

Министерство образования и науки Российской Федерации
Сибирский федеральный университет

Теория теплофизических свойств веществ

Учебно-методическое пособие
для лабораторных и самостоятельных работ

Электронное издание

Красноярск
СФУ
2013

УДК 536(07)
ББК 22.361.5я73
Т338

Составители: Флеров Игорь Николаевич, Горев Михаил Васильевич,
Фокина Валентина Дмитриевна, Погорельцев Евгений Ильич

Т338 Теория теплофизических свойств веществ: учебно-методическое пособие для лабораторных и самостоятельных работ [Электронный ресурс] / сост. И.Н. Флёрв, М.В. Горев, В.Д. Фокина, Е.И. Погорельцев. – Электрон. дан. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2013. – Систем. требования: PC не ниже класса Pentium I; 128 Mb RAM; Windows 98/XP/7; Adobe Reader V8.0 и выше. – Загл. с экрана.

В учебно-методическом пособии изложен теоретический материал и руководства к выполнению лабораторных работ по исследованию различных равновесных теплофизических свойств твердых тел. В рамках выполнения лабораторных работ осваиваются методы измерения термических физических величин (температура, удельный объем, коэффициент теплового расширения). Приведены требования к самостоятельной работе студентов, вопросы для подготовки к выполнению и защите лабораторных работ.

Настоящее учебно-методическое пособие содержит цикл лабораторных работ, включенных в специальный практикум для студентов, обучающихся по направлению 140700.62 «Ядерная энергетика и теплофизика», профилю подготовки 140700.62.02 «Теплофизика». Тематика лабораторных работ соответствует специальному курсу «Теория теплофизических свойств веществ».

УДК 536(07)
ББК 22.361.5я73
© Сибирский
федеральный
университет, 2013

Учебное издание

Подготовлено к публикации ИЦ БИК СФУ
Подписано в свет 20.03.2013 г. Заказ 385.
Тиражируется на машиночитаемых носителях.

Издательский центр
Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79
Тел/факс (391)206-21-49. E-mail rio@sfu-kras.ru
<http://rio.sfu-kras.ru>

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Главной целью настоящего цикла лабораторных работ является предоставление студентам возможности ознакомиться с устройством и принципом действия экспериментальных установок и освоить методики определения некоторых термодинамических свойств, сведения о которых крайне необходимы в инженерной практике. В связи с этим руководство к каждой лабораторной работе содержит как описание самого свойства, так и исследовательской установки.

Указания включают в себя описание 4 лабораторных работ, посвященных изучению и освоению методов практического определения таких термодинамических свойств как температура, коэффициент линейного теплового расширения, удельный объем. Все работы выполняются на установках, используемых в ИФ СО РАН для научных исследований.

Выполнение цикла лабораторных работ предполагает самостоятельный характер участия студентов в небольшом научном исследовании.

ТЕМПЕРАТУРА. ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ШКАЛЫ

Температура

Температура – физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы. Если изолированная система не находится в равновесии, то с течением времени переход энергии (теплопередача) от более нагретых частей системы к менее нагретым приводит к выравниванию температуры во всей системе (нулевое начало термодинамики).

С молекулярно-кинетической точки зрения температура равновесной системы характеризует интенсивность теплового движения атомов, молекул и других частиц, образующих систему.

В общем случае температура определяется как производная от энергии тела в целом по его энтропии

$$dU = TdS - pdV, \quad (1)$$

$$dH = TdS + Vdp. \quad (2)$$

Определяемая таким образом температура всегда положительная величина, так как кинетическая энергия положительна, и называется абсолютной температурой или термодинамической температурой.

Температура – один из важнейших термодинамических параметров, так как ни одно теплофизическое исследование не может быть произведено без измерения температуры с той или иной точностью.

Температурные шкалы

Температура, относящаяся к категории интенсивных термодинамических величин, требует для своего измерения наличия не только единицы, но и шкалы, по которой отсчитывается значение измеряемого уровня. Единица измерения определяет масштаб шкалы.

Температура не поддается прямому измерению, и всякий прибор, предназначенный для ее измерения, преобразует температуру в другую, легко измеряемую физическую величину, используя однозначную связь с температурой выбранного физического (термометрического) свойства вещества.

Под термином **температурная шкала** принято понимать непрерывную совокупность чисел, линейно связанных с числовыми значениями какого-либо удобно и достаточно точно измеряемого физического свойства, представляющего собой однозначную и монотонную функцию температуры. Принцип построения температурной шкалы заключается в том, что выбирают

какие-либо две основные (опорные) точки, представляющие собой легко воспроизводимые температуры, например температуры кипения и затвердевания чистых веществ. Этим температурам приписывают произвольные числовые значения t_1 и t_2 . Температурный диапазон $t_1 - t_2$ часто называют основным диапазоном температурной шкалы. Его делят на некоторое целое число N равных частей и $1/N$ часть принимают за единицу измерения температуры или за *масштаб шкалы*, экстраполируемой в одну или обе стороны от основного диапазона.

Далее выбирают термометрическое свойство E и условно принимают его линейно связанным с температурой, то есть полагают справедливым равенство

$$dt = k dE, \quad (3)$$

где k – коэффициент пропорциональности. Интегрирование (3) дает

$$t = kE + C. \quad (4)$$

Для определения постоянных k и C используют две выбранные выше температуры t_1 и t_2 , для которых экспериментально находят соответствующие значения E_1 и E_2 . Тогда вместо (4) будем иметь

$$t = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{E_2 - E_1} (E - E_1). \quad (5)$$

Последнее выражение получило название уравнения температурной шкалы. С помощью уравнения (5) (при условии, что допущение о справедливости (3) остается правомерным) по измеренному значению E рассчитывается само значение температуры t .

Исследования показывают, что в природе не существует физических свойств, линейно связанных с температурой. Коэффициент k в (3) для любого термометрического свойства сам является функцией температуры, причем для разных свойств вид этой функциональной зависимости различен. Из этого следует, что описанным методом можно построить столько шкал, сколько выбрано термометрических свойств. Совпадая в основных точках t_1 и t_2 , эти шкалы давали расходящиеся значения температур как внутри диапазона t_1 и t_2 , так и за его пределами.

В простейшем случае температурные шкалы различаются значениями t_1 и t_2 , принятыми для одинаковых физических состояний. Так, в шкалах Цельсия $t^\circ\text{C}$, Реомюра $t^\circ\text{R}$ и Фаренгейта $t^\circ\text{F}$ точкам плавления льда и кипения воды при нормальном давлении соответствуют разные значения температуры.

Соотношение для пересчета температуры из одной шкалы в другую выглядит следующим образом

$$t^{\circ}C = 1.25 \cdot t^{\circ}R = 5/9(t^{\circ}F - 32). \quad (6)$$

Принципиальный недостаток эмпирических температурных шкал – их зависимость от термометрического вещества – отсутствует у **термодинамической температурной шкалы**, основанной на втором начале термодинамики. При определении термодинамической температурной шкалы исходят из цикла Карно. Если в цикле Карно тело, совершающее цикл, поглощает теплоту Q_1 при температуре T_1 и отдает теплоту Q_2 при температуре T_2 , то отношение $T_1/T_2 = Q_1/Q_2$ не зависит от свойства рабочего тела и позволяет по доступным для измерений величинам Q_1 и Q_2 определять термодинамическую температуру. Дополнительное преимущество термодинамической температурной шкалы состоит в том, что определенные по ней температуры входят в формулы термодинамики, служащие основой всех теплофизических расчетов. Для термодинамической температурной шкалы, как и для любой другой, необходимо задать значения двух фиксированных температур. Общепринято считать $T_1 = 0$ при абсолютном нуле температур и $T_2 = 273.15$ К в точке плавления льда при нормальном давлении. Температура по термодинамической температурной шкале измеряется в кельвинах (К).

Исследования показали, что воспроизводимость основных точек шкалы – точки таяния льда и точки кипения воды – не может быть достигнута лучше 0.001 К, и это обстоятельство накладывает ограничения на дальнейшее повышение точности измерения термодинамических температур. Поэтому с 1968 года принято определять Кельвин как $1/273.16$ термодинамической температуры тройной точки воды. Тройная точка воды представляет собой температуру равновесия трех фаз – твердой, жидкой и газообразной – чистой воды естественного изотопного состава. Она принята равной 0.01 °С, то есть на 0.01 К выше точки таяния льда. Воспроизводимость тщательно подготовленной тройной точки воды составляет ~0.0002 К. Введение $T_2 = 0$ является экстраполяцией и не требует реализации абсолютного нуля. Определенная таким образом термодинамическая, или абсолютная, температурная шкала (шкала Кельвина) имеет единицу температуры, совпадающую с таковой для стоградусной шкалы Цельсия, основанной на идеальном газе и значениях $t_1 = 0^{\circ}C$ (в точке плавления льда) и $t_2 = 100^{\circ}C$ (в точке кипения воды). Соотношение между температурами по шкалам Цельсия и Кельвина

$$T_K = t^{\circ}C + 273.15K. \quad (7)$$

В США часто применяют термодинамическую температурную шкалу Ранкина, температура T_R по которой связана с T_K соотношением

$$T_K = 5/9 \cdot T_R. \quad (8)$$

На практике при измерении температуры по термодинамической температурной шкале применяют, как правило, не цикл Карно, а одно из строгих следствий второго начала термодинамики, связывающего удобно измеряемое термометрическое свойство с термодинамической температурой. В числе таких соотношений: законы идеального газа, законы излучения абсолютно черного тела, восприимчивость идеального парамагнетика и т. д. В широком интервале температур, примерно от точки кипения гелия (4.18 К) до точки затвердевания золота (1337.58 К), наиболее точные измерения термодинамической температуры обеспечивает *газовый термометр*. Для газовой термометрии весьма существенно, что температура по термодинамической шкале Кельвина точно соответствует газовой температуре, определяемой по газу, находящемуся в идеальном состоянии.

Однако, для практических целей измерять термодинамическую температуру указанным методом с высокой точностью невозможно. Поэтому значение температуры по термодинамической температурной шкале наносят на удобный *вторичный термометр*, часто более чувствительный и стабильный, чем прибор, воспроизводящий термодинамическую температурную шкалу. Поскольку для термометрического свойства вторичного термометра нет заранее известной связи с температурой, его градуируют по термодинамической температурной шкале в количестве точек, достаточном для нахождения всей градуировочной кривой. Трудность работы с термометром, измеряющим термодинамическую температуру, и его худшая воспроизводимость по сравнению с вторичным термометром заставляет на практике градуировать его по высокостабильным *реперным (опорным) температурным точкам* (табл. 1).

Таблица 1.

Реперные температурные точки МПТШ-68

	T_{68}, K	$t_{68}, ^\circ\text{C}$	Оценочная погрешность, К
Тройная точка равновесного водорода	13.81	-259.34	0.01
Точка кипения равновесного водорода при давлении 3330.6 Па=25/76 атм.	17.042	-256.108	0.01
Точка кипения равновесного водорода	20.28	-252.87	0.01
Точка кипения неона	27.102	-246.048	0.01
Тройная точка кислорода	54.361	-218.789	0.01
Точка кипения кислорода	90.188	-182.962	0.01
Тройная точка воды	273.16	0.01	Точно
Точка кипения воды	373.16	100	0.005
Точка затвердевания цинка	692.73	419.58	0.03
Точка затвердевания серебра	1235.08	961.93	0.2
Точка затвердевания золота	1337.58	1064.43	0.2

Вычисление всей градуировочной кривой вторичного термометра производится методами, разработанными при исследовании его термометрического свойства приборами, измеряющими термодинамическую температуру. Таким образом, устанавливается основанная на вторичном термометре *практическая температурная шкала*, совпадающая с

термодинамической температурной шкалой в пределах точности измерений, воспроизводимости приборов и методов вычисления градуировочной кривой. Если дополнительно показано, что осуществленные таким образом градуировки всех вторичных термометров выбранного типа совпадают с высокой точностью, то такую температурную шкалу считают независимой от конкретного термометра и удобной в качестве **Международной практической температурной шкалы (МПТШ)**. Международным сообществом с 1968 года принята МПТШ-68, по которой градуируются все приборы для измерения температуры.

Термометрия

Термометрия – раздел теплофизики, посвященный методам и средствам измерения температуры. Одновременно термометрия – раздел метрологии, в задачи которого входит обеспечение единства температурных измерений: установление температурных шкал, создание эталонов, разработка методик градуировки и поверки приборов для измерения температуры. Методы измерения температуры различны для разных диапазонов измеряемых температур, они зависят от условий измерения и требуемой точности. Их принято делить на две основные группы методов: контактные (собственно термометрия) и бесконтактные (термометрия излучения или пирометрия). Для контактных методов характерно то, что прибор, измеряющий температуру среды, должен находиться с ней в тепловом равновесии, то есть иметь с ней одинаковую температуру.

