они незаменимы там, где необходимо быстро и безопасно определить температуру поверхности.

Инфракрасные термометры применяются для диагностики тепловых и электрических линий передачи, источников тока, обнаружения неисправностей, вызванных утечками тепла, коррозией контактов и т. д. ИК- пирометры востребованы также там, где трудно или невозможно использовать контактный датчик – для оценки тем-

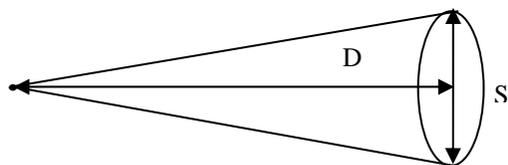
пературы сильнонагретых движущихся объектов, мощных моторов и турбин, расплавленных металлов. Одним из самых новых применений инфракрасных термометров является медицинская диагностика.

Приборы, дающие возможность получить изображение распределения температуры по поверхности объекта называют тепловизорами.

Большинство современных ИК термометров являются портативными и, как правило, очень простыми в обращении. Однако существуют особенности их применения, которые необходимо учитывать чтобы получить наиболее точный результат измерения температуры. Основными параметрами любого инфракрасного термометра являются оптическое разрешение и излучательная способность.

### Оптическое разрешение

Оптическое разрешение определяется отношением диаметра пятна (круга)  $S$  на поверхности, излучение с которого регистрирует 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  $D/S$ , тем более мелкие предметы пирометр может различать. На рисунке 4 изображен пирометр с оптическим разрешением 6:1.

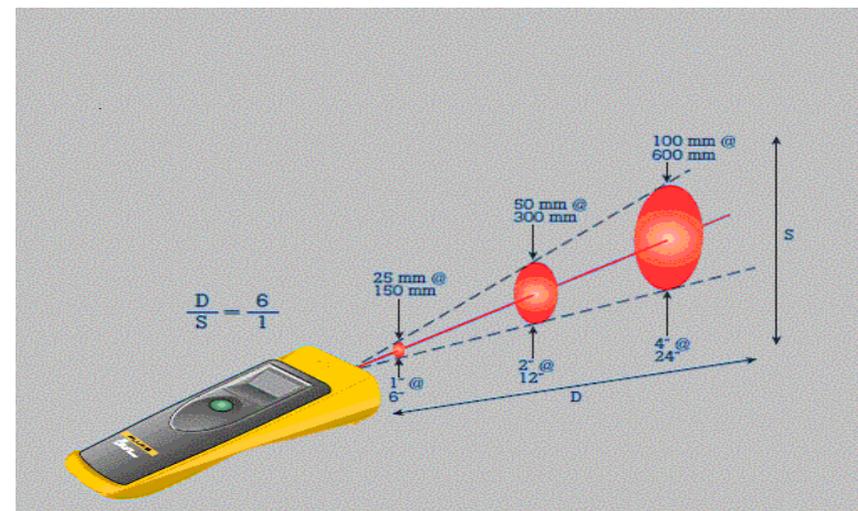


Рис.4. Пирометр с оптическим разрешением 6:1

Чтобы правильно выбрать прибор, необходимо знать сферу его применения. Необходимо иметь в виду, что точность измерений температуры значительно снизится, если происходит нацеливание ИК термометра на большую площадь, чем площадь измеряемого объекта. У большинства современных термометров имеется специальный лазерный целеуказатель для точного наведения на объект измерения.

### Излучательная способность (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 к энергии излучения абсолютно чёрного тела при той же температуре. 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 – основной источник погрешности для всех пирометрических методов измерения температуры. Для выбора степени черноты существуют

справочные таблицы, показывающие степень черноты для различных материалов и различной обработки поверхности (см. табл. X). На коэффициент излучения сильно влияет окисленность поверхности металлов. Так, если для стали окисленной коэффициент составляет примерно 0,85, то для полированной стали он снижается до 0,075. Степень черноты можно определить экспериментально.

**Примечание.** Следует иметь в виду, что коэффициент излучения зависит от длины волны. Он тем выше, чем короче длина волны. Кроме того, ошибка, вызванная неточным определением коэффициента излучения, будет пропорциональна эффективной длине волны.

В случаях, когда, например, надо измерять температуру поверхности частично окисленного металла преимущество коротковолновых пирометров очевидно, так как окисленный слой будет иметь высокую и стабильную излучательную способность при короткой длине волны, чем – при длинной. Кроме того, коротковолновые яркостные пирометры обычно менее подвержены влиянию атмосферного поглощения, чем пирометры широкого спектра. Если поглощение вызвано частицами или каплями на пути визирования, уменьшенное значение погрешности при коротких волнах будет иметь меньшую относительную зависимость измерений температуры от энергии. *Поэтому если требуется высокая точность измерения температуры поверхности, то рекомендуется использовать коротковолновый яркостный пирометр.*

Название “коротковолновый” – относительное, например при  $T=1000^{\circ}\text{C}$  1мкм – короткая длина волны; в то время как при  $T=10^{\circ}\text{C}$  10 мкм также считается короткой длиной. За критерий эффективной длины волны для отнесения пирометра к достаточно “коротковолновому” принимается максимальная длина волны, которая должна быть настолько короткой, чтобы обеспечить достаточную энергию для получения необходимого отношения сигнал-шум от детектора при минимальной измеряемой температуре.

### **Спектральный диапазон**

Спектральный диапазон определяется как нижний и верхний предел длины волны (в мкм или нм) при достижении спектральной чувствительности 50 % от пика чувствительности. Может также приводиться основная (эффективная) длина волны и полная ширина

полосы пропускания, в которой чувствительность достигает 50 % от пика чувствительности (полная ширина на половине максимума). М

Общепринято для монохроматических пирометров приводить эффективную длину волны в спектральном диапазоне и полную ширину на половине максимума, а для широкополосных пирометров приводить верхний и нижний предел.

### **Заключение**

Из приведенных данных следует, что всегда следует выбирать пирометр с самой короткой длиной волны, которая позволяет провести необходимые измерения самой низкой температуры в диапазоне измерения.

