



КАФЕДРА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ

Практикум

ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНИКУ ЭКСПЕРИМЕНТА

Лабораторная работа 1

ДАТЧИКИ. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Составители: Ананьева Н.Г., Ананьева М.С., Самойлов В.Н.

2015

Датчики. Измерение температуры. Лабораторная работа 1 (практикум “Введение в технику эксперимента”). Учебное пособие / Составители: Н.Г. Ананьева, М.С. Ананьева, В.Н. Самойлов. – М.: ООП Физ. фак-та МГУ, 2015, 20 с.

Современные цифровые приборы используют различные датчики для преобразования измеряемых неэлектрических величин в электрические для дальнейшей оцифровки и представления на цифровом индикаторе. В данной лабораторной работе мы предлагаем познакомиться с измерительными датчиками на примере датчиков температуры: термопарой и термистором, инфракрасным термометром – пирометром.

Большое внимание уделяется оценке погрешностей измерений. В задаче исследуется отклонение показаний однотипных приборов при проверке и обсуждаются вопросы градуировки измерителей температуры.

Пособие предназначено для студентов первого курса физического факультета МГУ и для преподавателей, ведущих занятия в практикуме. Излагаемый материал может быть использован для подготовки к выполнению задач общего физического практикума.

Цели работы:

1. Познакомиться с измерительными датчиками на примере температурных датчиков.
2. Закрепить навыки расчета погрешности измерений.
3. Исследовать отклонение показаний однотипных приборов при проверке.
4. Познакомиться с операцией градуировки измерителей температуры.

В настоящее время большинство измерительных приборов цифровые. Это означает, что при измерении *аналоговый сигнал* (реальный – непрерывный) преобразуется в дискретную последовательность значений с определенной частотой, проводится измерение (оцифровка) каждого значения этой последовательности и результат (усредненный или вся последовательность) выдается на цифровой индикатор (или экран). Современная техника умеет оцифровывать **напряжение** и **время**. Если необходимо измерить какую-либо физическую величину и увидеть результат на удобном цифровом индикаторе, то ее надо преобразовать в напряжение или время и оцифровать. Напряжение оцифровывают с использованием различных аналого-цифровых преобразователей – АЦП. Познакомиться с работой АЦП последовательного приближения можно в задаче № 35 практикума ВТЭК. На основе оцифровки напряжения работает большинство измерительных приборов. Преобразователи различных физических величин в напряжение называют **датчиками**. Классифицируют датчики по разным критериям, например:

- Датчики могут быть *цифровыми* и *аналоговыми*. Цифровые выдают только два значения: «0» и «1» или «есть сигнал» и «нет сигнала». На выходе аналогового датчика – изменяющееся напряжение, которое и оцифровывается, и пересчитывается в измеряемую величину.
- Датчики могут быть *параметрическими*: под действием измеряемой величины изменяется какой-либо электрический или магнитный параметр (сопротивление, электрическая емкость, магнитное поле, ...); и *генераторными*: измеряемая неэлектрическая величина преобразуется в зависимую от нее ЭДС (термоэлектрические, пьезоэлектрические и т.д.).
- С помощью датчиков измеряют различные физические величины: давление, температуру, освещенность, потоки газа или жидкости, перемещение и т.д. Соответственно, есть датчики *давления*, *перемещения* и т.д.

Познакомимся более подробно с температурными датчиками. Они широко используются не только для измерения температуры, но и для ее компенсации, для регулировки работы бытовой техники и в промышленности.

На информационном портале <http://temperatures.ru> [1] приведены основные типы датчиков температуры, вот некоторые из них:

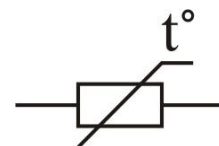
Термометры сопротивления.

Термисторы.

Диодные термометры.

Термопары.

Радиационные термометры (пирометры, тепловизоры).



Термометры сопротивления

Термометр сопротивления – это миниатюрная катушка из медного или платинового провода, упакованная в защитный кожух. Принцип его действия основан на том, что при увеличении температуры сопротивление металлического провода растет. Для металлов в большом интервале температур можно считать, что сопротивление линейно растет с ростом температуры:

$$R_t = R_{t_0} (1 + \alpha (t - t_0)),$$

где R_t и R_{t_0} – сопротивление металла при температурах t и t_0 соответственно;

$\alpha = \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta t}$ – **температурный коэффициент сопротивления (ТКС)**. Для платиновых термометров сопротивления $\alpha = 0,0039^\circ\text{C}^{-1}$, медных $\alpha = 0,0043^\circ\text{C}^{-1}$.

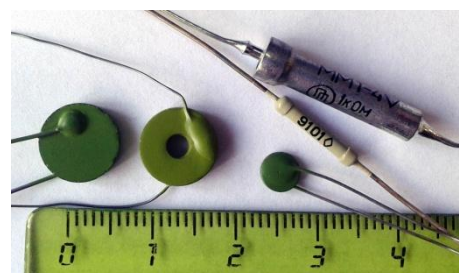
Промышленность выпускает термометры сопротивления с нулевым сопротивлением (так принято называть сопротивление при температуре 0°C) 50, 100, 500 и 1000 Ом. Маркируются термометры сопротивления по типу металла, используемому для измерения, и сопротивлению при 0°C , например: медные датчики ТСМ100 и платиновые ТСП100 и Pt100. Термометры сопротивления используют для измерения температур от -50 до 200°C .

К достоинствам термометров сопротивления следует отнести высокую точность измерений (величина погрешности до $0,1^\circ$). Однако для определения сопротивления датчика с высокой точностью необходимо использовать специальные схемы и приборы.

Еще одно их большое достоинство – линейная зависимость сопротивления от температуры. У платинового термометра сопротивления линейность лучше, удельное сопротивление выше, шире диапазон температур. Но он стоит дороже. Медь дешевле, но у нее низкое удельное сопротивление, что увеличивает габариты датчика.

Термисторы

У термисторов сопротивление тоже зависит от температуры, но эта зависимость существенно нелинейная.



Термисторы могут быть с **отрицательным** температурным коэффициентом **сопротивления** – с ростом температуры сопротивление уменьшается – это **NTC** (Negative Temperature Coefficient) термисторы, и с положительным

температурным коэффициентом – РТС. В данной задаче мы будем использовать NTC термисторы.

NTC термисторы изготавливают из оксидов металлов: марганца, железа, кобальта, никеля, меди, цинка. Оксиды измельчают в порошок, смешивают со связующим пластиком, прессуют и плавят. Сразу после изготовления термисторы подвергают старению, иначе их параметры сильно меняются во время эксплуатации. Материал, из которого изготовлен термистор, сохраняет свои свойства в пределах определенной (допустимой) температуры. При температурах, выходящих за эти пределы, могут произойти необратимые изменения, и датчик выйдет из строя.