Прибор для измерения температуры посредством контакта с исследуемой средой - **термометр**. Основными узлами всех приборов для измерения температуры являются чувствительный элемент, где реализуется термометрическое свойство, и связанный с ним измерительный прибор. Термометры (чувствительные элементы) называются первичными приборами. Измерительные устройства (потенциометры, манометры, измерительные мосты, милливольтметры и т. д.), которыми определяют термометрические свойства, являются вторичными приборами.

Основные типы термометров:

1. Газовые – (постоянного давления или постоянного объема).
2. Жидкостные – основаны на тепловом расширении жидкости. Представляют собой стеклянный (реже кварцевый) резервуар с припаянным капилляром.
3. Манометрические – представляют собой баллон, соединенный капилляром с пружинным манометром. Основаны на тепловом расширении заполняющей баллон жидкости либо на температурной зависимости давления находящегося в баллоне газа.

4. Сопротивления – основаны на зависимости электрического сопротивления от температуры.
5. Термоэлектрические – действие основано на эффекте Зеебека.
6. Акустические или ультразвуковые.
7. Кварцевые – основаны на температурной зависимости резонансной частоты пьезокварца.
8. Ёмкостные – основаны на температурной зависимости диэлектрической проницаемости сегнетоэлектриков.

Лабораторная работа № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАТИНОВЫМ ТЕРМОМЕТРОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Цель работы: изучение на практике методов измерения температуры с помощью резистивных датчиков.

Платиновый термометр сопротивления

Принцип действия термометра сопротивления основан на изменении электрического сопротивления термометрического материала с изменением температуры. Так как измерение электрического сопротивления легко производить с высокой точностью, то возможность создания точного термометра сопротивления сводится в основном к отысканию материала, имеющего достаточно резко выраженную и постоянную зависимость электрического сопротивления от температуры.

В настоящее время термометрическими материалами, пригодными для термометров сопротивления, следует считать главным образом чистые металлы, особенно те, которые являются химически стойкими в широком интервале температур и зависимость сопротивления которых от температуры в этом интервале подчиняется сравнительно простым зависимостям.

С этой точки зрения наилучшим материалом для изготовления чувствительных элементов термометров сопротивления является платина. Она довольно просто может быть получена в чистом виде и обладает химической стойкостью вплоть до высоких температур (около 1400 К). В то же время платина имеет относительно простую зависимость сопротивления от температуры и исключительно удобна для изготовления в виде тонкой проволоки и ленты.

На рис. 1 представлено схематическое изображение лабораторного платинового термометра сопротивления. Чувствительный элемент этого термометра представляет собой спираль из тонкой платиновой проволоки (диаметром менее 0.05 мм), навитую на каркасе (геликоидальном кварцевом стержне). Спираль укрепляется бифилярно на противоположных сторонах кварцевой ленты, скрученной в виде двухходового винта. Бифилярная намотка, т.е. намотка проводником, сложенным вдвое, позволяет получить большое сопротивление, не обладающее индуктивностью. Концы спирали приварены к "королькам" из более толстой платиновой проволоки, которая образует потенциальные и токовые выводы. Для защиты от механических повреждений чувствительный элемент термометра заключен в защитную герметическую оболочку, внутри которой при изготовлении создается атмосфера гелия в качестве теплообменного газа. Во избежание термических напряжений, приводящих к нестабильности сопротивления, проволока термометра должна располагаться на каркасе совершенно свободно, без натяжения.

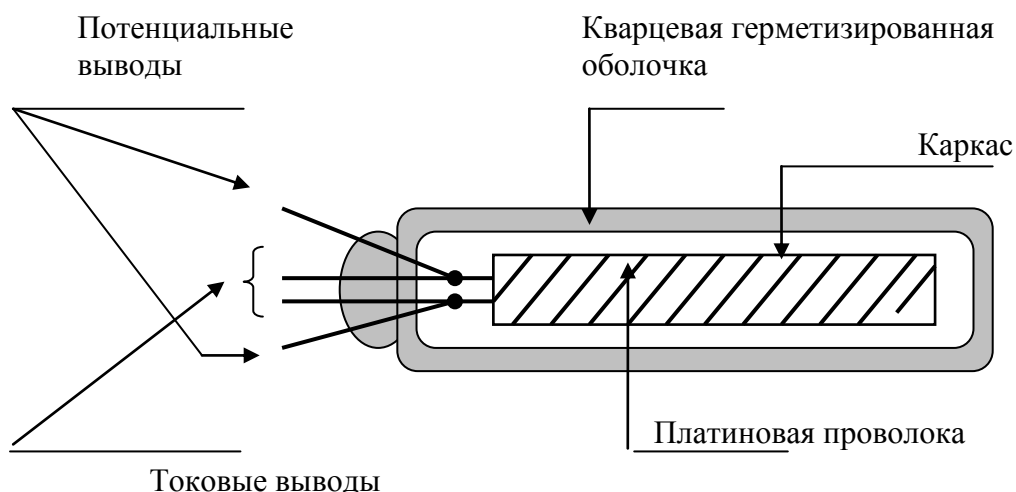


Рис. 1. Схема устройства платинового термометра сопротивления.

Температурные интервалы применения

Платиновые термометры сопротивления используются в широком интервале температур от 13.81 К (температура равновесного водорода) до 1100 К. Нижний предел температур определяется значительным уменьшением величины изменения сопротивления платины при изменении температуры dR/dT . Химическая стабильность платины определяет максимальную температуру применения термометра.

Измерение сопротивления термометра

При проведении прецизионных термометрических измерений особое значение приобретают точные методы электрических измерений сопротивления термометра. Так, например, если нужно обеспечить точность измерений температуры до 0.01 К, то сопротивление термометра следует определять с относительной точностью $(2-4) \cdot 10^{-5}$. В случае, когда необходима точность до 0.001 К, сопротивление нужно измерять с точностью $(2-4) \cdot 10^{-6}$, а при проведении некоторых калориметрических измерений нужна еще более высокая точность измерения сопротивления. Для измерения сопротивления со столь большой точностью используются, как правило, потенциометры или цифровые вольтметры высокого разрешения.

На рис. 2 изображена принципиальная схема измерений электрического сопротивления с помощью потенциометра. Термометр сопротивления R_t при помощи выводных (токовых) проводов последовательно соединен с образцовым сопротивлением R_N (обычно подбираемым одного порядка с сопротивлением самого термометра в рабочем состоянии и изготавливаемым из

материалов с малым термическим коэффициентом сопротивления), регулируемым сопротивлением R_p и источником тока E . Регулируемое сопротивление R_p необходимо для установки требуемой величины измерительного тока. Эта величина определяется типом потенциометра (цифрового вольтметра), сопротивлениями термометра и образцового сопротивления и составляет обычно 1-10 мА, что обеспечивает минимальные ошибки от перегрева. Потенциальные провода термометра сопротивления и образцового сопротивления подключены к потенциометрическому переключателю Π .

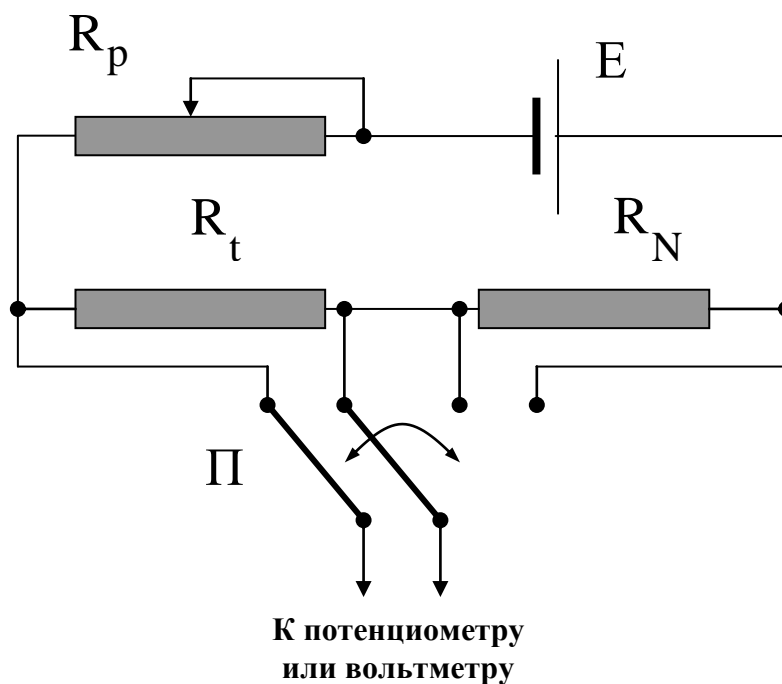


Рис. 2. Принципиальная схема измерения электрического сопротивления.

Измерения осуществляются следующим образом. После того, как регулировочным сопротивлением R_p в цепи термометра установлен измерительный ток (примерно 1 мА), производят точное измерение этого тока при помощи потенциометра. Для этого переключателем Π (рис. 2) подключают к потенциометру потенциальные провода от образцового сопротивления R_N и измеряют падение напряжения на нем U_N . Зная величину R_N , которая незначительно меняется с температурой, можно просто определить измерительный ток

$$I = U_N / R_N, \quad (1)$$

который равен току через термометр $I = I_t$. Затем следует измерить падение напряжения на самом термометре сопротивления. Для этого переключателем Π в цепь потенциометра включают потенциальные провода термометра

сопротивления. Пусть измеренное падение напряжения будет U_t , тогда искомая величина сопротивления R_t термометра при некоторой температуре t составит

$$R_t = U_t / I. \quad (2)$$

Или в соответствии с уравнением (1):

$$R_t = R_N (U_t / U_N). \quad (3)$$

Для разных температурных областей использования платинового термометра существуют различные термометрические уравнения для расчета температуры. Так уравнение для расчета температуры по сопротивлению платинового термометра в интервале температур $-182.97 - 0$ °C имеет следующий вид:

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3]. \quad (4)$$

Коэффициенты A , B , C уравнения (4), а также сопротивление термометра при 0°C R_0 находятся из этого уравнения по результатам градуировки термометра в постоянных (реперных) температурных точках. Решение уравнения проводят методом последовательных приближений.

Однако, так как чистота платины, применяемой для изготовления чувствительного элемента серийных термометров, удовлетворяет условию $(R_{100^\circ\text{C}}/R_{0^\circ\text{C}}) \geq 1.3920$, можно для определения температуры воспользоваться стандартной таблицей, в которой приведены значения *относительного сопротивления* $W_T = R_t/R_0$ для стандартной платины в зависимости от температуры (Приложение 1).

Точность измерений температуры

Основные источники ошибок при измерении температуры платиновым термометром сопротивления таковы:

1. Погрешности градуировки.

Как правило, градуировку следует производить в метрологических учреждениях. При необходимости проведения градуировки в лабораторных условиях нужно обратить особое внимание на качество аппаратуры для получения постоянных температурных (реперных) точек.

2. Изменение сопротивления платины вследствие механического воздействия на платину.

Длительный отжиг платиновой проволоки до намотки на каркас термометра и после этого, а также наматывание проволоки без натяга позволяют практически

исключить ошибку измерения от изменения сопротивления вследствие механического воздействия на него.

3. Влияние сопротивления подводящих проводов.

Влияние сопротивления подводящих измерительных проводов может быть полностью исключено путем применения потенциметрической (четырёхпроводной) схемы. Именно поэтому в термометре предусмотрены по два токовых и два потенциальных выводных провода.

4. Появление термо-э.д.с. в цепи термометра.

Для исключения влияния на точность измерений возможных термо-э.д.с., могущих возникнуть по разным причинам в проводах, желательно в измерительной цепи термометра иметь переключатель, позволяющий изменять направление тока.

5. Термическая инертность прибора.

Для улучшения теплового контакта чувствительного элемента термометра со средой, температура которой измеряется, как указывалось выше, защитная оболочка термометра заполняется теплообменным газом – гелием. Нужно стремиться также улучшить тепловой контакт оболочки с исследуемой средой. Для этого используют контактные смазки.

6. Ошибка измерения сопротивления термометра.

Эта ошибка может быть выражена уравнением вида

$$\frac{\delta R_t}{R_t} = \frac{\delta R_0}{R_0} + \frac{\delta U_t}{U_t} + \frac{\delta U_N}{U_N} + \frac{\delta R_N}{R_N} \quad (5)$$

Паспортные ошибки величин сопротивления термометра R_t при 0°C и нормального сопротивления R_N составляют соответственно $\delta R_0 = \pm 0.0001$ Ом, $\delta R_N = \pm 0.0001$ Ом. Ошибки измерения напряжений потенциометром Р-348 $\delta U_t = \delta U_N = \pm (10 \times U + 0.04) \times 10^{-6}$ В.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с техническим описанием потенциометра Р-348 или цифрового вольтметра Щ-31 (см. **Приложение 2**).
2. Выполнить настройку измерительных токов потенциометра или вольтметра.
3. Произвести в течение 30 - 40 минут через определенные промежутки времени (2.5 минуты) измерения падений напряжения на термометре сопротивления U_t и образцовом сопротивлении U_N .
4. Выполнить расчеты температуры для каждого измерения, используя таблицу зависимости относительного сопротивления W_T от температуры (см. **Приложение 1**).