Кроме сложности учета коэффициента излучения объекта, яркостные пирометры имеют ряд иных существенных недостатков, их результаты зависят:

- от расстояния до измеряемого объекта,
- формы объекта,
- загазованности промежуточной среды,
- наличия защитных стекол и непрозрачных объектов в поле зрения пирометра,
- боковых засветок при работе с крупноразмерными объектами,
- переотражений измеряемым объектом излучения сильно нагретых объектов, расположенных рядом.

Отсюда следует что факторов, мешающих получению радиационными пирометрами точных результатов достаточно много. При наличии многих вышеперечисленных недостатков необходимо пользоваться пирометрами спектрального отношения.

## Эксперимент

### Измерение температуры различных объектов пирометром ARKOM PR480

**Оборудование:** дифференциальная термопара, тигель с оловом, источник питания, нуль термостат, пирометр ARKOM PR480, лёд и сосуд с водой.

### Характеристики пирометра ARKOM PR480

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 « $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{F}$ » – переключатель шкалы.
4. Кнопка «EMS» – изменение коэффициента излучения.
5. Кнопка  $\bigcirc/\blacktriangle$  – вкл/выкл подсветки указателя.
6. Курок – включение прибора, начало измерения.



7. Отсек питания (в рукоятке).

#### Технические характеристики

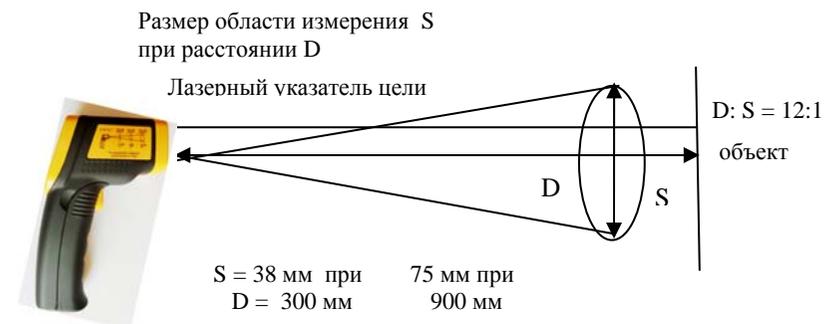
Параметр	Диапазон	Погрешность	Дискретность
Диапазон, погрешность, дискретность	-50 0 °C	±1,5% или ±1,5 °C*	0,1 °C
	0 °C 480 °C.	±2% или ±3 °C	
Повторяемость	±1 % или ±0,1 °C		
Оптическое разрешение **	12:1		
Время отклика	≤ 500 мс; 95% отклик		
Коэффициент излучения	Регулируемый: 0,10...1,00		
Спектральная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

\*Результирующая погрешность определяется большим из значений.

\*\*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.



### 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 вкл/выкл. подсветки/указателя используйте кнопку .

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

5. Для измерения коэффициента излучения нажмите кнопку «EMS».

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

*Коэффициент излучения следует задать в зависимости от объёма измерения вручную (см. таблицу 1).*

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

7. 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 1

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
Замор пища	0,90	Сталь	0,80
Горяч. пища	0,93	Текстиль	0,94
Стекло (плоское)	0,85	Вода	0,93
Олово не окисленное	0,04	Лёд	0,97

### Задание 1. Определение коэффициента излучения исследуемого вещества.

1. Перед выполнением задания познакомьтесь с устройством и принципом действия пирометра **ARKOM PR480**.

2. Зная разрешающую способность пирометра (12:1) и размер поверхности олова  $S$ , рассчитайте расстояние  $D$ , на которое должен быть установлен пирометр, чтобы погрешность измерения была минимальной.

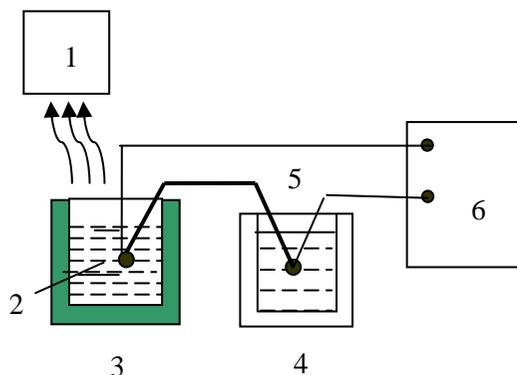


Рис. 5. Установка для измерения температуры:

1 – пирометр ARKOM PR480, 2 – исследуемый образец, 3 – нагреватель, 4 – нуль термостат, 5 – дифференциальная термопара, 6 – мультиметр VC 97

3. Соберите схему рис.5. Измерьте температуру чистого олова с помощью контактного датчика, например термопары. Затем измерьте температуру пирометром и рассчитайте степень черноты, при которой показания пирометра совпадают (с учётом погрешности измерения) с показаниями контактного датчика.

4. Измерьте пирометром температуру олова, имеющего изменённую структуру/окисленного, но находящегося при той же температуре. Рассчитайте его степень черноты, сравните с табличными данными.

5. При сравнительно низких температурах объекта (до  $250^{\circ}\text{C}$ ) можно использовать другой вариант: наклеить на участок поверхности объекта ленту черного цвета (например, электроизоляционную).

Затем измерьте температуру ленты с помощью пирометра при установленной степени черноты 0,95. После этого измерьте пирометром незакрытую лентой часть объекта и подберите такую степень черноты, чтобы показания пирометра совпали с результатом измерения ленты.

6. Можно часть объекта окрасить матовой черной краской, которая имеет степень черноты около 0,98. Затем измерить температуру окрашенного участка с помощью пирометра при установленной степени черноты 0,98. После этого измерьте с помощью пирометра неокрашенную часть объекта и подберите такую степень черноты, чтобы показания пирометра совпали с результатом измерения на окрашенном участке.

### Задание 2. Определение коэффициента излучения других материалов

1. Измерьте температуру воды и льда, установив на пирометре соответствующие коэффициенты излучения (см. Таблицу 1).

Сравните с табличными данными.

2. Проведите анализ полученных результатов, перечислите возможные погрешности и способы их устранения.