В рабочем диапазоне температур зависимость сопротивления термистора от температуры можно описать формулой:

$$R_t = R_N \cdot e^{B\left(\frac{1}{t} - \frac{1}{t_N}\right)},$$

где R_t – сопротивление термистора при температуре t ;

R_N – сопротивление термистора при температуре t_N – номинальное значение сопротивления, дается производителем в одной точке (обычно 25°C), в этой же точке дается и допуск – возможное отклонение при изготовлении;

B – коэффициент, постоянный для данного термистора, определяется материалом датчика и характеризует зависимость $R(t)$ [2].

Одно из главных достоинств термисторов – большой ТКС: при комнатной температуре $\alpha R_t = \frac{\Delta R}{\Delta t}$ может быть от 1 до 10 Ом/°C; недостаток – сильная нелинейность зависимости сопротивления от температуры.

В настоящее время термисторы наиболее широко используются как датчики температуры в бытовой и промышленной технике. Некоторые области их использования:

- Бытовая электроника: холодильники и морозильники, посудомоечные машины, фены и т.д.
- Автомобильная электроника: для измерения температуры охлаждающей жидкости; для слежения за температурой выхлопных газов, крышки цилиндров, тормозной системы; для контроля температуры в салоне автомобиля, для индикации топлива.
- Телекоммуникации: для измерения и компенсации температуры в мобильных телефонах.
- Ограничение пускового тока во флуоресцентных, проекционных и галогеновых лампах, плавный пуск моторов и импульсных источников питания.
- Датчик уровня жидкости, измерение скорости потока и вакуума.

Примеры применения:

Датчик уровня жидкости. Когда по проводнику течет ток, он разогревается, и часть тепла уходит в окружающую среду. Сколько именно тепла будет потеряно на разогрев окружающей среды, зависит от самой среды (ее коэффициента рассеяния тепла): например, в воде разогретое тело остынет быстрее, чем в воздухе. Поэтому температура термистора, по которому протекает ток, зависит от среды, в которой он находится. Когда термистор погружается в жидкость, коэффициент рассеяния тепла возрастает, температура термистора снижается, его сопротивление и напряжение, приложенное к нему, возрастают. Так можно определить наличие или отсутствие жидкости.

Для измерения скорости потока и вакуума используют термистор, по которому протекает ток (так же, как и в предыдущем примере). Тогда поток воздуха, обдувающий термистор, будет снижать его температуру: чем быстрее поток, тем больше он охладит термистор – тем больше станет его сопротивление. Поэтому NTC термисторы используют для измерения скорости потоков газа (жидкости) и для измерения вакуума: в вакууме коэффициент рассеяния тепла тем меньше, чем выше вакуум.

Полупроводниковые датчики температуры

Температурная зависимость сопротивления наблюдается и у полупроводниковых материалов с р-п переходом. Падение напряжения на р-п переходе при протекании тока в прямом направлении будет меняться на единицы милливольт с изменением температуры на 1°C. Используя данную зависимость, можно измерить температуру в диапазоне примерно от –55 до 150 градусов. В качестве датчиков могут использоваться обычные диоды или один из р-п переходов транзистора. Полупроводниковый датчик температур часто встраивают в микросхему, которая сразу и оцифровывает сигнал.

Термопары

Термопара – это два проводника из разных материалов, сваренных в местах соединений – рис. 1а. Для изготовления термопар чаще всего применяют медь, железо, платину и некоторые сплавы: алюмель (95% Ni, остальное Al, Si, Mg), хромель (90% Ni, 10% Cr), платино-родий (90-70% Pt, 10-30% Rh), константан (примерно 60% Cu, 40% Ni, могут быть добавки Mg 1-2%), копель (56% Cu, 44% Ni). Термопары бывают разных типов в зависимости от пары металлов (обычно обозначают буквами – R, K, S и т.д.). Наибольшее распространение получили пары металлов хромель-алюмель (тип K), хромель-копель (тип L), платина-платинородий (тип S).

Рассмотрим принцип работы термопары. Работа выхода электронов в каждом из металлов различна, поэтому в месте соединения (спае) возникает контактная разность потенциалов. Работа выхода электронов, а, следовательно, и величина контактной разности потенциалов зависит от температуры спае. При одинаковой температуре обоих спаев контактные разности потенциалов одинаковы по абсолютной величине и противоположны по знаку – они компенсируют друг друга: ток по цепи не течёт. Но если нагреть один из спаев, в цепи появляется термо-ЭДС (рис. 1б). Термо-ЭДС в некотором диапазоне температур можно считать пропорциональной разности температур спаев T_1 и T_2 : $E_m = S (T_1 - T_2)$, где S – коэффициент Зеебека, или чувствительность термопары (Т. Зеебек – немецкий физик, открыл в 1821 году эффект термоэлектричества).

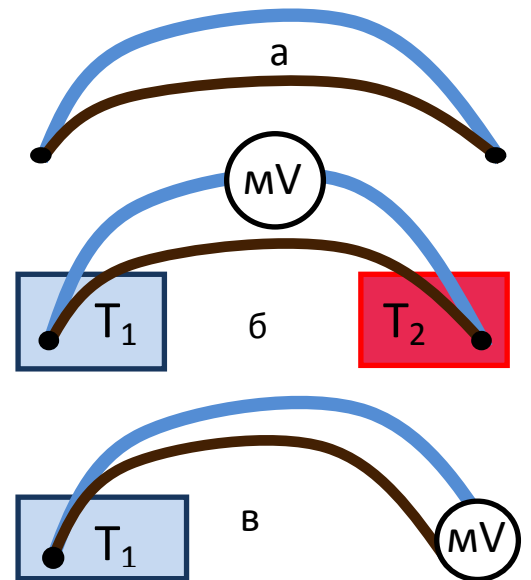


Рис. 1. Термопара.

На термопаре возникает термо-ЭДС, пропорциональная разности температур между спаями, поэтому для измерения абсолютного значения температуры одного из спаев важно знать температуру второго спае. Для этого второй спай можно погрузить в ячейку с известным веществом в состоянии фазового перехода. Можно взять ячейку с кипящей жидкостью (например, вода, жидкий азот) или с плавящимся чистым веществом (например, вода со льдом).

Когда не требуется большая точность измерения температуры, милливольтметр подключают в месте второго спае (рис. 1в) и измеряют разность между T_1 и температурой милливольтметра T_2 , обычно комнатной, которая определяется каким-либо другим датчиком, встроенным в милливольтметр, например, термистором.