5. Составить таблицу и построить график изменения температуры от времени.

τ , мин	U_t , мкВ	U_N , мкВ	$W_T=(U_t/U_N)\times(R_N/R_0)$	T, К
0				
2,5				
.....				

6. Определить ошибку измерений.

Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- 1) схему измерения температуры платиновым термометром сопротивления;
- 2) таблицу, включающую данные о падении напряжений U_t , U_N и температуры через определенные интервалы времени;
- 3) график зависимости температуры от времени;
- 4) расчеты погрешности измерений.

Контрольные вопросы

1. Что такое температура? Принцип построения температурной шкалы.
2. Методы определения температуры.
3. Принцип измерения температуры термометром сопротивления.
4. Основные факторы, влияющие на точность измерения температуры платиновым термометром сопротивления.

Литература

1. Температурные измерения / под редакцией О.А. Геращенко. Киев: Наукова думка. 1989.
2. Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1983.
3. Шпильрайн Э.Э., Кессельман П.М. Основы теории теплофизических свойств веществ. М.: Энергия, 1977.
4. Камке Д., Кремер К. Физические основы единиц измерения. М.: Мир, 1980.

**Приложение 1. Международная практическая температурная шкала
МПТШ-68. Стандартная таблица ССТ-68 $T_{68}=f(W_T)$**

W_T	T	ΔT	W_T	T	ΔT	W_T	T	ΔT
1.000	273.15		1.023	278.9246		1.046	284.7094	
		0.2509			0.2513			0.2518
1.001	273.4009		1.024	279.1759		1.047	284.9612	
		0.2508			0.2513			0.2518
1.002	273.6517		1.025	279.4272		1.048	285.2130	
		0.2509			0.2514			0.2517
1.003	273.9026		1.026	279.6786		1.049	285.4647	
		0.2509			0.2513			0.2519
1.004	274.1535		1.027	279.9299		1.050	285.7166	
		0.2510			0.2514			0.2518
1.005	274.4045		1.028	280.1813		1.051	285.9684	
		0.2509			0.2514			0.2518
1.006	274.6554		1.029	280.4327		1.052	286.2202	
		0.2510			0.2514			0.2519
1.007	274.9064		1.030	280.6841		1.053	286.4721	
		0.2510			0.2514			0.2519
1.008	275.1574		1.031	280.9355		1.054	286.7240	
		0.2510			0.2515			0.2519
1.009	275.4084		1.032	281.1870		1.055	286.9759	
		0.2510			0.2515			0.2519
1.010	275.6594		1.033	281.4385		1.056	287.2278	
		0.2511			0.2515			0.2520
1.011	275.9105		1.034	281.6900		1.057	287.4798	
		0.2510			0.2515			0.2519
1.012	276.1615		1.035	281.9415		1.058	287.7317	
		0.2511			0.2515			0.2520
1.013	276.4126		1.036	282.1930		1.059	287.9837	
		0.2511			0.2516			0.2520
1.014	276.6637		1.037	282.4446		1.060	288.2357	
		0.2512			0.2516			0.2520
1.015	276.9149		1.038	282.6962		1.061	288.4877	
		0.2511			0.2515			0.2521
1.016	277.1660		1.039	282.9477		1.062	288.7398	
		0.2512			0.2517			0.2520
1.017	277.4172		1.040	283.1994		1.063	288.9918	
		0.2512			0.2516			0.2521
1.018	277.6684		1.041	283.4510		1.064	289.2439	
		0.2512			0.2516			0.2521
1.019	277.9196		1.042	283.7026		1.065	289.4960	
		0.2512			0.2517			0.2521
1.020	278.1708		1.043	283.9543		1.066	289.7481	
		0.2512			0.2517			0.2522
1.021	278.4220		1.044	284.2060		1.067	290.0003	
		0.2513			0.2517			0.2521
1.022	278.6733		1.045	284.4577		1.068	290.2524	

W_T	T, K	ΔT, K	W_T	T, K	ΔT, K	W_T	T, K	ΔT, K
1.069	290.5046		1.094	296.8154		1.119	303.1384	
		0.2522			0.2527			0.2532
1.070	290.7568		1.095	297.0681		1.120	303.3916	
		0.2522			0.2527			0.2532
1.071	291.0090		1.096	297.3208		1.121	303.6448	
		0.2522			0.2527			0.2532
1.072	291.2612		1.097	297.5735		1.122	303.8980	
		0.2523			0.2528			0.2533
1.073	291.5135		1.098	297.8263		1.123	304.1513	
		0.2523			0.2527			0.2532
1.074	291.7658		1.099	298.0790		1.124	304.4045	
		0.2523			0.2528			0.2533
1.075	292.0181		1.100	298.3318		1.125	304.6578	
		0.2523			0.2528			0.2533
1.076	292.2704		1.101	298.5846		1.126	304.9111	
		0.2523			0.2528			0.2533
1.077	292.5227		1.102	298.8374		1.127	305.1644	
		0.2524			0.2529			0.2533
1.078	292.7751		1.103	299.0903		1.128	305.4177	
		0.2523			0.2528			0.2534
1.079	293.0274		1.104	299.3431		1.129	305.6711	
		0.2524			0.2529			0.2534
1.080	293.2798		1.105	299.5960		1.130	305.9245	
		0.2524			0.2529			0.2534
1.081	293.5323		1.106	299.8489		1.131	306.1779	
		0.2525			0.2529			0.2534
1.082	293.7847		1.107	300.1018		1.132	306.4313	
		0.2524			0.2530			0.2535
1.083	294.0371		1.108	300.3548		1.133	306.6847	
		0.2524			0.2529			0.2534
1.084	294.2896		1.109	300.6077		1.134	306.9382	
		0.2525			0.2530			0.2535
1.085	294.5421		1.110	300.8607		1.135	307.1916	
		0.2525			0.2530			0.2535
1.086	294.7946		1.111	301.1137		1.136	307.4451	
		0.2525			0.2530			0.2535
1.087	295.0471		1.112	301.3667		1.137	307.6986	
		0.2526			0.2531			0.2536
1.088	295.2997		1.113	301.6198		1.138	307.9522	
		0.2526			0.2530			0.2535
1.089	295.5523		1.114	301.8728		1.139	308.2057	
		0.2525			0.2531			0.2536
1.090	295.8048		1.115	302.1259		1.140	308.4593	

Приложение 2. Настройка потенциометра Р-348 и измерение напряжений U_t и U_N

Расположение основных элементов, необходимых при выполнении лабораторной работы и вынесенных на лицевую панель потенциометра, показано на рис. 3.

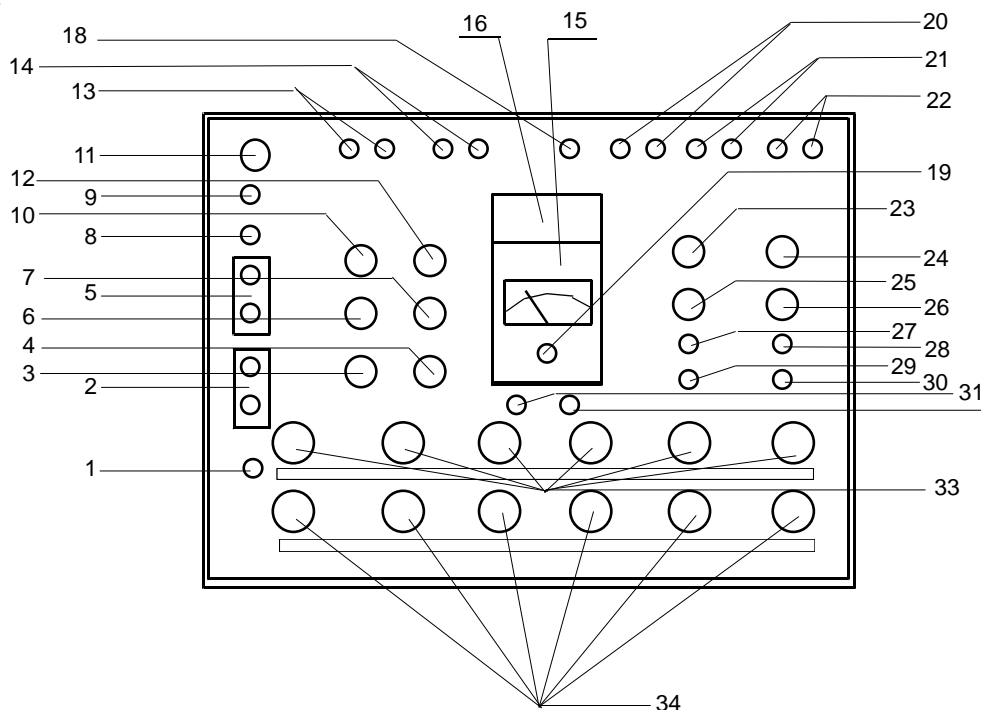


Рис. 3. Схема лицевой панели потенциометра Р-348.

- 1 - кнопка "Измерение",
- 2 - зажимы для подключения измеряемой ЭДС X_2 (U_N),
- 3 - переключатель рода работы,
- 4 - переключатель чувствительности,
- 5 - зажимы для подключения измеряемой ЭДС X_1 (U_t),
- 15 - стрелочный прибор автокомпенсатора,
- 18 - зажим "земля",
- 19 - механический корректор стрелочного прибора М 102,
- 23, 25, 27, 29 - ручки регулировки тока I_A ,
- 24, 26, 28, 30 - ручки регулировки тока I_B ,
- 31 - ручка "Тонко" электрического корректора нуля,
- 32 - ручка "Грубо" электрического корректора нуля,
- 33 - измерительные декады ряда U_1 (U_t),
- 34 - измерительные декады ряда U_2 (U_N).

Перед началом работы установить:

- ручку 3 – в положение I_A ,
- ручку 4 - в положение $10^{-2}V$,
- кнопку 1 ("Измерение") - в верхнее положение (отжата).

Настройка потенциометра

- Установите стрелку выходного прибора на нулевую отметку корректором 19.
- Установить стрелку выходного прибора на нулевую отметку шкалы сначала механическим корректором нуля (находящимся на усилителе), а затем электрическим корректором нуля (ручки 31, 32 на потенциометре). При настройке нуля механическим корректором ручка 4 может находиться в любом из положений $10^{-2} - 10^{-5}$ В, при настройке ручкой 32 - в положении $10^{-6} - 10^{-7}$ В, при настройке ручкой 31 - в положении 10^{-8} В.

Контроль за нулевым положением стрелки индикатора и его корректировка производятся при не нажатой кнопке 1 “Измерение” при любом положении всех переключателей потенциометра, кроме переключателя 4, который должен быть установлен в положении $10^{-7} - 10^{-8}$ В.

- Установить ток в контуре А, для чего:
 - а) поставить переключатель 4 в положение 10^{-2} В,
 - б) переключатель 3 - в положение I_A ,
 - в) нажать и зафиксировать поворотом кнопку 1 - “Измерение”,
 - г) постепенно увеличивая чувствительность ручкой 4, отрегулировать ток ручками 23, 25, 27, 29.

ПРИМЕЧАНИЕ: при регулировке тока в контуре А переключатель 4 в положение $10^{-7} - 10^{-8}$ В не устанавливать.

- д) поставить переключатель 4 в положение 10^{-2} В, кнопку 1 отжать.
- Установить ток в контуре В следующим образом:
 - а) поставить переключатель 3 в положение I_B ,
 - б) нажать и зафиксировать кнопку 1 “Измерение”,
 - в) постепенно переключая ручку 4 из положения 10^{-2} В в положение 10^{-8} В, отрегулировать ток ручками 24, 26, 28, 30,
 - г) вернуть ручку 4 в положение 10^{-2} В, кнопку 1 “Измерение” отжать.

Измерение напряжений U_t и U_N

Для измерения напряжений U_t и U_N необходимо собрать схему, как показано на рис. 4.

- Поставить переключатель 3 в положение X_1 .
- Нажать и зафиксировать кнопку 1 (“Измерение”). Постепенно увеличивая чувствительность, добиться компенсации измеряемого напряжения ручками 33. Произвести отсчет напряжения $U_1 (U_t)$.
- Поставить переключатель 3 в положение X_2 .

- Измерение напряжения U_2 (U_N) производится аналогично измерению U_1 , но при этом пользуются переключателями 34.