### Содержание отчёта

#### Отчёт должен содержать:

1. Название работы.
2. Цель работы
3. Список используемых приборов, с указанием класса точности (погрешности измерений).
4. Схемы используемых установок для проведения измерений.
5. Расчётные формулы всех определяемых величин и их погрешностей.
6. Температуру исследуемого вещества, измеренную контактным и бесконтактным методом и коэффициент его излучения.
8. Величину комнатной температуры, температуру льда, температуру воды при плавлении в ней льда, температуру кипения воды.

9. Коэффициенты излучения чистого и окисленного олова.

Работа 3

**При защите отчёта студент должен знать:**

- Физическую сущность работы,
- Метод и схему измерений,
- Достоинства и недостатки метода, возможность его улучшения,
- Возможные погрешности и способы их уменьшения.

### **Библиографический список**

5. *Клаассен К.Б.* Основы измерений (датчики и электронные приборы). Изд. дом. Интеллект. Долгопр., 2008.
6. *Мейзда Ф.* Электронные измерительные приборы и методы измерений. М.: Мир, 1990.
7. *Фрайден Дж.* Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2005.
8. *Физические величины*, Справочник, М., Энергоатомиздат, 1991.

## **Изучение процесса теплопередачи**

**Цель работы:** знакомство с процессами теплопередачи в кристаллических и аморфных телах. Получение диаграмм температурной зависимости от времени для кристаллического и аморфного тела при их нагревании и охлаждении. Измерение распределения температуры в аморфном теле.

### **Теплопередача**

Теплопередача (или теплообмен) – один из способов изменения внутренней энергии тела (или системы тел). Внутренняя энергия может изменяться или за счёт совершения над всем телом работы, или сообщения ему тепла. При теплопередаче внутренняя энергия одного тела переходит во внутреннюю энергию другого тела *без совершения* механической работы.

Внутренней энергией тела называется полная энергия, относящаяся к самим молекулам – это кинетическая энергия движения молекул, кинетическая энергия движения атомов внутри молекулы (если молекула не одноатомная), потенциальная энергия взаимодействия между атомами внутри молекулы и кинетическая энергия частиц, входящих в состав атомов (ядер и электронов). Во внутреннюю энергию *не входит* кинетическая энергия тела как целого и потенциальная энергия во внешнем поле сил. Внутренняя энергия является функцией состояния системы.

Теплообмен между двумя средами происходит через разделяющую их твердую стенку или через поверхность раздела между ними. Теплота способна переходить только от тела с более высокой температурой к телу менее нагретому. Теплообмен всегда протекает так, что убыль внутренней энергии одних тел всегда сопровождается таким же приращением внутренней энергии других тел, участвующих в теплообмене. Это является частным случаем закона сохранения энергии.

Существует три вида теплопередачи: *теплопроводность, конвекция и излучение.*

**Теплопроводность** – перенос энергии от более нагретых участков тела к менее нагретым за счет теплового движения и взаимодействия микрочастиц (атомов, молекул, ионов и т. п.), который приводит к выравниванию температуры тела. Процесс теплопроводности *не сопровождается* переносом вещества. Этот вид передачи внутренней энергии характерен как для твердых веществ, так для жидкостей и газов.

Количественной мерой теплопереноса теплоты является вектор плотности теплового потока  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>, указывающий направление переноса и численно равный количеству теплоты, проходящему через площадь стенки  $\Delta S$  при градиенте температуры  $dT/dx$ :

$$q = \frac{dQ}{dt} = k \Delta S \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

где  $k$ , Вт/(м К) – коэффициент теплопроводности материала стенки, зависящей от температуры, давления и т. д.

Теплопроводность различных веществ разная. Металлы обладают самой *высокой* теплопроводностью, причем у разных металлов теплопроводность различна.

Таблица 1.

Значения коэффициента теплопроводности для различных веществ

Вещество	Температура °С	Коэффициент теплопроводности дж/(град сек см)
Медь	20	2,93 – 3,98
Латунь	20	1,09
Железо	20	0,585 – 0,710
Кирпич	20	0,004
Дерево	20	0,002
		(Среднее значение)
Асбест	100	0,0012 – 0,0024
Лёд	0	0,021
Вода	20	0,006
Водяной пар	100	0,00023
Воздух	0	0,00024

При выводе уравнения (1) предполагалось, что поток тепла идёт только в направлении  $x$  и никакого бокового оттока тепла нет, т. е. эта формула справедлива только для стенки.

Преобразовав формулу (1) получим:

$$q = \frac{\Delta T}{\frac{1}{k} \frac{\Delta x}{\Delta S}} = \frac{\Delta T}{R}$$

Величина  $R$  называется тепловым сопротивлением, по аналогии с электрическим сопротивлением, т. е. коэффициент теплопроводности  $k$  играет такую же роль, как и удельная электропроводность в формуле для электрического сопротивления.

Теплопроводность в жидкостях может существовать только при наличии градиента температуры. Частицы жидкости, имеющие более высокую энергию, совершают колебания с большей амплитудой и при столкновениях с другими частицами передают им энергию, как бы раскачивая их. Такой механизм передачи энергии происходит медленно, поэтому теплопроводность жидкостей мала (исключение составляют жидкие металлы, теплопроводность которых близка к теплопроводности твёрдых металлов).

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:

$$q = q_{\text{тпр}} + q_{\text{конв}}$$

Теплообмен *излучением* осуществляется электромагнитными волнами. Поглощение лучистой 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 параллельно и независимо друг от друга.

В случае сильно поглощающей и излучающей среды для радиационной составляющей потока энергии  $q_{\text{рад}} = \text{grad}(T^4)$ .

## Твёрдые тела

Свойства тел зависят от того, как они устроены, из каких частей состоят, какие силы действуют между этими частями и т. д. Любое тело состоит из множества маленьких частиц (молекул), расположенных на некотором расстоянии друг от друга. Между молекулами в веществе действуют силы притяжения и отталкивания, зависящие от расстояния между частицами. Существование трех агрегатных состояний вещества – твёрдого, жидкого и газообразного – указывает на наличие межмолекулярных сил. В твёрдом и жидком состоянии молекулы притягиваются настолько сильно, что тела *сохраняют объём, а твёрдое* тело ещё и *форму*. В газообразном состоянии силы взаимодействия малы, поэтому газ заполняет весь, предоставленный ему объём, т. е. молекулы любого тела находятся в непрерывном движении, которое является хаотическим. Это хаотическое движение молекул называется тепловым движением. Таким образом, вещество состоит из мельчайших частиц – молекул, которые взаимодействуют друг с другом и находятся в непрерывном, беспорядочном (тепловом) движении.