Достоинства термопары: большой диапазон измеряемых температур: от -200° до $+1800^\circ\text{C}$; малые размеры датчика (следовательно, он быстро нагревается или охлаждается и время ожидания измерения мало); линейная зависимость термо-ЭДС от температуры (в большом диапазоне температур, порядка $100\text{--}300^\circ\text{C}$).

Недостатки: малая величина термо-ЭДС (единицы – десятки мкВ/ $^\circ\text{C}$, см. таблицу ниже). Поэтому для измерений необходимо использовать очень чувствительные вольтметры (что дорого) или усилители.

При производстве термопар необходим жесткий контроль используемых материалов для обеспечения фиксированных коэффициентов чувствительности. Это делает термопару достаточно дорогой. Требуется затрата и компенсации температуры второго спае.

При большом диапазоне измеряемых температур, требуется учитывать нелинейность термопар.

Некоторые характеристики термопар.

Материал положительного электрода	Материал отрицательного электрода	Рабочий диапазон температур, °C	Чувствительность, мкВ/°C
Железо <i>Fe</i>	Константан <i>Cu-Ni</i>	–200, +760	51-65
Хромель <i>Cr-Ni</i>	Алюмель <i>Ni-Al</i>	–200, +1300	35-42
Медь <i>Cu</i>	Константан <i>Cu-Ni</i>	–200, +400	40-60
Хромель <i>Cr-Ni</i>	Константан <i>Cu-Ni</i>	–200, +900	60-80
Платинородий <i>Pt-Rh</i> (10-30% <i>Rh</i>)	Платина <i>Pt</i>	0, +1800	5-14

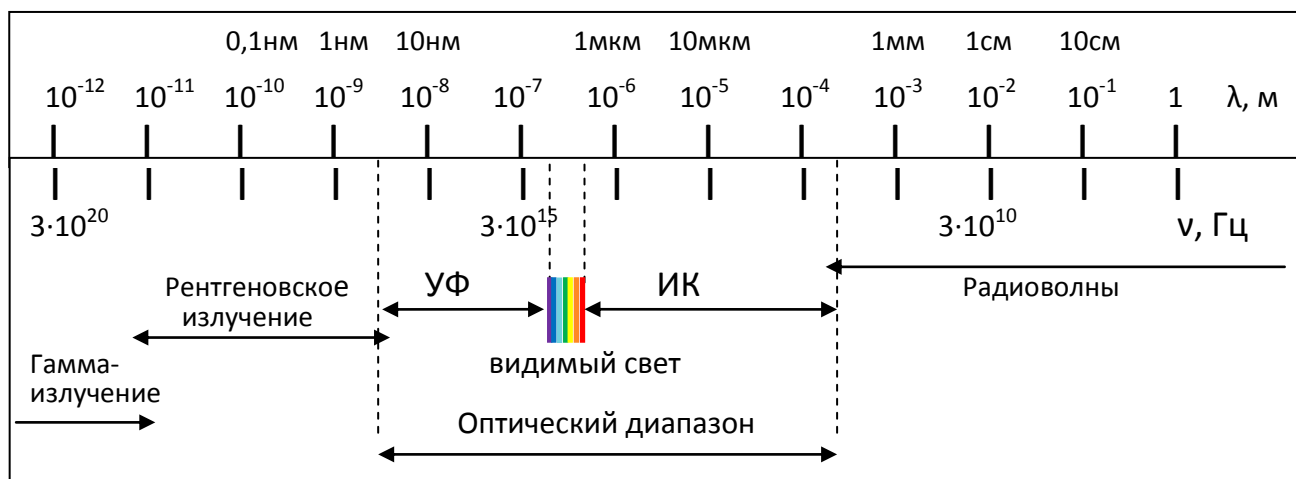
Пирометры

Существует два основных метода измерения температуры тел по излучению: оптический и радиационный.

Оптическая пирометрия основывается на зависимости цвета излучения сильно нагретого тела от температуры. Так, тела, нагретые до 700-800°C, испускают темно-оранжевое свечение, при температуре около 1000°C цвет становится ярко-оранжевым, при 2000° – ярко-желтым, а при 2500°C – практически белым.

Радиационная пирометрия использует зависимость интенсивности излучения в инфракрасном диапазоне нагретых тел от температуры. Измерительные приборы, использующие этот метод, называются *инфракрасными термометрами* или *инфракрасными пирометрами*. Все объекты, имеющие температуру выше абсолютного нуля ($0\text{ K} = -273^\circ\text{C}$), излучают электромагнитную энергию в инфракрасном (ИК) диапазоне – тепловую энергию. Человек способен чувствовать ИК (тепловое) излучение, например, тепло от солнца, от огня или наоборот, холод ото льда.

Инфракрасное излучение охватывает диапазон длин волн от 0,75 мкм до 150 мкм. Но для работы пирометров используется не весь этот спектр.



Максимум спектра излучения многих тел при температуре 36°C (нормальная температура тела человека) лежит на длине волны около 10 мкм. Этим обусловлен интерес к диапазону 7-14 мкм. Для измерения температуры сильно нагретых сред используется диапазон 3-5 мкм.

Принцип, на котором основывается радиационная пирометрия: тепловое (ИК) излучение фокусируется оптической системой (ИК-линза – специальная линза, прозрачная для ИК излучения в выбранном диапазоне, но непрозрачная для видимого света) на температурный датчик, обычно из полупроводниковых материалов, которые выделяют в специальную группу – для радиационных измерений. Датчик преобразует тепловую энергию в электрический сигнал. Получившийся на выходе датчика сигнал обрабатывается, а результат отображается на дисплее. Пирометр отображает результат в цифровом виде. На тепловизоре мы получаем результаты измерения в виде цветной графической картинки, на которой цвет каждой точки соответствует ее температуре.

Основное преимущество пирометров – возможность определять температуру на некотором расстоянии от объекта измерения. Это дает возможность работать в условиях, когда применение контактного термометра невозможно из-за высоких температур или в труднодоступных местах. Вот некоторые области, где используются пирометры:

- Теплоэнергетика: пирометры применяются для температурного контроля теплотрасс, определения мест нарушения теплоизоляции, прохождения теплотрассы, для проверки качества теплоизоляции помещений.
- Строительство: определяют теплопотери в зданиях.
- Металлургия и машиностроение: для контроля над металлургическими процессами — ковке, прессовке, правке и пр.
- Наука: при проведении лабораторных исследований активных веществ в агрессивных средах, а также в тех случаях, когда контактный способ измерения температуры может нарушить чистоту эксперимента.