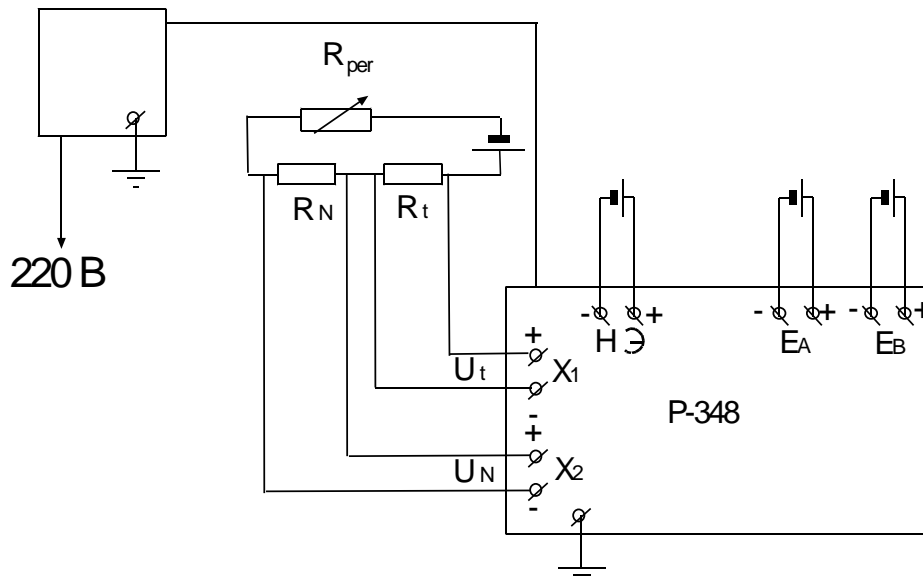


Рис. 4. Схема использования потенциометра для измерения напряжений.

Сопротивление термометра определяется по формуле (3):

$$R_t = \frac{U_t}{U_N} \cdot R_N$$

где U_t - напряжение, отсчитанное по ряду U_1 ,

U_N - напряжение, отсчитанное по ряду U_2 ,

R_N - действительное значение образцовой катушки сопротивления.

Лабораторная работа № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТЕРМОМЕТРОМ (ТЕРМОПАРОЙ)

Цель работы: изучение на практике методов измерения температуры с помощью термоэлектрических датчиков.

Термоэлектрический термометр

В месте соприкосновения любых двух проводников, даже минимально отличающихся друг от друга физическими и/или химическими свойствами, при любых температурах возникает контактная разность потенциалов. Ее возникновение связано с наличием в каждом проводнике так называемого электронного газа, т. е. свободных электронов, находящихся между атомами в хаотическом тепловом движении. Концентрация этих электронов у разнородных проводников различна и зависит от температуры. Если соединить между собой два разнородных проводника (полупроводника), то, так как концентрация свободных электронов в них различна, на границе раздела между ними при их соприкосновении возникает разность потенциалов. Свободные электроны того проводника, где концентрация их больше, начнут частично диффундировать в проводник с меньшей концентрацией электронов. При этом первый проводник получит положительный заряд (потеря электронов), а второй – отрицательный заряд (приобретение электронов). Контактная разность потенциалов начнет тормозить дальнейший процесс перехода электронов – возникает динамическое равновесие.

Если составить замкнутую цепь из двух проводников, соединенных друг с другом своими концами, и контакты поддерживать при разных температурах, то поскольку контактная разность потенциалов в местах контакта проводников зависит от температуры, в цепи нарушается равновесие электрических потенциалов и возникает электрический ток. Это явление известно как эффект Зеебека. Электродвижущие силы, обусловленные неодинаковыми потенциалами в контактах, имеющих разные температуры, называются термоэлектродвижущими силами (термо-э.д.с.).

Термоэлектрический термометр – прибор для измерения температуры, основанный на эффекте Зеебека, состоящий из **термопары** в качестве чувствительного элемента и электроизмерительного прибора (милливольтметра, потенциометра).

Термопара – датчик температуры, состоящий из двух различных проводников или полупроводников (термоэлектродов), образующих термоэлектрическую цепь, концы которых электрически соединены между собой (спаяны или сварены). Величина термо-э.д.с. зависит от температуры спаев и от состава материала проводников, образующих термопару.

Появляющаяся термо-э.д.с. может быть измерена соответствующим прибором, подключенным в цепь, например, потенциометром или вольтметром, и будет служить мерой разности температур. Если теперь одну из температур все время поддерживать постоянной (например, 0°C , т.е. соответствующей точке плавления льда), то величина термо-э.д.с. будет зависеть только от второй температуры.

В небольшом диапазоне температур термо-э.д.с. можно считать с достаточной для практических целей точностью пропорциональной разности температур и коэффициенту термо-э.д.с.: $\alpha = \Delta E / \Delta T$. В более точном приближении α является функцией разности температур спаев. Коэффициент термо-э.д.с. зависит от материала термоэлектродов и диапазона температур, в котором используется термопара. В некоторых случаях с изменением температуры α меняет знак.

В подавляющем большинстве случаев термопары изготавливаются из проволоки. Диаметр проволок желательно брать не меньше 0.15 – 0.20 мм, так как при меньших диаметрах труднее освободиться от неоднородности проволоки. Соединение проволок лучше всего производить сваркой. Следует, однако, опасаться пережога проволоки в местах сварки и поэтому часто сварку заменяют пайкой. Спай необходимо делать по возможности малым, но таким, чтобы были обеспечены безусловная механическая прочность в месте спаивания и хороший электрический контакт.

Соединение двух проводников, находящееся при 0°C , называется обычно холодным спаем, а другое соединение называется горячим спаем. Схема подключения термопары к измерительному прибору показана на рис. 1.

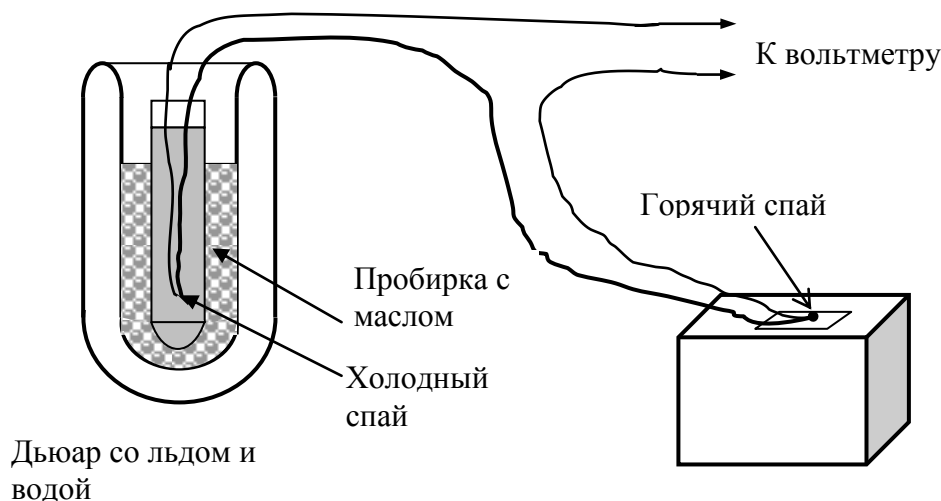


Рис. 1. Схема подключения термопары.

В зависимости от вида среды, температура которой измеряется, термопара может помещаться или непосредственно в среду, или находиться в защитном футляре. Если среда является электропроводящей, то термопара должна быть помещена в защитный футляр. Холодные спаи термопар помещают в стеклянные пробирки и заливают керосином или трансформаторным маслом. В таком виде пробирка с холодным спаем опускается в сосуд Дьюара с тающим льдом, обеспечивающим постоянство температуры.

Технические возможности термопар

Наряду с термометром сопротивления термопара является одним из лучших и наиболее распространенных приборов для измерения температуры при выполнении теплофизических исследований. Термопары удовлетворяют многим требованиям идеального преобразователя. Они просты, надежны в работе и состоят, по существу, из двух термоэлектродов. Их конструктивные формы и размеры позволяют обеспечивать малый показатель тепловой инерции.

Выбор материала для проводников термопары в основном определяется следующими обстоятельствами:

- 1) возможно большей термо-э.д.с., однозначно изменяющейся в зависимости от температуры;
- 2) физической и химической стойкостью при максимальных измеряемых температурах среды, в которой находятся термопары;
- 3) однородностью и постоянством строения материала проводника;
- 4) возможностью изготовления термопар требуемой конструкции.

Температурные интервалы и точность измерений

В зависимости от материалов, используемых для изготовления термоэлектродов, измерения температур можно проводить в широком диапазоне (от 2 до 3000 К). Однако индивидуальная термопара используется, как правило, в значительно более узком интервале температур, например:

- 1) платинородий (Rh -10% и Pt – 90%) - платина - от 500 до 1900 К;
- 2) хромель (Cr -10% и Ni – 90%)– алюмель (Ni – 95%, Al, Si, Mg – 5%) - от 77 до 1400 К;
- 3) медь – константан (Cu – 55% и Ni – 45%) - от 77 до 650 К;
- 4) золото – железо - от 2 до 150 К.

Выбирая соответствующие материалы, можно достичь высокой чувствительности (до 100 мкВ/К) и высокой точности измерений температуры (~0.1 К). Термопары представляют собой идеальные приборы для измерения разностей температур, величины которых могут достигать до 10^{-7} К.

Однородность и постоянство строения материала проводника оказывают большое влияние на точность измерения. Неоднородную проволоку можно

рассматривать как цепь, состоящую из достаточно большого числа однородных проводников с несколько различающимися термоэлектрическими свойствами. При наличии неизбежной разности температур по длине проволоки в цепи термоэлемента, состоящего из неоднородных проводников, возникают дополнительные э.д.с.. Неоднородность проводника может быть вызвана механическими причинами – наклепом, деформацией материала проводника, а также химическими и структурными причинами. Неоднородность проволоки, вызванная наклепом или деформациями проводника, следует устранять прокаливанием проволоки. Неоднородность, вызванная химическими и структурными причинами, неустранима. Поэтому проволоку после прокаливания следует испытать на неоднородность. Для этого берут куски одной и той же проволоки, соединяют их и проверяют, не появится ли термо-э.д.с. при нагреве их в месте соединения. Вполне однородный материал при этом не дает никакой э.д.с.

Одной из термопар, используемых обычно в интервале температур $-190 \div +350^\circ\text{C}$, является термопара **медь-константан** (сплав: 40% никеля и 60% меди). При температуре выше 350°C медь быстро окисляется, что ограничивает возможность применения данных термопар. Однако доступность материалов для электродов, простота изготовления термопар и их удовлетворительные чувствительность и воспроизводимость способствовали широкому распространению путем применения в самых различных областях техники и науки. В интервале температур от -190 до 100°C ($83 - 373\text{ K}$) расчет температуры ведется с использованием уравнения

$$E = at + bt^2 + ct^3. \quad (1)$$

При пользовании термопарой следует производить градуировку ее не менее чем в двух реперных точках с таким расчетом, чтобы рабочий температурный интервал располагался между температурами градуировки. По таблице находятся значения $E_{\text{табл}}$, соответствующие температурам градуировки термопары. Далее вычерчивают график поправок, откладывая по оси абсцисс наблюдаемое значение термо-э.д.с. E , а по оси ординат – разность $E - E_{\text{табл}}$. По этому графику в дальнейшем может быть определена поправка к показанию термопары для любого значения E : отнимая или складывая эту поправку с наблюдаемой величиной термо-э.д.с., получаем соответствующее ей значение $E_{\text{табл}}$, по которому и определяем из таблицы температуру. Ошибка при таком определении температуры приведением к таблице – около 2% величины поправки.

Изготовление термопары медь-константан

Приготовить два медных проводника и один константановый длиной 70-80 см. Необходимо стараться избегать образования на проводниках петель и перегибов, способствующих ухудшению качества термопары. Концы всех проводников с обеих сторон очистить от изоляции на участках длиной ~ 1 см.

Выполнить лужение очищенных поверхностей, подлежащих дальнейшей пайке, оловянно-свинцовым припоем с помощью паяльника. Лужение состоит в том, что на поверхность наносят паяльником сначала флюс и затем небольшое количество припоя. Поверхность прогревают паяльником и, двигая его в разных направлениях, выравнивают наносимый слой полуды. Прогреть поверхность желательно так, чтобы паяльник прилегал к ней всей рабочей гранью. Предварительное лужение облегчает процесс пайки и способствует получению прочного соединения, а также способствует защите поверхностей от окисления. Выполнить пайку проводников в последовательности медь – константан – медь.

Настройка вольтметра Щ-31 и измерение напряжения

Вольтметр универсальный Щ-31 предназначен для измерения в лабораторных условиях постоянного тока, напряжения постоянного тока и сопротивления постоянному току.

Подготовка вольтметра к работе.

1. Перед началом работы проверьте заземление прибора.
2. Включите кнопки «СЕТЬ» и «ФИЛЬТР», при этом должны загореться все индикаторные лампы отсчетного устройства. Прогрейте прибор в течение часа.
3. Проведите установку нулей прибора, для чего:
 - Установите переключатель пределов в положение «O₁», затем – «O₂».
 - Выставьте на табло прибора потенциометром «O₁», затем потенциометром «O₂» значение 000000±3 знака.
 - Повторите установку нулей несколько раз.