Из вышесказанного следует, что *твёрдыми* называются тела, отличающиеся постоянством формы и объёма. Все вещества (за исключением гелия) при достаточно низких температурах переходят в твёрдое состояние. Твёрдые тела делятся на: *кристаллические* и *аморфные*, значительно отличающиеся по своим физическим свойствам.

*Аморфные* тела по признаку сохранения формы относятся к твёрдым телам, по остальным свойствам не отличаются от жидкостей. Аморфные тела рассматривают как переохлаждённые жидкости с аномально большим коэффициентом вязкости, поэтому при определённых условиях/температуре находятся в твёрдом состоянии. При повышении температуры вязкость их уменьшается, т. е. они постепенно размягчаются (не имея определённой температуры плавления) и плавно превращаются в жидкость. При затвердевании аморфное тело остается однородным. Свойства аморфных тел одинаковы по всем направлениям, т. е. они изотропны.

*Кристаллические* твёрдые тела при повышении температуры так же переходят в жидкое состояние, но этот переход происходит не постепенно, а скачком, при определённой для данного вещества

температуре – температуре плавления. Это указывают на особенности в их строении. Действительно, свойства твердых тел определяются правильным периодическим расположением составляющих их частиц (*кристаллическую решетку*), которое распространяется на весь объём тела (дальний порядок). Тела с правильным расположением частиц называются кристаллическими. В аморфных телах упорядоченное расположение частиц распространяется только на соседние атомы (ближний порядок). 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.

Установление идеального порядка в расположении атомов, т. е. образование твёрдого тела, препятствует тепловое движение. Чтобы вещество находилось в твёрдом состоянии его тепловая энергия ( $kT$ ) должна быть ниже потенциальной энергии взаимодействия атомов. Идеальным кристаллом, в котором все атомы находятся в равновесии и обладают минимальной энергией, тело может быть только при абсолютном нуле.

## Фазовые переходы

Переход вещества от одной фазы в другую – фазовый переход – всегда связан с качественными изменениями свойств вещества. Примером фазового перехода могут служить изменения агрегатного состояния вещества или переходы, связанные с изменениями в составе, строении и свойствах вещества (например, переход кристаллического вещества из одной модификации в другую).

Различают фазовые переходы двух родов. Фазовый переход первого рода сопровождается скачкообразным изменением энергии или других величин, связанных с энергией. Для фазовых переходов первого рода характерно скачкообразное, т. е. происходящее в очень узком интервале, изменение свойств вещества.

К фазовому переходу первого рода относятся: испарение и конденсация, плавление и затвердевание, сублимация и конденсация в твёрдую фазу, некоторые структурные переходы в твёрдых телах.

## Плавление и кристаллизация

Фазовые переходы первого рода характеризуются постоянством температуры, изменениями объёма и энтропии. Например, при плавлении телу нужно сообщить некоторое количество теплоты, чтобы вызвать разрушение кристаллической решётки. Подводимая при плавлении теплота идёт не на нагрев тела, а на разрыв межатомных связей (на изменение внутренней энергии), поэтому плавление протекает при постоянной температуре. Если переход происходит в обратном направлении (кристаллизация), то система выделяет теплоту.

Наиболее часто рассматриваются фазовые переходы при изменении температуры, но при постоянном давлении (как правило, равном 1 атмосфере). Диаграмма зависимости температуры от времени при нагревании и охлаждении твёрдого тела/металла для такого типа фазового перехода приведена на рис. 1.

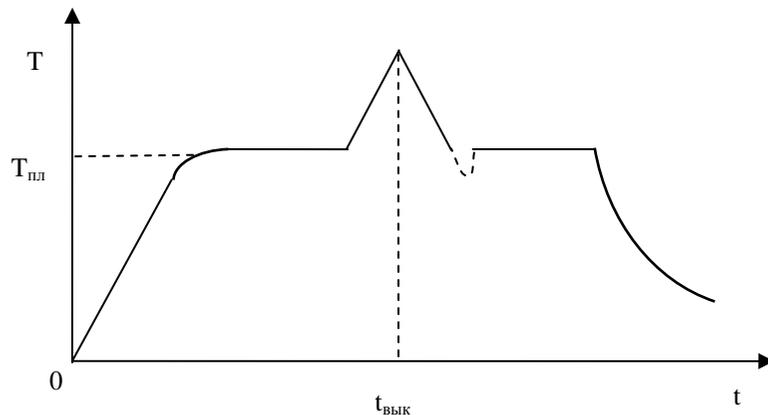


Рис. 1. Диаграмма плавления/кристаллизации

При нагревании твёрдого тела начинает возрастать как молекулярно-кинетическая, так и молекулярно-потенциальная энергия. При этом амплитуда колебаний атомов увеличивается, атомы отходят на большее расстояние друг от друга, а сближаются – на меньшее. В результате энергия взаимодействия электрических зарядов атомов увеличивается. По мере возрастания температуры, амплитуды колебаний атомов становятся настолько большими, что в какой-

то момент начинается разрушение кристаллической решётки, т. е. начинается процесс плавления. Плавление протекает *изотермически*, поэтому температура повышаться не может. После образования жидкой фазы происходит процесс нагрева как однородной жидкости.

Сначала температура твёрдого тела начинает достаточно быстро повышаться затем медленнее. Это связано с потерей тепла в окружающее пространство. При некоторой температуре начинается процесс плавления, температура не меняется, соответственно на диаграмме получается горизонтальная линия.

По окончании процесса плавления образуется жидкая фаза, и её температура начинает повышаться. После прекращения нагрева температура жидкости будет понижаться и кривая зависимости пойдет вниз. При достижении температуры  $T_{пл}$  начнётся процесс кристаллизации.