Пирометр измеряет среднюю температуру поверхности объекта. По форме пятно измерения – это эллипс или окружность (рис.2). Чем дальше от пирометра находится объект измерения, тем больше площадь пятна, среднюю температуру которого показывает пирометр. Встроенный в прибор лазерный указатель помогает "нацелить" прибор в центр пятна измерения.

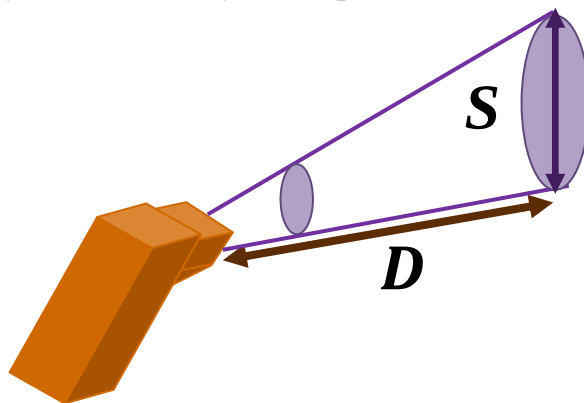


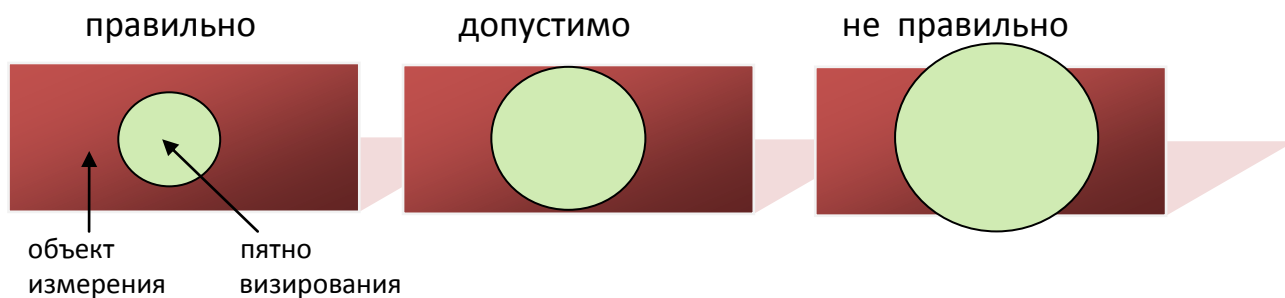
Рис. 2. Определение размера области поверхности при измерении пирометром.

Основные технические характеристики пирометра.

Оптическое разрешение D:S (другое название - **показатель визирования**) – это отношение расстояния до объекта к размеру измеряемого участка поверхности объекта. Например, параметр D:S = 8:1. Это означает, что на расстоянии в 16 см диаметр пятна измерения составит около 2 см, на расстоянии 1 метра до объекта – 12,5 см и т.д. (рис.2).

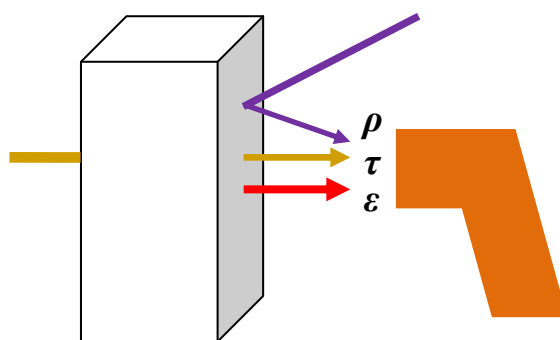
Диапазон рабочих расстояний у пирометра – это расстояние до объекта измерения, на котором пирометр показывает температуру с заявленной точностью. Обычно в пирометрах это расстояние от 0,15 до 5 м. При больших или меньших расстояниях пирометр тоже работоспособен, но точность измерения температуры при этом падает.

Точность измерения не зависит от расстояния до объекта в пределах диапазона рабочих расстояний до тех пор, пока диаметр измеряемого пятна меньше размера объекта. *Если же диаметр пятна становится больше, прибор начинает принимать излучение от других объектов, и это оказывает значительное влияние на результаты измерения.*



Коэффициент излучения.

Если инфракрасный термометр направить на некоторый объект, то не все излучение, регистрируемое пирометром, будет нести информацию о температуре изучаемого объекта. Прибор измерит не только излучение, выделяемое непосредственно интересующим нас телом, но и прошедшее ИК-излучение, исходящее от других объектов, а также отраженное излучение.



Коэффициент излучения ε – характеризует способность материала излучать энергию в ИК-диапазоне. Максимальное значение $\varepsilon = 1$ соответствует модели абсолютно черного тела: тело поглощает и излучает все попавшее на него электромагнитное излучение без потерь. На практике $\varepsilon < 1$ и его значение для конкретного материала будет зависеть от свойств поверхности и от температуры измеряемого объекта. Но для многих материалов можно считать, что коэффициент излучения не зависит от температуры, например, ПВХ, бетон, органические вещества.

Коэффициент отражения ρ равен отношению отраженного ИК потока к падающему. В общем случае значение ρ также будет зависеть от структуры поверхности и температуры тела. Как правило, тела с блестящими, гладкими, отполированными поверхностями имеют более высокий коэффициент отражения, чем матовые или шероховатые для одного и того же материала.

Коэффициент пропускания τ характеризует способность материала пропускать через себя инфракрасное излучение. τ зависит от типа материала и толщины объекта, однако большая часть материалов являются непрозрачными для инфракрасного излучения. Например, стекло, прозрачное для излучения, лежащего в видимом диапазоне, непрозрачно для ИК-излучения.

Сумма всех трех коэффициентов всегда будет равна единице. На практике обычно можно считать $\tau = 0$ и остается $\varepsilon + \rho = 1$. Это значит, что не все ИК-излучение, попавшее в объектив пирометра, несет информацию о температуре интересующего нас объекта, и чтобы определить температуру тела с помощью пирометра, надо знать коэффициент излучения нашего объекта. Для этого можно:

- *Использовать справочные данные.* Существуют специальные таблицы для определения коэффициентов излучения для наиболее распространенных материалов, с указанием температуры и некоторых особенностей поверхности материала (например, для железа при комнатной температуре коэффициент излучения $\varepsilon \approx 0.70$ для окисленного материала и 0.24 для отшлифованного). Однако реальные физические объекты обычно сильно отличаются от «табличных»: на поверхности могут быть царапины, а материал содержать некоторые примеси. Поэтому табличные значения являются скорее вспомогательными и корректируются, чтобы учесть коэффициент излучения поверхности именно вашего объекта. Табличные данные можно использовать в случае, когда нам не важна большая точность измерений (например, если нужно обнаружить поврежденный участок кабеля или утечку тепла, в данном случае нам будут важны относительные значения температур).