Порядок работы при измерении напряжения.

1. Подключите термопару к входным клеммам «U» и «U*».
2. Установите переключатель измерения в положение, соответствующее измерению напряжения.
3. Установите переключатель измерения в положение, соответствующее верхнему пределу измеряемой величины.
4. Отсчитайте результат измерения по отсчетному устройству. Появление на отсчетном устройстве числа 1020000 является сигналом перегрузки – т.е. свидетельствует о необходимости перехода на следующий предел измерения.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с методикой измерения напряжения с помощью цифрового вольтметра Щ-31. Выполнить настройку вольтметра.
2. Изготовить термопару из медных и константановых проводников. Проверить работоспособность термопары (качество пайки) с помощью

- вольтметра или потенциометра. Приготовить из папиросной бумаги две изолирующие гильзы и наклеить их на оба спая.
3. Поместить один спай (холодный) в пробирку с трансформаторным маслом, находящуюся в Дьюаре со льдом, а второй (горячий) приклеить на поверхность исследуемого образца (рис. 1). Выполнить измерения термо-э.д.с. термопары, соответствующей температуре исследуемого образца. Записать показания образцового термометра, помещенного в канал образца.
 4. Измерить термо-э.д.с. термопары в реперных точках 100°C и 0°C . Для этого отклеить горячий спай термопары и поместить его вначале в пробирку с маслом, находящуюся в сосуде с кипящей водой, а затем – в пробирку в сосуде со льдом.
 5. Построить график поправок относительно стандартных табличных значений термо-э.д.с. (См. **Приложение 1**).
 6. Рассчитать температуру исследуемого образца и сравнить ее с показаниями образцового термометра.

Требования к отчету

Отчет должен содержать:

1. схему измерения температуры с помощью термопарного преобразователя;
2. таблицу, включающую данные о величинах термо-э.д.с. термопары, соответствующих 0°C , 100°C и температуре исследуемого образца;
3. график поправок относительно стандартной термопары;
4. сравнение температур образца, полученных с помощью термопары и образцового термометра.

Контрольные вопросы

1. Термодинамическая температурная шкала.
2. Методы градуировки термодатчиков.
3. Принцип измерения температуры термопарным термометром.
4. Основные факторы, влияющие на точность измерения температуры с помощью термопары.

Литература

1. Температурные измерения / под редакцией О.А. Геращенко. Киев: Наукова думка. 1989.
2. Шпильрайн Э.Э., Кессельман П.М. Основы теории теплофизических свойств веществ. М.: Энергия, 1977.
3. Малков М.П. и др. Справочник по физико-техническим основам глубокого охлаждения. М.: Госэнергоиздат, 1963.

Приложение 1. Стандартная таблица для термопары медь-константан

Температура, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-100	-3,378	-3,407	-3,435	-3,463	-3,491	-3,519	-3,547	-3,574	-3,602	-3,629
-90	-3,089	-3,118	-3,147	-3,177	-3,206	-3,235	-3,264	-3,293	-3,321	-3,350
-80	-2,788	-2,818	-2,849	-2,879	-2,909	-2,939	-2,970	-2,999	-3,029	-3,059
-70	-2,475	-2,507	-2,539	-2,570	-2,602	-2,633	-2,664	-2,695	-2,726	-2,757
-60	-2,152	-2,185	-2,218	-2,250	-2,283	-2,315	-2,348	-2,380	-2,412	-2,444
-50	-1,819	-1,853	-1,886	-1,920	-1,953	-1,987	-2,020	-2,053	-2,087	-2,120
-40	-1,475	-1,510	-1,544	-1,579	-1,614	-1,648	-1,682	-1,717	-1,751	-1,785
-30	-1,121	-1,157	-1,192	-1,228	-1,263	-1,299	-1,334	-1,370	-1,405	-1,440
-20	-0,757	-0,794	-0,830	-0,867	-0,903	-0,940	-0,976	-1,013	-1,049	-1,085
-10	-0,383	-0,421	-0,458	-0,496	-0,534	-0,571	-0,608	-0,646	-0,683	-0,720
0	0,000	0,039	0,078	0,117	0,156	0,195	0,234	0,273	0,312	0,351
10	0,391	0,430	0,470	0,510	0,549	0,589	0,629	0,669	0,709	0,749
20	0,789	0,830	0,870	0,911	0,951	0,992	1,032	1,073	1,114	1,155
30	1,196	1,237	1,279	1,320	1,361	1,403	1,444	1,486	1,528	1,569
40	1,611	1,653	1,695	1,738	1,780	1,822	1,865	1,907	1,950	1,992
50	2,035	2,078	2,212	2,164	2,207	2,250	2,294	2,337	2,380	2,424
60	2,467	2,511	2,555	2,599	2,643	2,687	2,731	2,775	2,819	2,864
70	2,908	2,953	2,997	3,042	3,087	3,131	3,167	3,221	3,266	3,312
80	3,357	3,402	3,447	3,493	3,538	3,584	3,630	3,676	3,721	3,767
90	3,813	3,859	3,906	3,952	3,998	4,044	4,091	4,137	4,184	4,231
100	4,277	4,324	4,371	4,418	4,465	4,512	4,559	4,607	4,654	4,701

УДЕЛЬНЫЙ ОБЪЕМ

Удельный объем – объем, занимаемый единицей массы вещества. Для однородного вещества удельный объем равен

$$v = \frac{V}{M}, \quad (1)$$

где V – объем тела, M – его масса. Единица измерения удельного объема в системе СИ – $\text{м}^3/\text{кг}$. Величина, обратная удельному объему, называется плотностью $\rho = 1/v$.

За единицу удельного объема принимается удельный объем такого однородного вещества, 1 кг массы которого занимает объем 1 м^3 . Т.е., 1 единица удельного объема = 1 $\text{м}^3/1 \text{ кг} = 1 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Удельные объемы твердых тел, а так же жидкостей при температурах ниже критической, незначительно изменяются с ростом давления, если не считать области сверхвысоких давлений. Зависимость удельного объема многих из этих веществ от температуры также сравнительно невелика.

По этой причине приобретает особое значение методика определения удельных объемов твердых тел и жидкостей в обычных условиях, т.е. при атмосферном или близком к нему давлении и в довольно узком интервале комнатных температур. Следует отметить также относительную простоту проведения эксперимента в таких условиях.

Удельный объем газов и паров весьма сильно зависит от давления и температуры, однако, несмотря на это, определение удельных объемов этих веществ в обычных условиях также имеет большое практическое значение.

Удельный объем является интенсивным термодинамическим параметром и относится к категории термических параметров, также как давление и температура. Он выбирается часто в качестве независимого параметра, в частности, при составлении уравнений состояния и построении фазовых диаграмм.

Связь удельного объема с некоторыми термодинамическими функциями и свойствами

С термодинамической точки зрения химический μ (или удельный изобарно-изотермический φ) потенциал системы является функцией давления и температуры. Удельный объем представляет собой первую производную от этого потенциала по давлению при постоянной температуре

$$v = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial p} \right)_T. \quad (2)$$

Одной из характерных особенностей твердых тел является их чрезвычайно малая сжимаемость, которая выражается в изменении удельного объема под давлением

$$\chi_T = -\frac{1}{\nu} \left(\frac{\partial \nu}{\partial p} \right)_T. \quad (3)$$

Выражение для абсолютного изменения удельного объема с давлением при постоянной температуре имеет следующий вид

$$\Delta \nu = \int \left(\frac{\partial \nu}{\partial p} \right) dp. \quad (4)$$

Удельный объем твердых тел существенно изменяется лишь при сжатии до огромных давлений – порядка $10-10^3$ ГПа. Аномально малую сжимаемость имеет, например, алмаз – при увеличении давления до 10^2 ГПа его удельный объем уменьшается всего лишь на 1.5%.

Степень изменения удельного объема с изменением температуры характеризует коэффициент объемного теплового расширения

$$\beta = \frac{1}{\nu} \left(\frac{\partial \nu}{\partial T} \right)_p. \quad (5)$$

Существуют макро- и микроскопические методы определения удельного объема твердых тел. К первой группе методов относятся.

1. Метод гидростатического взвешивания.
2. Метод ареометра.
3. Метод повисания.
4. Метод пикнометра.

Второй метод применим только для кристаллических тел, так как он основан на расчете величины удельного объема по кристаллографическим данным.

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ОБЪЕМА

Цель работы: Ознакомление с методами измерения удельного объема. Экспериментальное определение удельного объема кристалла методом пикнометра и расчет его по кристаллографическим данным.

Пикнометрический метод измерения удельного объема

Пикнометрический метод является наиболее распространенным и точным среди методов первой группы. К тому же он универсален, так как позволяет определять удельный объем твердых тел неправильной формы (кристаллических, аморфных, порошкообразных).

Пикнометрами называются небольшие сосуды с узким горлышком, выполненные обычно из стекла, а иногда и из кварца. Пикнометры могут быть наполнены жидкостью до определенной метки, объем жидкости при этом точно известен. Так как объем пикнометра зависит от температуры, то лучшие пикнометры снабжают термометрами и изготавливают из кварца, температурный коэффициент расширения которого крайне мал. При работе с пикнометрами следует обращать особое внимание на наполнение их жидкостью. Жидкость в пикнометр вводится при помощи пипетки или шприца. Небольшие излишки жидкости удаляют кусочком фильтровальной бумаги. При наполнении пикнометра необходимо следить за тем, чтобы в нем не осталось пузырьков воздуха. Чтобы достичь этого, необходимо после наполнения пикнометра жидкостью нагреть ее до температуры кипения. После нагрева, прежде чем приступить к измерениям, пикнометр охлаждают до комнатной температуры.

Взвешивание пикнометра можно производить только после удаления следов жидкости на его наружной поверхности с помощью фильтровальной бумаги.

Определение удельного объема методом пикнометра осуществляется следующим образом. Пустой пикнометр, применяемый для работы с твердыми телами, заполняют, как указано выше, жидкостью (обычно дистиллированной водой) до определенной метки.

Затем проводят следующие операции.

1. Производят взвешивание пикнометра на аналитических весах. Массу пикнометра с жидкостью в воздухе обозначим через M_1 .
2. Определяют массу искомого образца (образцов) – M .
3. На следующем этапе в пикнометр опускают предварительно взвешенные кусочки твердого тела, удельный объем которого требуется определить. При этом жидкость поднимается выше метки, а иногда излишек жидкости выливается из пикнометра. С необходимой

предосторожностью фильтровальной бумагой удаляют лишнее, находящееся выше метки, количество жидкости из пикнометра, а также капельки жидкости, которые могут быть на его наружной поверхности. После этого на аналитических весах взвешивают пикнометр с жидкостью и кусочками твердого тела.

Обозначим через M_2 массу пикнометра с жидкостью и кусочками твердого тела в воздухе. Тогда масса вытесненной из пикнометра жидкости (не приведенная к пустоте) составит:

$$M_{\text{ж}} = M_1 + M - M_2, \quad (1)$$

а истинная масса вытесненной из пикнометра жидкости

$$G_{\text{ж}} = M_{\text{ж}} + M_{\text{возд}} = M_{\text{ж}} + V \times \rho_{\text{возд}}, \quad (2)$$

где V – объем вытесненной жидкости, равный объему кусочков твердого тела, $\rho_{\text{возд}}$ – плотность воздуха при давлении и температуре, соответствующих месту проведения опыта.

Имея в виду, что $G_{\text{ж}} = V \times \rho_{\text{ж}}$, получим

$$V = \frac{M_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{возд}}} = \frac{M + M_1 - M_2}{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{возд}}}. \quad (3)$$

Искомый удельный объем твердого тела определится теперь из следующего выражения:

$$\nu = \frac{V}{M + V \times \rho_{\text{возд}}} = \frac{1}{\left(\frac{M}{M + M_1 - M_2} \right) \times (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{возд}}) + \rho_{\text{возд}}}. \quad (4)$$

Оценить погрешность определения удельного объема можно по формуле

$$\frac{\delta \nu}{\nu} = \left(2 \frac{\delta M}{M} + \frac{\delta M_1}{M_1} + \frac{\delta M_2}{M_2} + \frac{\delta \rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} + 2 \frac{\delta \rho_{\text{возд}}}{\rho_{\text{возд}}} \right). \quad (5)$$

Плотность воды и воздуха при 20°C и погрешности их определения составляют: $\rho_{\text{ж}} = 998.2 \text{ кг/м}^3$, $\delta \rho_{\text{ж}} = 2 \times 10^{-7} \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{возд}} = 1.2047 \text{ кг/м}^3$, $\delta \rho_{\text{возд}} = 2 \times 10^{-7} \text{ кг/м}^3$. Ошибки взвешивания образца, пикнометра с жидкостью и с образцом определяются классом используемых в работе весов. Для весов ВЛР-1

(класс точности 3), используемых в настоящей лабораторной работе, $\delta M = \delta M_1 = \delta M_2 = 10^{-5}$ кг.