Процесс кристаллизации протекает с выделением теплоты кристаллизации, которая равна теплоте плавления. В процессе кристаллизации атомы и молекулы жидкой фазы образуют кристаллическую решетку, при этом температура остаётся постоянной. По окончании процесса кристаллизации выделение теплоты кристаллизации прекратится, и тело начнёт охлаждаться.

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

При теоретическом описании фазовых переходов первого рода каждую из фаз обычно описывают отдельно. Так, кристаллическую ветвь рассматривают, пользуясь моделью идеального кристалла, т. е. предполагая регулярное расположение всех атомов. Парообразную же ветвь получают, используя модель идеального газа, предполагающую полный беспорядок в системе. Зависимости, полученные для различных моделей, накладывают друг на друга и исследуют, какая из возможностей реализуется в данных условиях. Получить описание фазового перехода первого рода, одновременно учитывая все состояния системы, до настоящего времени не удается из-за огромных математических трудностей.

Фазовые переходы I рода широко распространенные в природе явления. К ним относятся: испарение и конденсация из газовой фазы в жидкую, плавление и затвердевание, сублимация и конденсация (десублимация) из газовой в твердую фазу, большинство полиморфных превращений, некоторые структурные переходы в твердых телах, например, образование мартенсита в сплаве железо - углерод. В чистых сверхпроводниках достаточно сильное магнитное поле вызывает фазовые переходы I рода из сверхпроводящего состояния в нормальное.

Фазовые переходы, сопровождающиеся скачкообразным изменением производной от энергии по температуре, называются фазовыми переходами *второго* рода. Эти переходы характеризуются скачкообразным изменением теплоёмкости. Примерами фазовых переходов второго рода являются: переход вещества из ферромагнитного состояния в парамагнитное; переход ряда металлов и некоторых сплавов при температуре, из нормального состояния в сверхпроводящее, характеризующее скачкообразным уменьшением электрического сопротивления до нуля; превращение обыкновенного жидкого гелия при  $T=2,9$  К в другую жидкую модификацию, обладающую свойствами сверхтекучести.

## Аморфные тела

В отличие от кристаллических, которые характеризуются правильной повторяемостью расположения атомов на больших расстояниях, аморфные тела, подобно жидкостям, обладают лишь ближним порядком. Некоторые аморфные вещества могут находиться и в кристаллическом и аморфном состояниях. Примером является двуокись кремния (кварц), который имеет правильную кристаллическую структуру. Аморфное кварцевое стекло имеет структуру, состоящую из тех же элементов, т. е. имеет тот же ближний порядок, но эти элементы соединены между собой по-разному (дальний порядок отсутствует).

Особенно сильно отличаются кристаллические и твёрдые вещества по тепловым свойствам. Если кристаллические тела имеют определённую температуру плавления, постоянную во всё время процесса плавления, то аморфные тела при нагревании размягчаются. При этом вязкость его уменьшается, молекулы легче меняют своих

соседей и при достаточно высокой температуре оно превращается в маловязкую жидкость, 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.

Многие вещества можно перевести из аморфного состояния – в кристаллическое и наоборот (расстекловывание). Наличие внутренних напряжений при быстром охлаждении создаёт анизотропию. Такие напряжения можно уничтожить новым нагреванием и последующим медленным охлаждением. Аморфные тела вследствие высокой вязкости имеют ограниченную подвижность.

К аморфным телам относятся: стекло, кварц, воск, парафин, смола канифоль и т. д. В данной работе изучается процесс перехода парафина из твердого состояния в жидкое и наоборот.

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

## Эксперимент

**Оборудование:** нагреватель SOLDER POT ST-31C, исследуемое вещество, многоканальный измеритель температуры CENTER 309 THERMOMETER, измеритель времени.

### Определение теплопроводности методом цилиндрического слоя

Распределение температуры по толщине цилиндрического слоя неограниченной длины и теплового потока описываются соотношениями:

$$T_c = T_{c1} - \frac{T_{c1} - T_{c2}}{\ln(d_2/d_1)} \ln \frac{d}{d_1}; \quad (2)$$

$$Q = \frac{\pi l (T_{c1} - T_{c2})}{(1/2q) \ln(d_2/d_1)}, \quad (3)$$

где  $T_{c1}$  и  $T_{c2}$  – температура обогреваемой и охлаждаемой поверхностей  $^{\circ}\text{C}$ ;  $d_1$   $d_2$  – соответствующие диаметры цилиндрического слоя исследуемого материала, м;  $d$  – текущее значение диаметра, м;  $l$  – длина, м. Это соотношение справедливо, если обогреваемая и охлаждаемая поверхности являются изотермическими, тепловой поток равномерный. Для определения теплопроводности необходимо измерить тепловой поток, проходящий через цилиндрический слой образца и воспринимаемый окружающей средой, а также температуры на граничных поверхностях образца и его размеры.

### Задание 1. Изучение процесса теплопередачи в аморфных телах

Экспериментальная установка состоит из нагревателя (рис. 2.), в который помещён исследуемый материал (парафин). Температура различных поверхностей образца измеряется четырёхканальным измерителем CENTER 309 THERMOMETER. Четыре термопары помещены в исследуемое вещество от нагревателя до центра с равными расстояниями (1 см) друг от друга и от стенки нагревателя.

1. Познакомьтесь с работой измерителя температуры.

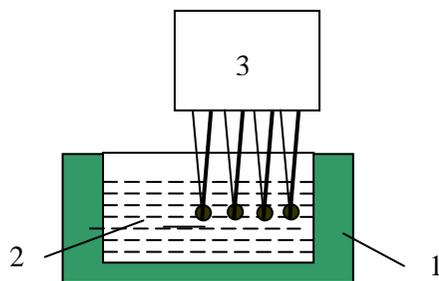


Рис. 2. Установка для измерения теплопередачи:  
1 – нагреватель, 2 – исследуемый образец,  
3 – многоканальный измеритель температуры.

2. Заготовьте таблицу для записи зависимости температуры, регистрируемой 4-мя датчиками (термопарами) от времени.

3. Установите ручку регулировки нагревателя в положение 3, включите нагреватель и снимите показания температуры от времени с шагом 5 мин. Мощность нагревателя должна создавать такой перепад температуры, при котором выполняется условие независимости теплопроводности исследуемого вещества от температуры. Закончите процесс измерения при естественном охлаждении образца до комнатной температуры.