Таблица коэффициентов излучения.

Материал	Значение	Материал	Значение
Алюминий	0,30	Стекло	0,85
Асфальт	0,95	Железо	0,70
Латунь	0,50	Свинец	0,50
Керамика	0,95	Масло	0,94
Бетон	0,95	Краска	0,93
Медь	0,60	Пластмасса	0,95
Сталь	0,80	Вода	0,93
Дерево	0,94	Песок	0,90

- *Определить коэффициент излучения путем эталонного измерения. Это можно осуществить несколькими способами.*
 - ❖ Мы можем скорректировать коэффициент излучения измеряемого объекта, используя в качестве контроля какой-либо другой термометр: одна и та же температура, измеряется двумя разными методами. (Этот способ не подходит, если использование контактного термометра не представляется возможным, например, когда объект измерения слишком нагрет.)
 - ❖ Другой способ определить неизвестное значение коэффициента излучения – использование «эталонного» покрытия. Если на исследуемый объект наклеить тонкую пленку, коэффициент излучения поверхности которой известен, и измерить температуру тела для покрытой пленкой области (через некоторый промежуток времени температура пленки станет такой же, как и у исследуемого тела), мы получим «эталонное» значение температуры. Скорректируем значение ϵ , чтобы данные измерений пирометра непосредственно с поверхности объекта измерения совпали с «эталонным» значением температуры. Вместо пленки можно нанести на измеряемый объект покрытие или краску с известным коэффициентом излучения.

В некоторых пирометрах значение коэффициента излучения можно выставить на приборе, в других пирометрах это значение фиксировано и составляет 0,95.

На измерения пирометром влияют условия проведения эксперимента.

- *Излучение нагретых тел, находящихся по соседству могут исказить результат измерений. Чтобы избежать ошибок, следует перед началом измерения убрать или отгородить возможные источники помех. Свет не оказывает воздействия на измерения. Однако некоторые источники света могут испускать не только видимый свет, но и инфракрасное тепловое излучение, и влиять на температуру объектов, расположенных поблизости (например, лампы накаливания).*
- *Наличие на поверхности объекта измерения или в воздушной среде различных инородных веществ. Вода или какие-либо загрязнения на поверхности обладают различными коэффициентами излучения, а испарение с поверхности тела уменьшает его температуру.*
- *Цвет объекта не влияет на его температуру.*

Возможные источники ошибок при проведении измерений с помощью пирометра:

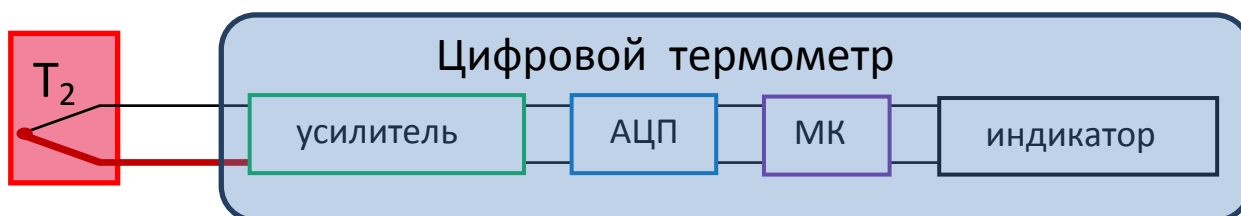
- *Неправильная установка коэффициента излучения. Отсутствие достаточных сведений об объекте измерений может привести к неверной установке коэффициента излучения. Если коэффициент излучения исследуемого объекта мал ($\epsilon < 0,6$, например, на металлических поверхностях), определить температуру пирометром сложно.*

- Слишком большое или слишком маленькое расстояние до объекта измерений (учитывайте оптическое разрешение вашего прибора).
- Помехи «на пути» инфракрасного излучения (например, стекло).
- Воздействие внешних источников излучения (не забывайте, что вы сами также являетесь источником инфракрасного излучения).
- Резкая смена температуры окружающей среды, сквозняки в помещении, где проводятся измерения.

Выполнение эксперимента.

Упражнение 1. Измерение температуры с помощью термопары.

Измерение температуры цифровым термометром при помощи термопары можно провести по следующей схеме:



термо-ЭДС с термопары после усиления оцифровывается аналого-цифровым преобразователем (АЦП), микроконтроллер (МК) пересчитывает напряжение в температуру (с учетом чувствительности термопары и коэффициента усиления) и выводит полученный результат на цифровой индикатор.

Из-за разброса параметров деталей основная составляющая приборной погрешности будет систематическая (в партии выпущенных одинаковых приборов будут и более точные и более грубые приборы, но погрешность не должна превышать указанную в паспорте). Перед началом работы с любым прибором надо оценить приборную погрешность и, если возможно, рассчитать поправку или провести корректировку (при достаточной квалификации можно скорректировать параметры схемы: в схеме прибора часто бывают подстраиваемые резисторы или другие элементы). Такую проверку проводят или измеряя *эталонную величину* (известную с достаточной точностью и стабильную во времени), или сверяя показания измерений с *эталонным прибором*.

Цель данного упражнения: оценить поправку к показаниям прибора (термопарного термометра) – и учесть ее как поправку к результату. Для этого надо сравнить результаты измерений, выполненные тестируемым прибором, с показаниями эталонного прибора.

Упражнение выполняется всеми студентами коллективно под руководством преподавателя.

Дома подготовьте таблицу для записи результатов измерений. Каждый студент на занятии выполняет измерения выданным ему прибором – мультиметром с термопарой (на котором проставлен номер N), записывает результаты в строку с номером своего прибора, выделив ее. После проведенных измерений в таблицу заносят результаты измерений, проведенных всеми студентами, максимально их может быть 9 (левая часть таблицы №1 у всех студентов, выполняющих задачу в одной смене, должна быть заполнена одинаково).

Таблица № 1.

Сравнение показаний мультиметров при измерении температуры.
Эталонный термометр (его приборная погрешность $\Delta t_{\text{э}} = \dots\dots\dots$).

№ прибора	$t_{\text{к}}, ^\circ\text{C}$	$t_0, ^\circ\text{C}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{Nк}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{N0}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{N1}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{N2}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{Nсист}}, ^\circ\text{C}$
«Эталон»					—	—	—	—	—
1									
2									
...									
9									
$\Delta\text{приб.}$									

Практическая работа.