Расчет удельного объема из кристаллографических данных

Удельный объем кристаллических твердых тел может быть определен с использованием сведений о симметрии кристалла и параметрах его элементарной ячейки, полученных в экспериментах на рентгеновском или нейтронном дифрактометрах.

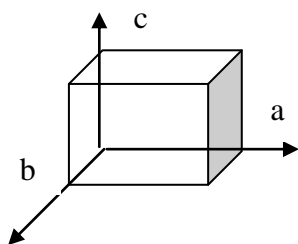
Выражение для расчета величины ν имеет следующий вид

$$\nu = \frac{V_{\text{эл.яч.}} \times N_A}{\mu \times Z}, \quad (6)$$

где $V_{\text{эл.яч.}}$ – объем элементарной ячейки, $N_A = 6,022 \times 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро, μ – молекулярная масса кристалла, Z – число формульных единиц в элементарной ячейке кристалла.

Ниже приведены структурные данные для ряда кристаллов, из которых выбирается образец для исследований в рамках настоящей лабораторной работы.

PbCl₂ – котунит. При комнатной температуре симметрия элементарной ячейки кристалла – ромбическая со следующими параметрами: **a = 4.52 10⁻¹⁰ м**, **b = 7.60 10⁻¹⁰ м**, **c = 9.03 10⁻¹⁰ м**. Число формульных единиц в элементарной ячейке **Z = 4**. В случае ромбической симметрии $V_{\text{эл.яч.}} = \mathbf{a} \times \mathbf{b} \times \mathbf{c}$.



Al₂O₃ – корунд. При комнатной температуре симметрия кристалла тригональная с параметрами **a = 5.12 × 10⁻¹⁰ м**, **α = 55°17'**. Число формульных единиц в элементарной ячейке **Z=2**. В этом случае объем элементарной ячейки вычисляется по формуле

$$V_{\text{эл.яч.}} = a^3 \times (1 - \cos \alpha) \times \sqrt{1 + 2 \cos \alpha} \quad (7)$$

SrTiO₃ – перовскит. При комнатной температуре имеет кубическую симметрию с параметром **a = 3.91 × 10⁻¹⁰ м**. Число формульных единиц в элементарной ячейке **Z = 1**.

$\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ – германат висмута. При комнатной температуре симметрия кристалла кубическая с параметром $a = 10.15 \times 10^{-10}$ м. Число формульных единиц в элементарной ячейке $Z = 2$.

Ошибка определения удельного объема из рентгенографических данных оценивается по формуле

$$\frac{\delta v}{v} = \frac{\delta V}{V} + \frac{\delta \mu}{\mu} = 3 \times \frac{\delta a}{a} + \frac{\delta \mu}{\mu} \quad (8)$$

Абсолютные погрешности определения объема элементарной ячейки и молекулярной массы составляют соответственно: $\delta a \approx 1 \times 10^{-13}$ м, $\delta \mu \approx 1 \times 10^{-2}$ г/моль.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с методикой определения удельного объема твердых тел макро- и микроскопическими методами.
2. Выполнить измерения удельного объема одного из кристаллических тел, указанных в настоящем методическом пособии, методом пикнометра. (Объект исследования определяет преподаватель.) Все операции, связанные с взвешиванием, на весах ВЛР-1, выполнять только после получения инструкций от преподавателя.
3. Выполнить расчет величины удельного объема того же кристаллического тела (см. п. 2) на основе кристаллографических данных.
4. Сравнить удельные объемы, полученные двумя методами, с учетом ошибки их определения.

Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- 1) таблицу выполненных взвешиваний и расчет удельного объема;
- 2) расчет удельного объема по кристаллографическим данным;
- 3) расчеты погрешности измерений и сравнение величин удельного объема, полученных двумя методами.

Контрольные вопросы

1. Удельный объем и его связь с другими термодинамическими свойствами.
2. Методы определения удельного объема.
3. Основные факторы, влияющие на точность определения удельного объема.

Литература

1. Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1983.
2. Шпильрайн Э.Э., Кессельман П.М. Основы теории теплофизических свойств веществ. М.: Энергия, 1977.

ТЕПЛОВОЕ РАСШИРЕНИЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Тепловое расширение представляет собой изменение размеров тела в процессе изменения его температуры.

Взаимодействие атомов твердого тела складывается из сил электростатического притяжения и сил отталкивания. Силы эти изменяются по-разному в зависимости от расстояния между взаимодействующими атомами. В твердых телах тепловое расширение связано с несимметричностью (ангармонизмом) тепловых колебаний атомов, благодаря чему при изменении температуры меняется среднее равновесное положение атомов друг относительно друга (межатомные расстояния). И это приводит к изменению объема твердого тела.

Степень изменения объема характеризуется объемным коэффициентом теплового расширения β :

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p, \quad (1)$$

где V – начальный объем тела.

Экспериментально значение коэффициента объемного расширения измеряется не при определенной температуре, а в некотором температурном интервале. При этом соотношение (1) записывается в виде

$$\bar{\beta} = \frac{1}{V_1} \frac{\Delta V}{\Delta T}, \quad (2)$$

где $\bar{\beta}$ – среднее значение коэффициента объемного расширения в температурном интервале $\Delta T = T_2 - T_1$; T_2 и T_1 – конечная и начальная температуры интервала; $\Delta V = V_2 - V_1$ – соответствующее изменение объема.

То есть, **объемный коэффициент теплового расширения** – это относительное изменение объема при нагревании тела на один градус. Если β в интервале температур ΔT является величиной постоянной, то $\beta = \Delta V / (V \times \Delta T)$ и, положив $\Delta V = V$, $\Delta T = 1$ градус, найдем, что 1 единица коэффициента объемного расширения = $V / (V \times 1 \text{ град}) = 1 \text{ град}^{-1}$.

За единицу коэффициента объемного расширения принимается коэффициент объемного расширения такого вещества, тело из которого при нагревании на один градус увеличивало бы объем в два раза.

Степень изменения линейных размеров тела при изменении температуры характеризуется линейными коэффициентами теплового расширения α . Для изотропных твердых тел коэффициент теплового расширения α не зависит от направления и равен $\beta/3$. Анизотропия кристалла приводит к анизотропии физических свойств, в том числе и к анизотропии теплового расширения. В

этом случае **линейный коэффициент теплового расширения**, выражающий относительное изменение длины тела при изменении его температуры на один градус, определяется как:

$$\alpha_i = \frac{1}{l_i} \left(\frac{\partial l_i}{\partial T} \right)_p, \quad (3)$$

где l_i – начальная длина образца в измеряемом направлении.

Используя вышеизложенные рассуждения относительно $\bar{\beta}$, можно записать выражение для экспериментально определяемой величины коэффициента линейного теплового расширения

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{l_1} \frac{\Delta l}{\Delta T}. \quad (4)$$

Тогда при $\Delta l = l$, 1 единица коэффициента линейного расширения = $l/(l_i \times \Delta T) = 1 \text{ К}^{-1}$.

Объемный коэффициент теплового расширения связан с коэффициентом линейного расширения следующим соотношением:

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = \frac{1}{l_1 l_2 l_3} \left(\frac{\partial (l_1 l_2 l_3)}{\partial T} \right) = \frac{1}{l_1} \left(\frac{\partial l_1}{\partial T} \right) + \frac{1}{l_2} \left(\frac{\partial l_2}{\partial T} \right) + \frac{1}{l_3} \left(\frac{\partial l_3}{\partial T} \right) = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 \quad (5)$$

Средние значения коэффициентов расширения $\bar{\beta}$ и $\bar{\alpha}$, вычисленные по (2) и (4), совпадают с истинными значениями, определяемыми по (1) и (3), если коэффициент расширения является величиной постоянной или линейно зависит от температуры.

Тепловое расширение твердых тел и материалов – одна из важнейших физических и технических характеристик. Сведения об этом свойстве необходимы и в геологии, и в физике (искусственные и природные кристаллы). Тепловое расширение твердых тел учитывается при конструировании всех установок и машин, работающих в переменных температурных условиях (оси точных механизмов, подшипники, пластины полупроводников, детали и узлы механизмов).

Таблица 1

Коэффициенты линейного теплового расширения некоторых металлов и сплавов.

Материал	Al	Cu	Fe	Pb	K	Pt	Сталь3
$\alpha, 10^{-6} \text{ К}^{-1}$	25	16	12	29	83	9	10-18

Связь теплового расширения с другими термодинамическими величинами

Рассмотреть вопрос о тепловом расширении можно также и в чисто термодинамическом аспекте. Одно из уравнений Максвелла имеет следующий вид:

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = -\left(\frac{\partial S}{\partial p}\right)_T, \quad (6)$$

где S - энтропия, p – давление.

Преобразовав (6) с помощью якобианов, получим

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p = -\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T, \quad (7)$$

или

$$\frac{\beta}{\chi_T} = \left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T, \quad (8)$$

где $\chi_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T$ - изотермическая сжимаемость, а β - коэффициент объемного теплового расширения.

Так как теплоемкость при постоянном объеме связана с энтропией следующим соотношением

$$C_V = T \left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_V, \quad (9)$$

то из (8) следует:

$$\beta = -\frac{C_V \chi_T}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S. \quad (10)$$

Перепишем полученное выражение в виде

$$\beta = -\left(\frac{\partial \ln T}{\partial \ln V}\right)_S \frac{C_V \chi_T}{V} = \gamma \frac{C_V \chi_T}{V}. \quad (11)$$

Таким образом, получено соотношение (11), связывающее коэффициент объемного теплового расширения с изохорной теплоемкостью и изотермической сжимаемостью, называемое соотношением Грюнайзена. Величина γ (параметр Грюнайзена) характеризует изменение температуры тела при адиабатическом изменении объема.

Еще одно важное уравнение, связывающее между собой величины теплоемкостей C_p , C_v и коэффициента объемного теплового расширения, может быть получено следующим образом. Дифференцируя выражение для энтальпии

$$H = U + pV \quad (12)$$

по температуре при $p = \text{const}$, получаем

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_p + p\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p. \quad (13)$$

Используя некоторые дифференциальные уравнения термодинамики, можно установить следующее соотношение

$$\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_p = C_v + T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p - p\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p. \quad (14)$$

Подставляя соотношение (14) в (13), находим искомое уравнение

$$C_p - C_v = T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p. \quad (15)$$

С использованием фундаментального дифференциального уравнения термодинамики

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_p\left(\frac{\partial V}{\partial p}\right)_T = -1, \quad (16)$$

можно получить более наглядное выражение, устанавливающее связь между величинами C_p , C_v и $\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p$:

$$C_p - C_v = T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p^2. \quad (17)$$

Дилатометрия

Дилатометрия – раздел физики и измерительной техники, изучающий зависимость изменения размеров тела от воздействия внешних условий: температуры, давления, электрических и магнитных полей, ионизирующих излучений и т.д. В основном дилатометрия изучает тепловое расширение тел и его различные аномалии, связанные, например, с фазовыми переходами. Приборы, применяемые в дилатометрии, называются **дилатометрами**.

Для измерения коэффициентов теплового расширения применяются дилатометры, в основе работы которых лежат различные методы. *Единственным* методом, позволяющим непосредственно определять объемный коэффициент теплового расширения твердых тел, является **пикнометрический метод**. Его принципиальная схема показана на рис. 1.

Дилатометрическая ячейка, как правило, выполняется из стекла и состоит из стакана 1 и капиллярной трубки 2, в совокупности образующих пикнометр. Исследуемый образец 3 помещается в дилатометрическую ячейку через нижний конец стакана, после чего стакан запаивается (в некоторых вариантах дилатометрическая ячейка делается разборной). После этого дилатометрическая ячейка заполняется теплопередающей жидкостью и закрепляется в термостате 4, который используется для изменения температуры образца. В качестве теплопередающей жидкости чаще всего применяются ртуть или этиловый спирт. Жидкость предварительно должна быть тщательно обезгажена, так как присутствие газов приводит к значительным и неконтролируемым ошибкам. При изменении температуры объем образца изменяется, что влечет за собой перемещение жидкости по капилляру. Таким образом, в данном методе изменению объема образца ставится в соответствие изменение уровня жидкости в капилляре. Положение уровня фиксируется с помощью катетометра (Катетометр – оптический прибор для измерения уровня жидкости). На положение уровня жидкости в капилляре, кроме изменения объема образца, влияют еще два фактора: изменение объема жидкости и изменение объема стакана при изменении температуры. В результате изменение объема образца определяется соотношением

$$\Delta V_{OBR} = A(h_2 - h_1)S - \Delta V_{TЖ} + \Delta V_{СТ}, \quad (18)$$

где A – постоянная катетометра (размерный множитель); h_1 и h_2 – отсчеты по катетометру при температурах T_1 и T_2 ; S – площадь сечения капилляра; $\Delta V_{TЖ}$ – изменение объема жидкости в температурном интервале $\Delta T = T_2 - T_1$; $\Delta V_{СТ}$ – изменение объема стакана в температурном интервале ΔT . Величины $\Delta V_{TЖ}$ и $\Delta V_{СТ}$ могут быть вычислены, если известны коэффициенты расширения жидкости и материала, из которого изготовлен стакан, а также объем передающей жидкости и объем стакана. Вычислив ΔV_{OBR} , можно определить

объемный коэффициент теплового расширения образца из соотношения (2). Из (18) следует, что данный метод измерений является относительным, так как расширение исследуемого образца определяется относительно расширения теплопередающей жидкости. Температурный интервал, в котором можно применять рассматриваемый метод, ограничен температурами затвердевания и кипения жидкости и обычно лежит в пределах 220 – 370 К. Чувствительность метода определяется диаметром капилляра и чувствительностью катетометра, и, как правило, не превышает $\sim 10^{-4}$ см. Точность метода ограничена точностью определения величин $\Delta V_{ТЖ}$ и $\Delta V_{СТ}$. Главное преимущество данного метода по сравнению с остальными дилатометрическими методами заключается в том, что с его помощью можно проводить исследования теплового расширения порошкообразных образцов и образцов неправильной формы.