4. Постройте графики зависимости температуры  $T$  от времени  $t$ , и объясните полученные данные

### Задание 2. Изучение процесса перехода из жидкого состояния – в твёрдое для кристаллического тела

**Оборудование:** тигель с исследуемым веществом; дифференциальная термопара; источник питания; нуль термостат; регистратор (АЦП); персональный компьютер.

Схема установки для регистрации зависимости ЭДС термопары от времени при изменении температуры олова показана на рис. 3. Измерительная термопара (3), один спай которой помещен в тигель с оловом (1), а другой – в нуль-термостат (сосуд с водно-ледяной смесью), подключена к аналого-цифровому преобразователю (АЦП) (4), при помощи которого осуществляется периодическое (с заданным периодом) измерение ЭДС термопары.

Результаты измерений отображаются в графическом виде на экране монитора персонального компьютера и запоминаются в файле экспериментальных данных.

Так как фазовые переходы первого рода протекают при постоянной температуре, то на зависимости ЭДС от времени будут наблюдаться характерные «полки» при температуре плавления и кристаллизации исследуемого вещества.

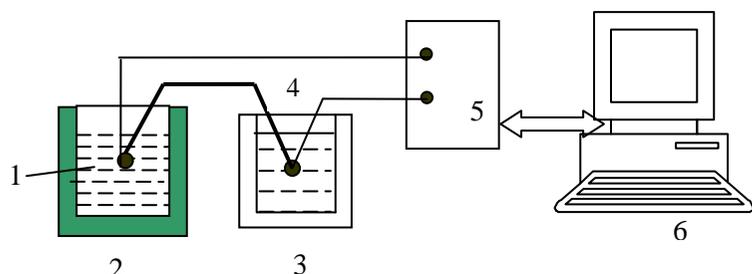


Рис. 3. Схема установки для изучения процесса теплопереноса в кристаллических телах: 1 – тигель с исследуемым веществом, 2 – нагреватель, 3 – нуль термостат, 4 – дифференциальная термопара, 5 – регистратор, 6 – компьютер

### Проведение эксперимента

Соберите схему согласно рис.3.

#### Работа с автоматизированной системой измерения

- 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 вещества.

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

- По окончании эксперимента нажмите кнопку "STOP&Write" и сохраните файл под своим именем с расширением .dat.

2. Используя экспериментальные данные, постройте график зависимости ЭДС от времени. Зная чувствительность термопары определите температуру плавления и кристаллизации вещества, а также величину погрешности. По полученному значению температуры кристаллизации определите тип исследуемого вещества.

3. Сравните зависимости  $T = f(t)$  для аморфных и кристаллических тел, и объясните их разницу.

### Контрольные вопросы

1. Физическая сущность процесса теплопроводности
2. Какие тела являются твёрдыми?
3. Отличие кристаллических и аморфных тел.
4. Сформулируйте понятие фазовых переходов первого рода.
5. Нарисуйте ожидаемый вид зависимости температуры от времени при нагревании, плавлении, последующего нагревания и охлаждения кристаллического и аморфного тела.
6. При каких условиях температуру во всех точках образца при его нагревании, плавлении, охлаждении и кристаллизации можно считать постоянной?
7. Что называется центрами кристаллизации?
8. Назовите источники методических погрешностей.

### Содержание отчёта

#### Отчёт должен содержать:

1. Название работы.
2. Цель работы
3. Список используемых приборов, с указанием класса точности (погрешности измерений).
4. Схемы используемых установок для проведения измерений.

5. Расчётные формулы всех определяемых величин и их погрешностей.

6. Графики зависимости температуры от времени четырех термодатчиков для аморфного тела.

7. График зависимости температуры от времени для кристаллического тела. Температуру плавления и кристаллизации твёрдого тела и определение типа.

### **Библиографический список**

9. *Клаассен К.Б.* Основы измерений (датчики и электронные приборы). Изд. дом. Интеллект. Долгопр., 2008.
10. *Мейзда Ф.* Электронные измерительные приборы и методы измерений. М.: Мир, 1990.
11. *Фрайден Дж.* Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2005.
12. *Кикоин И.К., Кикоин А.К.* Молекулярная физика. Физмат лит.
13. *Физические величины*, Справочник, М., Энергоатомиздат, 1991.

## **Приложение**

### **Правила оформления отчёта о лабораторной работе**

**Отчёт о лабораторной работе должен содержать.**

#### **1. Аннотацию**

В аннотации приводится краткая характеристика содержания лабораторной работы: какой объект изучается, метод исследования, диапазон измеряемых параметров, что удалось установить, анализ погрешностей, причины их возникновения.

#### **2. Введение**

Во введении необходимо привести постановку задачи, чётко сформулировать цель работы и кратко описать метод измерения исследуемого процесса.

#### **3. Описание эксперимента**

В данном разделе необходимо описать способы и приёмы, используемые при проведении эксперимента.

##### **3.1. Методика измерений**

Здесь необходимо привести детальное описание методики измерений, используемых средств и возможных погрешностей.

##### **3.2. Описание установки**

Привести подробное описание экспериментальной установки, обратив особое внимание на элементы, которые могут значительно повлиять на результат измерений. Привести рисунок или схему используемой установки.

##### **3.3. Результаты измерений**

Здесь приводятся первичные (необработанные) экспериментальные данные в виде таблиц и/или графиков, с указанием размерности каждой измеряемой величины. Таблицы и графики можно подготовить вручную или электронной обработкой. Пример таблицы и графиков приведены на стр. 63, 64, 65.

## 4. Анализ результатов измерений

### 4.1. Обработка результатов

Здесь необходимо описать используемые алгоритмы обработки результатов измерений, т. е. используемые формулы, результаты обработки.

### 4.2. Оценка погрешностей

Привести подробное описание погрешностей полученных экспериментальных данных, методика их расчёта, а так же неучтённые возможные погрешности.

## 5. Обсуждение результатов

В данном разделе необходимо выделить основной результат, чётко определить область параметров проведения эксперимента. Сравнить полученные экспериментальные данные с известными из справочной литературы, а так же с теорией. В случае значительного расхождения необходимо попытаться объяснить причину расхождения.