1. Записать в заголовок таблицы тип выданного Вам прибора (мультиметра с термопарой) и термометра, используемого в данном упражнении как эталонный и его приборную погрешность. «Эталонный» термометр находится у преподавателя.
2. Записать комнатную температуру по термометру, который используется в данном упражнении как эталонный, в строку «эталон», столбец $t_{\text{к}}$.
3. Проверить, что переключатель рода работы мультиметра стоит в режиме измерения температуры ($^\circ\text{C}$), а термопара вставлена во входные гнезда мультиметра «Т–» – черный штекер и «Т+» – красный штекер. *Во время выполнения всей работы термопару не отсоединять от мультиметра.* Включить прибор, термопара должна показать комнатную температуру. Записать показания со своего мультиметра (на нем проставлен номер N), в строку таблицы с соответствующим номером, выделить ее.
4. Преподаватель помещает все термопары и «эталонный» термометр в стакан с холодной водой (если в стакане есть лед, то его должно быть совсем немного, чтобы термопары не касались льда). Подождать примерно 1–2 минуты, чтобы термометры приняли температуру окружающей их среды, записать показания со своего мультиметра и «эталонного» термометра в столбец t_0 .

5. Преподаватель помещает все термопары и «эталонный» термометр во второй стакан, с горячей водой. Подождать примерно 1–2 минуты, записать показания со своего мультиметра и «эталонного» термометра в столбец t_1 .
6. Преподаватель добавляет в стакан с горячей водой немного холодной воды, перемешивает. Подождать примерно 1–2 минуты, записать показания со своего мультиметра и «эталонного» термометра в столбец t_2 .
7. После проведенных измерений надо:
 - выключить мультиметр;
 - записать в таблицу показания со всех мультиметров;
 - оценить приборную погрешность мультиметра при измерении разных температур по паспорту прибора. Поскольку все мультиметры однотипные, погрешности всех приборов, рассчитанные по формуле, приведенной в описании прибора (оно находится на рабочем месте), будут одинаковые.

Обработка результатов.

Рассчитать и записать в таблицу разницу показаний между эталонным термометром $t_{\text{Э}}$ и каждым мультиметром t_N (N – номер мультиметра) для каждой температуры

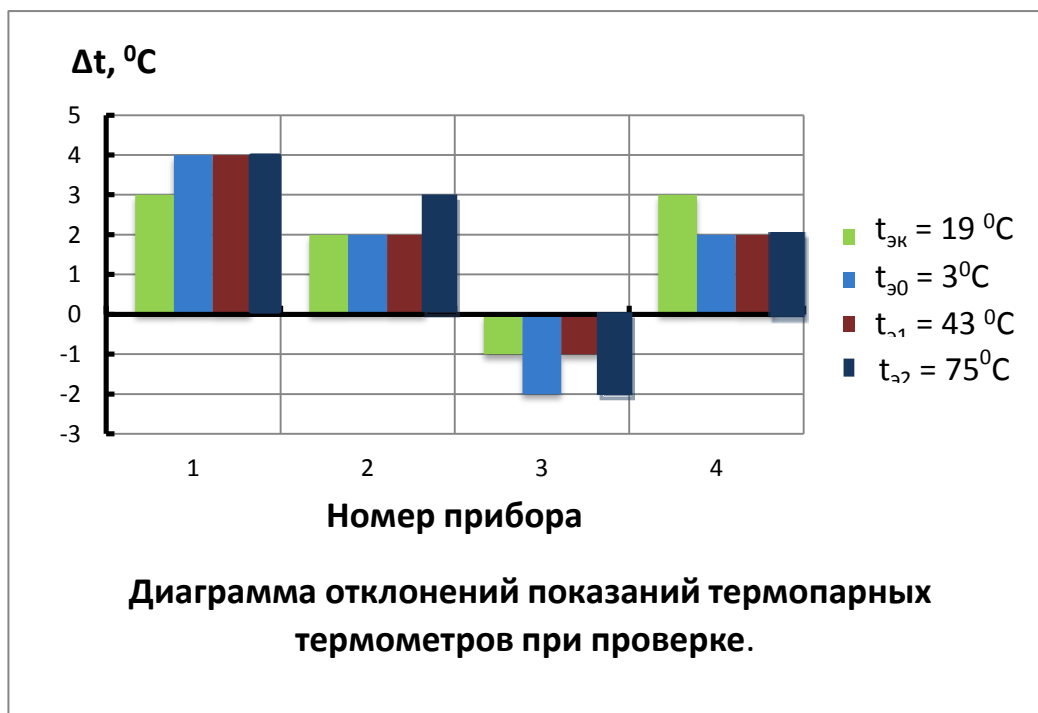
$$\Delta t_{Nk} = t_{\text{Э}k} - t_{Nk}$$

$$\Delta t_{N0} = t_{\text{Э}0} - t_{N0}$$

$$\Delta t_{N1} = t_{\text{Э}1} - t_{N1}$$

$$\Delta t_{N2} = t_{\text{Э}2} - t_{N2}.$$

Построить диаграмму отклонений показаний для каждого мультиметра для каждой температуры (см. пример).



Оценить поправку к результатам выданного Вам мультиметра как

$$\Delta t_{Nn} = 1/4 (\Delta t_{N0} + \Delta t_{Nk} + \Delta t_{N1} + \Delta t_{N2}),$$

считать ее одинаковой для всего диапазона температур.

Как итог упражнения записать:

1. поправку измерения температуры для выданного Вам мультиметра,
2. температуру комнатную, холодной, теплой и горячей воды для выданного Вам мультиметра с поправкой и погрешностью (приборной).

Сделать вывод о правилах проверки приборов перед началом работы.

Упражнение 2. Температурная характеристика термистора.

Цель данного упражнения: познакомиться с операцией градуировки приборов; построить график для определения температуры по сопротивлению термистора, оценить погрешность предложенного метода градуировки.

Любой измерительный прибор должен быть **проградуирован** (например, на измерительную линейку наносят сантиметровые и миллиметровые деления). Для этого прибор или сравнивают с эталонным, или рассчитывают величину показаний (например, зная напряжение источника питания и имея набор известных сопротивлений, можно рассчитать силу тока).

Измерив сопротивление термистора при некоторых известных температурах и построив график зависимости $R(t)$, мы практически проградуируем наш термистор. В дальнейшем, измерив сопротивление термистора, мы сможем по графику определить температуру среды, в которую он помещен.

В данном упражнении надо снять зависимость сопротивления термистора от температуры и построить график этой зависимости. В качестве «эталонного прибора» для градуировки термистора мы будем использовать подключенную к мультиметру термопару из упражнения 1.