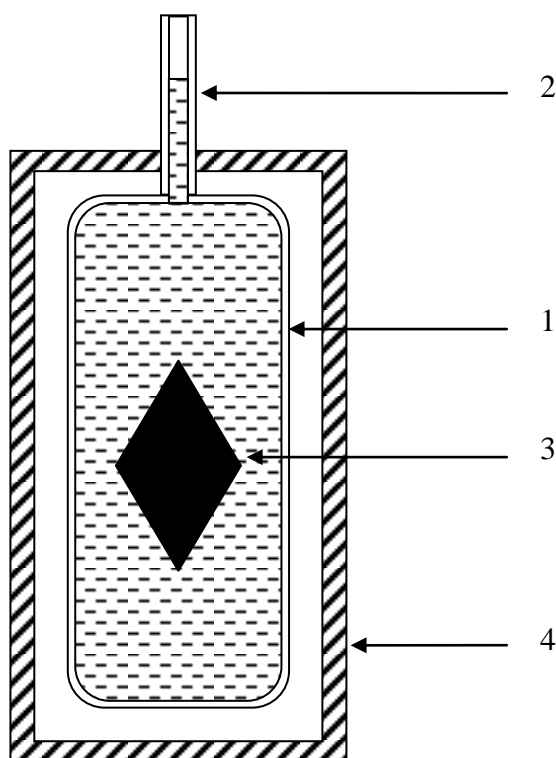


Рис. 1. Принципиальная схема объемного дилатометра. 1 – стакан, 2 – капиллярная трубка, 3 – исследуемый образец, 4 – термостат.

Типы дилатометров

Для определения коэффициентов линейного теплового расширения используются многочисленные методы, в основе которых лежит изменение какого-либо физического свойства, обусловленное изменением размеров исследуемого тела.

1. В ёмкостных дилатометрах изменение размеров образца изменяет ёмкость конденсатора, который служит датчиком. Чувствительность этого метода составляет $\sim 10^{-9}$ см.
2. В индукционных дилатометрах (чувствительность $\sim 10^{-9}$ см) при изменении размеров образца изменяется взаимное положение двух катушек индуктивности, а, следовательно, их взаимная индуктивность.
3. В интерференционных дилатометрах (чувствительность $\sim 10^{-8}$ см) исследуемый образец помещают между двумя оптическими пластинами и получают интерференционную картину при освещении их монохроматическим светом. Об изменении размеров образца судят по смещению интерференционных полос.
4. В оптико-механических дилатометрах (чувствительность $\sim 10^{-6} - 10^{-7}$ см) изменение размеров образца вызывает соответствующее смещение светового указателя.

Существует также возможность определения изменения размеров образца с помощью рентгеновского структурного анализа по изменению параметров кристаллической решетки образца.

В настоящей работе предлагается ознакомиться с одним из наиболее универсальных и надежных методов – методом оптико-механического дилатометра.

Лабораторная работа № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОВОГО РАСШИРЕНИЯ

Цель работы: Ознакомиться с устройством и принципом работы оптико-механического кварцевого дилатометра. Выполнить измерения температурной зависимости удлинения образца и рассчитать величины коэффициента теплового линейного расширения при постоянном давлении.

Оптико-механический (кварцевый) дилатометр

Оптико-механический (кварцевый) дилатометр предназначен для определения с большой точностью абсолютных значений линейных коэффициентов теплового расширения твердых тел и состоит из вакуумной камеры (1) с измерительным блоком (2), размещаемыми в термостате (криостате) (3), и оптико-механической системы (рис. 1). Рабочий интервал температур дилатометра от 80 до 600 К.

Схема установки

Плоскопараллельный образец (4), длина l_0 которого предварительно измеряется при комнатной температуре, устанавливается под один из кварцевых штоков (5) в измерительном блоке. Другой шток упирается непосредственно в дно блока. На дне измерительного блока, рядом с образцом расположен датчик температуры – платиновый термометр сопротивления (6). При изменении температуры блока и образца на величину ΔT происходит как удлинение образца ($\alpha \cdot l_0 \cdot \Delta T$), так и изменение линейного размера равного ему по длине участка второго кварцевого штока ($\alpha_{кв} \cdot l_0 \cdot \Delta T$). Разность этих удлинений передается магнитным ярмам (7), закрепленным на свободных концах штоков, и преобразуется в изменение угла поворота зажатого между ярмами ролика (8) (диаметром d), на котором укреплено миниатюрное зеркальце. Угол поворота зеркальца измеряется с помощью автоколлиматора (9) с фокусным расстоянием F и окуляр-микрометра (10) с ценой деления r .

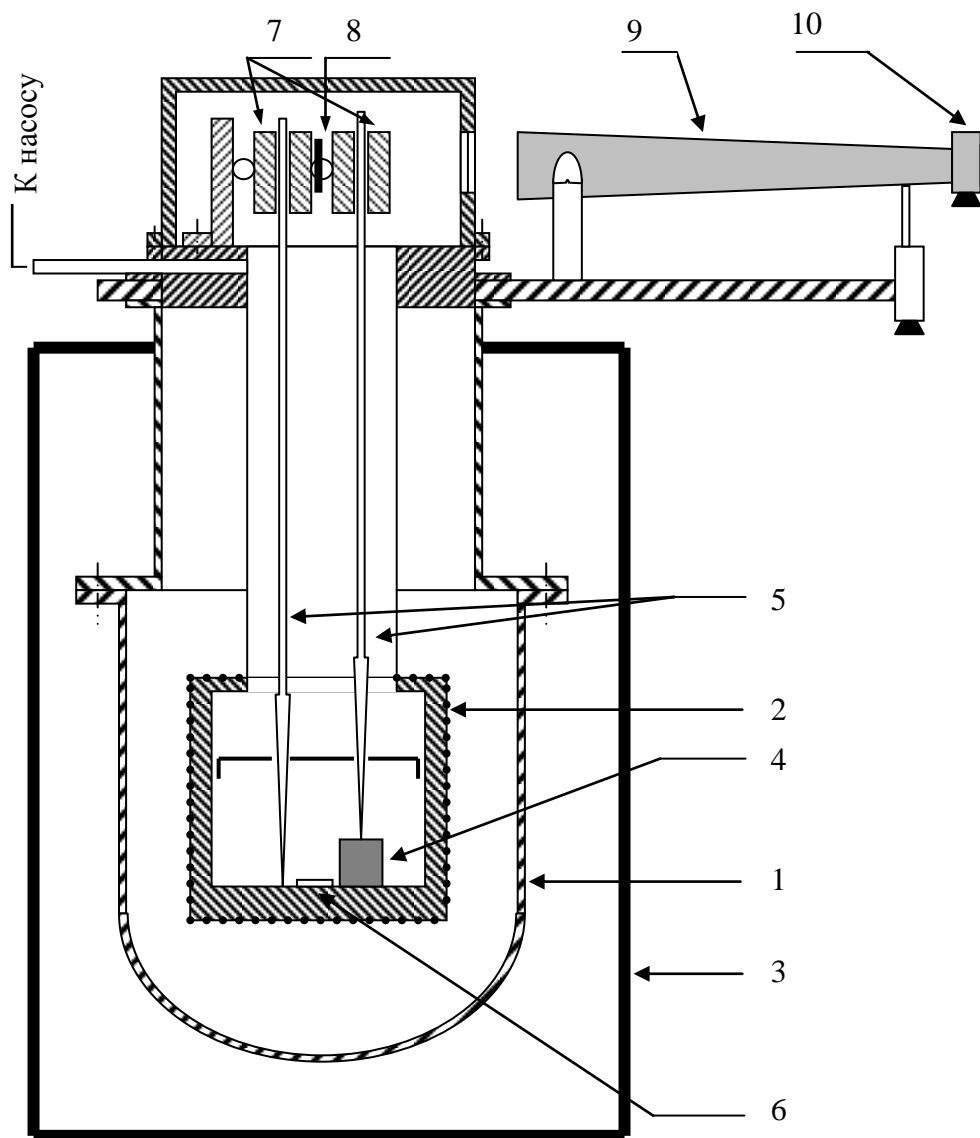


Рис. 1. Схематическое устройство опико-механического дилатометра. 1 – вакуумная камера, 2 – измерительный блок, 3 – термостат (криостат), 4 – исследуемый образец, 5 – кварцевые штоки, 6 – термометр сопротивления, 7 – магнитные ярма, 8 – ролик с зеркальцем, 9 – автоколлиматор, 10 – окуляр-микрометр.

При этих условиях изменение длины исследуемого образца выражается формулой:

$$\Delta l = \frac{r \times d}{2F} \times \Delta N = A \times \Delta N, \quad (1)$$

где ΔN – угол поворота зеркальца в единицах окуляр-микрометра; $A=1.21 \times 10^{-6}$ см – константа, определяющая чувствительность используемого в работе прибора.

Коэффициент теплового расширения образца вычисляется по формуле:

$$\alpha = \frac{A}{l_0} \times \frac{\Delta N}{\Delta T} + \alpha_{\text{кв}}, \quad (2)$$

где $\alpha_{\text{кв}}$ – коэффициент теплового расширения кварца, $\Delta T = T_{i+1} - T_i$. Вычисленный таким образом коэффициент теплового расширения относится к средней температуре $T_{\text{cp}} = (T_i + T_{i+1})/2$.

Погрешность измерений

Расчетная погрешность дилатометра определяется формулой:

$$\xi_{\alpha} = \left(1 - \frac{\alpha_{\text{кв}}}{\alpha}\right) \left(\xi_d \times \xi_F \times \xi_{l_0} \times \xi_{\Delta T} \times \xi_{\Delta N}\right) + \frac{\alpha_{\text{кв}}}{\alpha} \xi_{\alpha_{\text{кв}}}, \quad (3)$$

где ξ_i - предельные относительные погрешности определения величин, указанных в виде индексов. Для многих диэлектриков $\alpha \approx 1 \times 10^{-5} \text{ К}^{-1}$. Средняя величина коэффициента теплового расширения плавленого кварца - $\alpha_{\text{кв}} = 5 \times 10^{-7} \text{ К}^{-1}$. Используемый в дилатометре ролик имеет диаметр 0.1008 см, определенный с погрешностью $\pm 6 \times 10^{-4}$ см, следовательно, $\xi_d = \pm 0.06\%$. Для автоколлиматора с фокусным расстоянием $F = 41.7 \pm 0.1$ см имеем $\xi_F = \pm 0.24\%$. Величина погрешности линейных размеров образца при измерениях на оптическом длинномере составляет $\delta l_0 = \pm 3 \times 10^{-4}$ см, что приводит при $l_0 \approx 1$ см к $\xi_{l_0} = \pm 0.03\%$. Величина N_i измеряется окуляр-микрометром с погрешностью $\delta N = \pm 2 \times 10^{-6}$, и при температурном шаге измерений $\Delta T = 10 \text{ К}$ относительная погрешность составит $\xi_{\Delta N} = \pm 2\%$. Погрешность определения температурного шага измерений ΔT равна $\xi_{\Delta T} = \pm 0.1\%$. Таким образом, предельная расчетная погрешность дилатометра составляет $\pm 3.1\%$ при чувствительности к удлинению 1.21×10^{-6} см.

Схема термостатирования и измерения температуры

Системы термостатирования (поддержания постоянной температуры) измерительного блока и измерения температуры исследуемого образца совмещены (рис. 2). Постоянство температуры термостата в зависимости от исследуемого температурного интервала обеспечивается заполнением его либо хладагентом (жидким азотом), либо проточной водой. Тепловой контакт между образцом и окружающей средой (термостатом) исключается путем создания разрежения в вакуумной камере (рис. 1). Температура измерительного блока и,

соответственно, образца задается, измеряется и регулируется с помощью системы термостатирования, блок-схема которой представлена на рис. 2. Датчиком температуры служит платиновый термометр сопротивления, включенный в цепь потенциометра Р-348.