## 6. Выводы и заключение

Здесь необходимо указать суть проделанной работы, перечислить полученные основные результаты, и сделать соответствующие выводы. Дать оценку работы, указать способы улучшения методики проведения эксперимента, увеличения точности измерений.

## Пример оформления/обработки экспериментальных данных с использованием Excel

### Задание 3. Зависимость сопротивления катушки от температуры

**Оборудование:** резистор (катушка медного провода), измеритель сопротивления (мультиметр GDM8145), нагреватель, термopара, измеритель температуры (мультиметр VC97), нуль термостат.

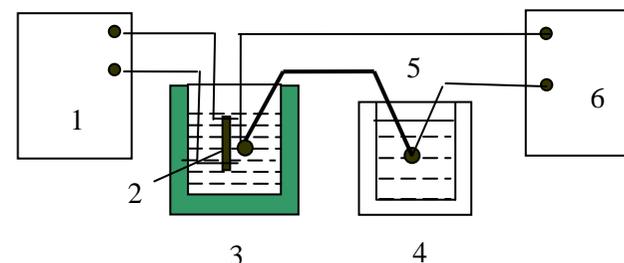


Рис. 6. Установка для измерения зависимости сопротивления катушки от температуры: 1 – мультиметр GDM-8145, 2 – исследуемый образец, 3 – нагреватель, 4 – нуль термостат, 5 – дифференциальная термopара, 6 – мультиметр VC 97

Предварительно охладим льдом температуру воды в нагревателе до минимального значения (примерно до  $5 - 7^{\circ}\text{C}$ ), затем включаем нагреватель и записываем в таблицу зависимость сопротивления катушки от температуры до максимально возможного значения (кипения воды).

### Обработка данных с использованием Excel.

Открываем Excel и заносим в таблицу полученные данные температуры и соответствующие значения сопротивления.

Таблица 1

Зависимости сопротивления терморезистора от температуры

T °C	R, Ом	(R/R <sub>0</sub> )-1	T °C	R, Ом	(R/R <sub>0</sub> )-1
7	1659		42	1900	0,1452682
9	1660	0,0006028	44	1910	0,151296
10	1670	0,0066305	46	1920	0,1573237
12	1680	0,0126582	48	1930	0,1633514
13	1690	0,018686	50	1950	0,1754069
14	1700	0,0247137	52	1960	0,1814346
15	1700	0,0247137	54	1980	0,1934901
16	1720	0,0367691	56	1990	0,1995178
20	1740	0,0488246	58	2000	0,2055455
22	1750	0,0548523	62	2030	0,2236287
23	1760	0,06088	64	2050	0,2356841
24	1770	0,0669078	66	2060	0,2417119
25	1780	0,0729355	68	2070	0,2477396
26	1786	0,0765521	70	2080	0,2537673
27	1790	0,0789632	72	2100	0,2658228
28	1800	0,084991	74	2110	0,2718505
29	1810	0,0910187	76	2130	0,283906
30	1810	0,0910187	78	2140	0,2899337
31	1820	0,0970464	80	2150	0,2959614
34	1832	0,1042797	82	2160	0,3019892
35	1850	0,1151296	84	2170	0,3080169
36	1850	0,1151296	86	2190	0,3200723
37	1860	0,1211573	88	2200	0,3261001
38	1870	0,1271851	91	2240	0,350211
40	1880	0,1332128	93	2260	0,3622664
			95	2270	0,3682942

Затем строим точечный график (точечную диаграмму), проводим линию тренда с выводом уравнения (рис. К) и проводим анализ результатов.

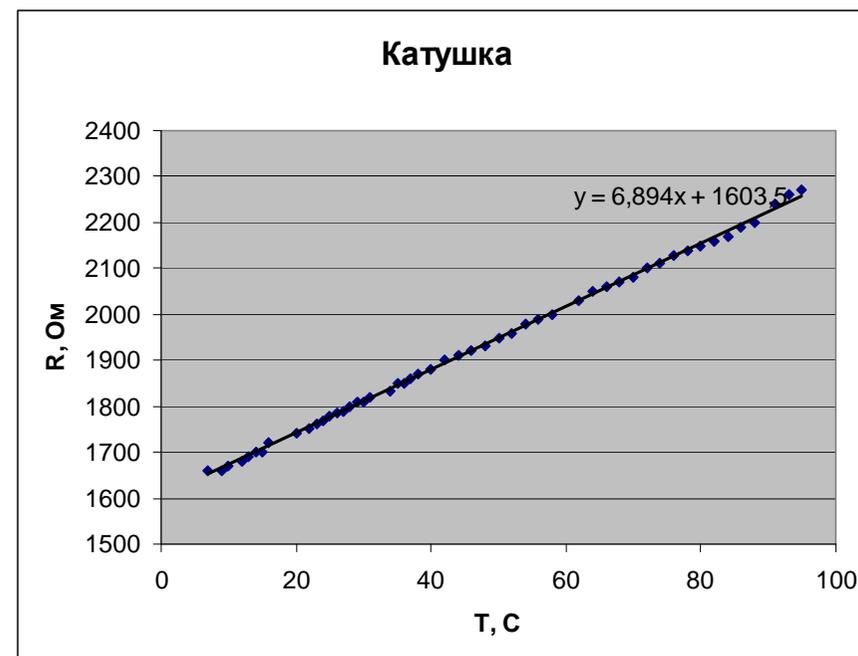


Рис. 1. График зависимости сопротивления катушки от температуры.

Из графика (рис. 1) следует, что:

- зависимость сопротивления катушки от температуры в данном температурном интервале достаточно линейная,
- уравнение линии тренда даёт значение сопротивления катушки про 0 °C равным 1603 Ом.
- 

Для определения температурного коэффициента необходимо построить график зависимости  $\left(\frac{R_r}{R_0} - 1\right)$  от температуры  $T$ . Для этого в следующий столбец таблицы заносим рассчитанные по форму-

ле  $\left(\frac{R_T}{R_0} - 1\right)$  данные, а затем строим соответствующий график.