На рис. 3 приведена схема установки. Перед нагревательным элементом помещены датчики температуры. Термопару надо аккуратно прикрепить к корпусу термистора, чтобы проводить

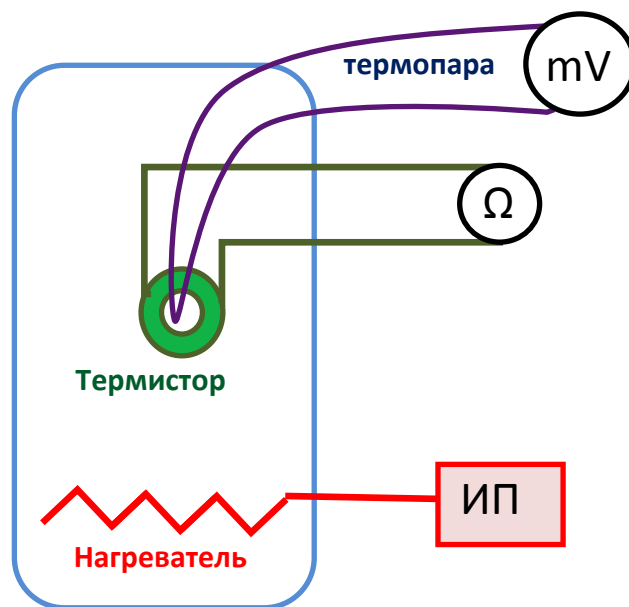


Рис. 3. Схема установки для градуировки термистора.

измерения температуры примерно в одной точке пространства.

Все температурные датчики измеряют свою собственную температуру. Поместив термометр в нагретую среду, необходимо подождать, пока термометр нагреется, и его показания перестанут изменяться. Термопара (место спая) нагревается быстрее термистора, и, если нагревание проводить довольно быстро, то температура термистора будет ниже температуры термопары. Для качественной градуировки необходимо дожидаться состояния термодинамического равновесия (чтобы все тела в системе имели одинаковую температуру). Например, меняя напряжение питания нагревателя, ждать установления температуры (в данном эксперименте достаточно, чтобы температура не изменялась в течении 4 - 5 минут). Для учебной задачи, ограниченной во времени, мы этого делать не будем, но проведем измерения при нагревании и остывании. Сравнивая полученные результаты можно сделать вывод о систематической погрешности метода.

Практическая работа.

1. Собрать установку по схеме рис.3:

- Термистор уже закреплен перед нагревателем, подключить его (для измерения сопротивления) к мультиметру M9803R (рис.4) к клеммам для измерения сопротивления (COM и Ω). Включить прибор M9803R, поставив переключатель рода работы прибора в режим измерения сопротивлений Ω . Вписать в название таблицы номер термистора, с которым проводите эксперимент.



Рис.4.
Внешний вид
мультиметра
M9803R

переключатель
рода работ
режим измерения
сопротивлений Ω

клеммы для
измерения
сопротивления:
COM и Ω

- Аккуратно закрепить термопару рядом с термистором перед нагревателем. Термопара должна быть подключена к мультиметру, позволяющему измерять температуру (так же как в упр.1).
2. Включить мультиметр с термопарой для измерения температуры. Измерить и записать в таблицу № 2 температуру и сопротивление термистора при комнатной температуре («0» время).
 3. Включить нагреватель и каждую минуту записывать сопротивление термистора (R) и температуру $t_{\text{мульт}}$, которую показывает Ваш мультиметр, в таблицу № 2. В столбец « t » записать температуру с поправкой, вычисленной в первом упражнении.
 4. Нагревание проводить примерно до 70 градусов или до установившейся температуры (температура не изменяется 3–4 минуты). Это займет примерно 20 минут. После этого надо выключить нагреватель и продолжать фиксировать показания еще в течение 10 мин (без прерыва, не прерывая отсчет времени).
 5. Завершив измерения, выключить оба мультиметра.

Таблица № 2. Температурная характеристика термистора №... .

№	Время, мин	Нагревание				
		R , Ом	ΔR , Ом		$t_{\text{мульт}}$, °C	t , °C
	0					
	1					
	...					
Нагреватель выключен – охлаждение						
	...					

Обработка результатов.

Оценить приборную погрешность измерения температуры мультиметром с термопарой (см. упр. 1).

Для оценки приборной погрешности сопротивления для мультиметра М9803R формула приведена в описании прибора. Приборные погрешности должны быть определены во время занятия.

Построить график зависимости сопротивления термистора от температуры $R(t)$. На одном графике должны быть представлены зависимости $R(t)$ и при нагревании и при охлаждении.

Выбрать 5 – 7 значений температур, определить по графику сопротивления термистора при нагревании и охлаждении. Записать в таблицу № 3.

Для каждой температуры рассчитать среднее значение сопротивления при нагревании и охлаждении.

$$\langle R(t) \rangle = 0,5(R_{\text{ох}}(t) + R_{\text{наг}}(t)).$$

Таблица № 3. Расчет среднего значения сопротивления термистора при градуировке.

N	t, °C	R _{ох} , Ом	R _{наг} , Ом	⟨R(t)⟩, Ом	ΔR, Ом
1					
...					

Оценить разность сопротивлений термистора $\Delta R = 0,5(R_{\text{ох}}(t_n) - R_{\text{наг}}(t_n))$.

Построить на графике $R(t)$ зависимость $\langle R(t) \rangle$. Оценить систематическую **погрешность метода** как максимальную разность значений сопротивления термистора при фиксированной температуре.

Сделать вывод, можно ли использовать метод быстрой градуировки для последующих измерений температуры с высокой точностью.

Упражнение 3. Измерение температуры колб лампы накаливания и светодиодной лампы и измерение освещенности от этих же ламп.

Цель данного упражнения: получить навыки работы с приборами: инфракрасным термометром (пирометром) и люксметром; определить и сравнить температуры поверхностей горящих ламп: накаливания и светодиодной. Сравнить освещенность от этих ламп.

В данной работе используются инфракрасные термометры с оптическим лазерным прицелом, что облегчает определение рабочей области пирометра. **При работе с лазером избегайте попадания лазерного излучения в глаза, будьте внимательны при измерениях на отражающих поверхностях.** Руководство для работы с прибором находится на рабочем месте.

Для измерения освещенности используется цифровой прибор, с выносным фотодатчиком (солнечной батареей, которая преобразует свет в видимом диапазоне в ЭДС).

Практическая работа.

В пирометре имеется лазерный указатель. Направлять его в этом упражнении можно только в стену и в пол. По правилам техники безопасности категорически запрещено направлять его в сторону аудитории, где работают студенты. Поэтому это упражнение выполняется в специально отведенном месте.