Далее проводим линию тренда с выводом уравнения, в котором приведена величина температурного коэффициента исследуемого материала  $\alpha$  равная  $0,0042 \text{ C}^{-1}$ , что соответствует меди (см. табл. 3).

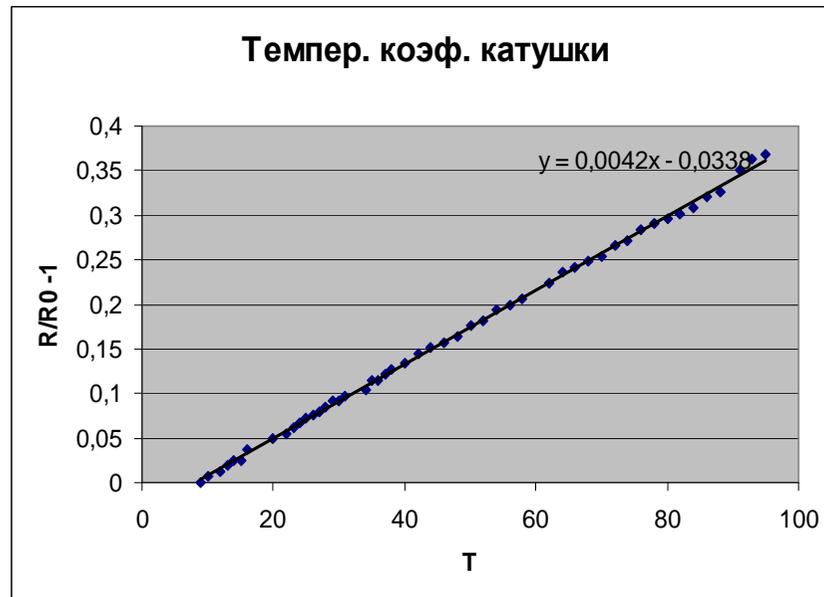


Рис. 2. Пример подготовленного в Excel графика для определения температурного коэффициента исследуемого вещества

## Анализ экспериментальных данных

### Контактные методы измерения температуры

**Цель работы:** изучение контактных методов измерения температуры, проведение калибровки термопары и терморезистора, измерение температуры различных объектов контактными датчиками.

**Оборудование:** мультиметры типа VC97 и GDM 8145 (или аналогичные), термопара – 2 шт., нуль-термостат, печь с тиглем, источник питания печи, регистратор, персональный компьютер, терморезистор и нагреватель.

1. Знакомство с работой мультиметров по паспортным данным.

Диапазон измерения температуры мультиметром VC97 от  $-40$  до  $+1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . При измерении температуры до  $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$  класс точности мультиметра равен:  $\gamma = \pm(1,0+5d)$ ,  $d$  – разрешающая способность мультиметра равна  $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .  $\gamma = \frac{\Delta T}{T_{\text{пред}}} 100\%$ , предел измерения  $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

тогда, абсолютная погрешность измерения температуры мультиметром VC97 равна  $\Delta T = \frac{\gamma T_{\text{пред}}}{100} = \frac{1 \cdot 400}{100} = 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Измерение термоЭДС производили мультиметром GDM 8145, погрешность измерения которого на пределе  $200 \text{ мВ}$  рассчитывается по формуле  $\Delta \xi = \pm(0,0003 * \xi_{\text{изм}} + 4 * 0,01) \text{ мВ}$ .

### Задание 1. Калибровка термопары и определение типа термопары

**Оборудование:** термопара, нуль-термостат, печь с тиглем, источник питания печи, регистратор, персональный компьютер.

В небольшом диапазоне температуры зависимость ЭДС термопары от времени можно считать линейной, поэтому чувствительность термопары рассчитаем по формуле  $\eta = \frac{\xi}{T}$ .

Построив график зависимости ЭДС от времени, определим температуру кристаллизации вещества, которая равна  $16,774 \text{ мВ}$ .



График зависимости ЭДС термопары от времени

Соответственно, полученная нами чувствительность термопары равна  $\eta = \frac{\xi}{T} = \frac{16,764}{231,9} = 0,072 \frac{mB}{^{\circ}C}$ .

Из полученного значения чувствительности следует, что используемая нами термопара – хромель алюмелевая (см. табл. 6).

2. Далее рассчитываем погрешность чувствительности термопары.

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

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = \frac{\Delta\xi}{\xi} + \frac{\Delta T}{T}$$

Отдельно определим относительную погрешность температуры по её заданному значению и погрешность измеренной термоЭДС, соответствующей заданной температуре.

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

$$\text{равна } \frac{\Delta T}{T} = \frac{0,1 \cdot 100}{231,9} = 0,05\% .$$

Погрешность в определении ЭДС определяем из графика. Относительная погрешность равна  $\frac{\Delta\xi}{\xi} = \frac{0,01}{16,76} 100 = 0,06\%$

Следовательно, относительная погрешность чувствительности термопары равна  $\frac{\Delta\eta}{\eta} = 0,1\%$ .

Но надо иметь в виду, что в определенной нами погрешности не учтена погрешность, связанная с неполным анализом методики проведения эксперимента (методическая погрешность). Погружая один спай термопары в сосуд с тающим льдом, мы принимали эту температуру равной  $0^{\circ}C$ . В действительности, отклонение от нулевого значения было возможным по нескольким причинам:

- спай термопары мог касаться или кусочка льда, стенки сосуда или его дна;
- плотность воды максимальна при температуре  $+4^{\circ}C$  (см. табл. 3), т. е. температура воды в придонном слое равна  $+4^{\circ}C$ . Соответственно, перепад температуры по высоте может составлять 4 градуса;
- 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 структура олова может значительно измениться, соответственно, должна измениться и температура плавления.

Из сказанного выше следует, что для получения более объективных результатов необходимо сделать тщательный предварительный анализ методики проведения эксперимента ещё до проведения измерений.

## Приложение 2

Таблица 2

## Температура кипения воды при различных давлениях

$P$ , Торр	$T$ , °C	$P$ , Торр	$T$ , °C	$P$ , Торр	$T$ , °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 3

## Плотность воды при различных температурах

$T$ , °C	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$T$ , °C	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$T$ , °C	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>
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