1. Ознакомиться с прибором по описанию, которое находится на рабочем месте. Проверить, какие единицы измерения температуры выставлены в

настройках. Проверить, что коэффициент излучения $\varepsilon=0,95$ (заводская установка).

2. Еще раз измерить комнатную температуру термопарным термометром (с учетом поправки, аналогично 1 упр.). Записать ее значение в заголовке таблицы № 4.
3. Измерить температуру стены и пола, располагая пирометр на разных расстояниях от объекта (расстояния допустимо соблюдать с точностью до 10%). Записать в таблицу № 4.

Таблица № 4. Температура t ($^{\circ}\text{C}$), измеренная пирометром на разных объектах, на разных расстояниях, $\varepsilon=0,95$. $t_k = \dots$

Объект / расстояние	0,2 м	0,5 м	1 м	$\langle t \rangle$, $^{\circ}\text{C}$
Стена (краска)				
Пол (дерево)				

Сравнить полученное с помощью пирометра значение температуры с комнатной.

4. Для третьего упражнения лампы расположены отдельно у стены. Диаметр колб ламп, используемых в работе примерно 5 см. Рассчитать, на каком максимальном расстоянии можно проводить измерение температуры, чтобы размер измеряемого пятна поверхности был не больше 4 см (см. стр.8, оптическое разрешение D:S). Выбрать расстояние r (от 15 см до максимально возможного), на котором будете проводить измерения, записать в заглавие таблицы № 5.
5. С помощью пирометра измерить (три раза) температуру лампы накаливания, **когда она выключена** для $\varepsilon=0,95$ для выбранного вами расстояния до ламп, записать в таблицу №5.
6. Выставить на пирометре коэффициент излучения $\varepsilon=0,85$, провести измерения, аналогичные п.5. Провести аналогичные измерения для $\varepsilon=0,7$. Результаты измерений записать в таблицу №5.
7. Включить лампу накаливания. Дать ей прогреться 5 – 7 минут. Провести измерение температуры с коэффициентом излучения $\varepsilon=0,95$ на выбранном Вами расстоянии не менее трех раз, записать в таблицу №5. Провести аналогичные измерения с коэффициентами излучения $\varepsilon=0,85$ и $\varepsilon=0,7$.
8. Ознакомиться с инструкцией по работе с измерителем освещенности (на рабочем месте). Включить прибор, снять защитную крышку с фотодатчика, навести молочно-белую линзу фотозлемента на источник света, для которого будет проводиться измерение. При этом на ЖК-дисплее будут отображаться результаты измерения освещенности. Важно, что освещенность надо сравнивать на одинаковых расстояниях от ламп. Измерить освещенность на расстояниях 30, 40 и 50 см от лампы (по три раза). Результаты записать в таблицу № 6.

9. Выключить лампу.
10. Измерить фоновую засветку помещения. Для этого провести измерения, аналогичные п.8, но с выключенной лампой (на тех же расстояниях, наводя молочно-белую линзу фотоэлемента на выключенный источник света).
11. Аналогичным образом (п.7-10) определить температуру и освещенность для светодиодной лампы.

Таблица № 5. Температура ($^{\circ}\text{C}$), измеренная пирометром на расстоянии $r = \dots$ см на разных лампах. $t_k = \dots$

объект	ε	$T_0, ^{\circ}\text{C}$ (холодная лампа)				$T, ^{\circ}\text{C}$ (горячая лампа)			
		1	2	3	$\langle T_0 \rangle \pm \Delta T_{\text{общ0}}$	1	2	3	$\langle T \rangle \pm \Delta T_{\text{общ}}$
Лампа накаливания	0,95								
	0,85								
	0,7								
Светодиодная лампа	0,95	—	—	—	—				
	0,85	—	—	—					
	0,7	—	—	—					

Таблица № 6. Измерение освещенности от различных источников света.

объект	r , см	σ , лк								
		1	2	3	$\langle \sigma \rangle$	$\Delta \sigma_{\text{приб}}$	$\Delta \sigma$	$\Delta \sigma_{\text{общ}}$	Σ	$\Delta \Sigma$
Лампа накаливания										
Светодиодная лампа										
Фоновая засветка									—	

Обработка результатов.

1. Рассчитать среднюю температуру холодной и горящих ламп для всех коэффициентов излучения.
2. Оценить погрешность температур ламп для коэффициента излучения для стекла (из таблицы с.9). Оценить приборную погрешность $\Delta T_{\text{пр}}$ для каждой температуры (из паспорта прибора), погрешность среднего арифметического ΔT и $\Delta T_{\text{общ}} = \sqrt{\Delta T^2 + \Delta T_{\text{приб}}^2}$.

$$\Delta T_{\text{общ}} = \sqrt{\Delta T^2 + \Delta T_{\text{приб}}^2}.$$

3. Рассчитать среднее значение освещенности от ламп (и от фоновой засветки) на каждом расстоянии, оценить приборную погрешность (из паспорта прибора), погрешность среднего арифметического $\Delta \sigma$ и $\Delta \sigma_{\text{общ}}$

$$= \sqrt{\Delta \sigma^2 + \Delta \sigma_{\text{приб}}^2}.$$

4. Рассчитать освещенность от ламп с поправкой на фоновую засветку $\Sigma = \langle \sigma_{\text{лампы}} \rangle - \langle \sigma_{\text{засветка}} \rangle$. Оценить погрешность этого расчета $\Delta \Sigma$.

Как итог упражнения записать:

1. Температуры горящих светодиодной лампы и лампы накаливания (с погрешностями).
2. Освещенность от горящих светодиодной лампы и лампы накаливания (с погрешностями).

В выводе по данному упражнению написать:

Отличаются ли температуры горячих и холодных ламп, измеренные для разных коэффициентов излучения? Почему?

Зависят ли измеренные в упражнении температуры от расстояния, на которых проводились измерения? Почему?

Зависит ли освещенность от ламп от расстояния, на котором проводится измерение? Почему?

Сделать вывод об эффективности работы ламп по освещению.

Литература:

1. <http://temperatures.ru>
2. <http://electricalschool.info/spravochnik/izmeren/877-jelektricheskie-izmerenija.html>
3. Митин И.В., Русаков В.С. Анализ и обработка экспериментальных данных. Москва. Ф.ф. МГУ, 2014 г.
4. Руководство пользователя testo <http://www.teplomer.biz/stat/princip-raboty-ustroistvo-i-osnovnye-harakteristiki-infrakrasnogo-pirometra.php>