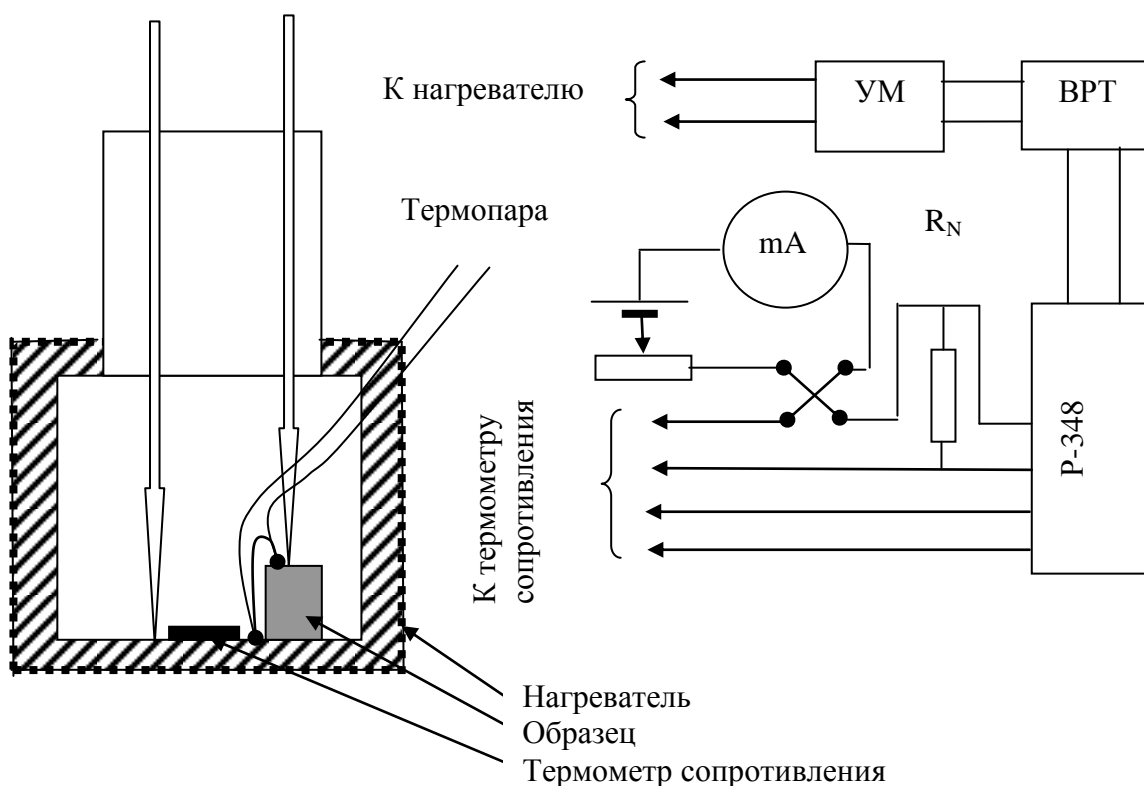


Рис. 2. Схема термостатирования и измерения температуры.

Сигнал разбаланса между напряжением на термометре сопротивления и напряжением, заданным на потенциометре, подается на высокоточный регулятор температуры ВРТ, который формирует необходимый закон регулирования тока в цепи нагревателя измерительного блока. Для контроля градиента температуры по длине образца используется медь-константовая термопара, подсоединенная к фотоусилителю Ф116. Схема термостатирования обеспечивает точность поддержания температуры образца не хуже 0.001 К в течении нескольких часов.

Температура образца, уточненная относительно заданного значения, определяется по градуировочной таблице платинового термометра сопротивления $T(R_t)$. Величина сопротивления R_t рассчитывается по измерениям падения напряжения на термометре (U_t) и образцовом сопротивлении R_N (U_N) по формуле:

$$R_t = \frac{U_t}{U_N} R_N \quad (4)$$

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с принципом работы и конструкцией оптико-механического кварцевого дилатометра.
2. Ознакомиться с правилами работы на потенциометре Р-348 и произвести его настройку (см. Приложение 2 к Лабораторной работе N 1). **(Переключатель чувствительности (4) при всех операциях переключения рода работы (3) должен быть установлен на 10^{-2} !)**
3. С помощью измерительных декад ряда U_1 установить на потенциометре величину U_t , соответствующую начальной температуре измерений (см. градуировочную таблицу термометра). Постепенно, по мере уменьшения сигнала разбаланса на стрелочном приборе потенциометра в результате работы системы терморегулирования, необходимо увеличивать чувствительность (4) и на пределе 10^{-6} переключить регулятор температуры ВРТ в автоматический режим. После выдержки в течение 10-15 минут провести измерения показаний автоколлиматора, то есть зафиксировать и записать положение метки в поле окуляр-микрометра, соответствующее величине N . Используя измерительные декады ряда U_2 , произвести измерения величины U_N .
4. Уменьшить чувствительность потенциометра и изменить (увеличить) U_1 (т.е. U_t) на величину, соответствующую температурному шагу $\sim 10\text{K}$. Выполнить операции предыдущего пункта.
5. Повторить 4-5 раз операции, описанные в пунктах 2 и 3. Составить таблицу экспериментальных данных (см. пример заполнения в Приложении 1 к данной работе).
6. Используя программу для обработки результатов измерения (см. Приложение 2 к данной работе), рассчитать начальные T_1 и конечные T_2 температуры, коэффициенты теплового расширения исследуемого образца α и построить график зависимости $\alpha(T)$.
7. Рассчитать изменение длины образца в исследованном интервале температур и погрешность выполненных измерений.

Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- 1) выражения для расчета α и ξ_α ;
- 2) подробную таблицу экспериментальных данных;
- 3) график зависимости $\alpha(T)$;
- 4) расчет погрешности выполненных измерений.

Контрольные вопросы

1. Тепловое расширение. Связь коэффициентов линейного и объемного расширений.
2. Дилатометрия. Типы дилатометров.
3. Принцип измерения коэффициентов расширения на оптико-механическом кварцевом дилатометре.
4. Основные факторы, влияющие на точность измерения теплового расширения методом оптико-механического дилатометра.

Литература

1. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука, 1974.
2. Шпильрайн Э.Э., Кессельман П.М. Основы теории теплофизических свойств веществ. М.: Энергия, 1977.
3. Очков В.Ф. Mathcad PLUS 6.0 для студентов и инженеров. М.: КомпьютерПресс, 1996

Приложение 1. Пример заполнения таблицы экспериментальных данных

U_1	U_2	$R_T = \frac{U_1}{U_2} R_N$	T	ΔT	T_{cp}	N	ΔN	$\frac{\Delta N}{\Delta T} \frac{A}{I_0} = M$	$\alpha_{обр} = M + \alpha_{кв}$
мВ	мВ	Ом	К	К	К	Дел	Дел	К ⁻¹	К ⁻¹
103.1050	94.5590	109.03992	295.4202			705			
				11.7739	301.2132		26	6.22 10 ⁻⁶	6.67 10 ⁻⁶
107.4900	94.5588	113.67757	307.1941			679			
				9.4379	311.9131		19	5.67 10 ⁻⁶	6.14 10 ⁻⁶
110.9900	94.5584	117.3795	316.6320			660			

Приложение 2. Пример расчета экспериментальных данных и программа для обработки результатов измерений в MATHCAD

Градуировочная функция платинового термометра.

Вводятся коэффициенты аппроксимирующей функции и сама функция

a := 34.9661782

b := 2.53014349

c := 5.8435310⁻⁵

d := -0.9760326

e := -48.839779

$$f(x) := a + b \cdot x + c \cdot x^{2.5} + \frac{d \cdot x}{\ln(x)} + e \cdot x^{-2}$$

Тепловое расширение кварца.

Ввод файла-таблицы данных для кварцевого стержня.

:= 

D:\..\Kvarz.xls

ik := 0.. rows(kv) - 1

- Аппроксимация теплового расширения кварца сплайнами

S2 := cspline(kv^{<0>}, kv^{<1>})

fitk(x) := interp(S2, kv^{<0>}, kv^{<1>}, x)

Параметры прибора.

Ввод параметров установки и сопротивления эталонного сопротивления в цепи термометра.

A := 1.21 · 10⁻⁶

RN := 100.00%

Ввод размера образца в направлении измерения (в см).

$l := 0.429$

Ввод результатов измерения напряжения на платиновом термометре (U1), напряжения на эталонном сопротивлении (U2) и показаний автоколлиматора (N).

data :=

	0	1	2
0	101.155	94.5447	733
1	105.73	94.5431	709
2	109.2776	94.5431	689
3	113.061	94.5448	669
4	117.01	94.5449	645
5	121	94.544	623
6	125	94.5477	601
7	129	94.5479	576
8	133	94.5488	553

$i := 0.. \text{rows}(\text{data}) - 1$

- Вычисление сопротивления термометра

$$R_i := \frac{\text{data}_{i,0}}{\text{data}_{i,1}} \cdot RN$$

- Вычисление температуры

$$T_i := f(R_i)$$

$$N_i := \text{data}_{i,2}$$

$k := 1.. \text{rows}(\text{data}) - 1$

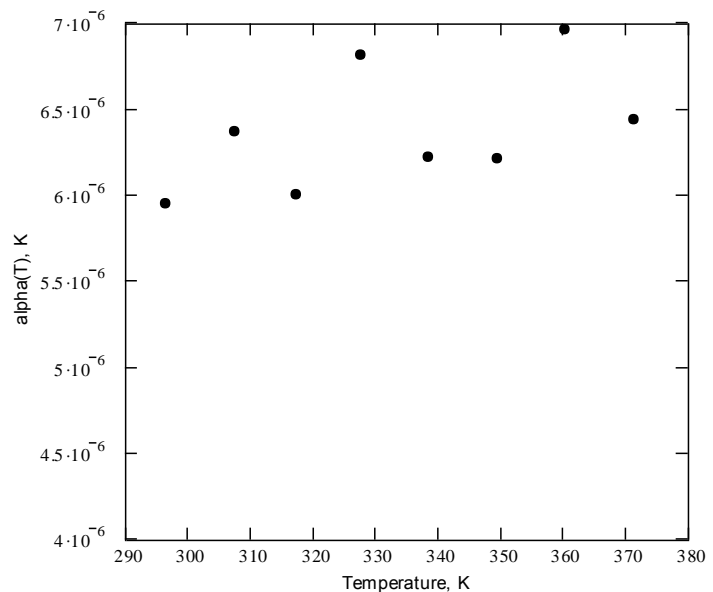
$$DN_k := \text{data}_{k-1,2} - \text{data}_{k,2}$$

$$DT_k := T_k - T_{k-1}$$

$$\text{Temp}_k := T_{k-1} + \frac{DT_k}{2}$$

- Расчет коэффициента теплового расширения.

$$\alpha_k := \frac{DN_k}{DT_k} \cdot \frac{A}{l} + \text{fitk}(\text{Temp}_k) \cdot 10^{-7}$$



$$dd_{k,0} := \text{Temp}_k$$

$$dd_{k,1} := \alpha_k$$

$m := 0.. \text{rows}(\text{data}) - 2$

$$\text{result}_{m,1} := \alpha_{m+1}$$

$$\text{result}_{m,0} := \text{Temp}_{m+1}$$

```

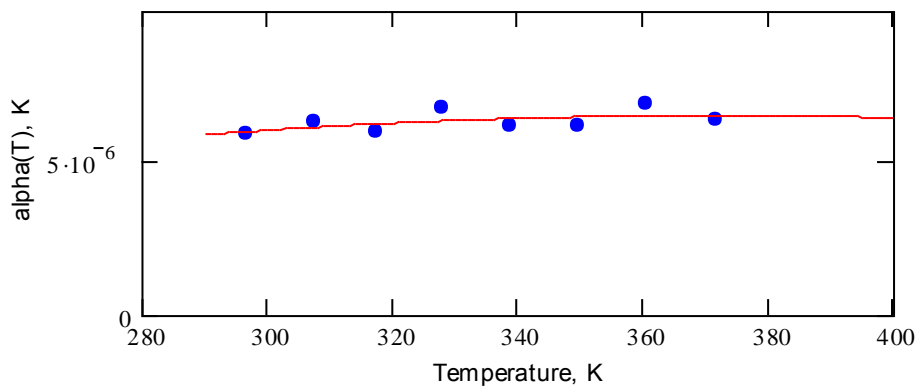
result =
(
296.376 5.953× 10-6
307.283 6.367× 10-6
317.167 6.001× 10-6
327.633 6.815× 10-6
338.429 6.221× 10-6
349.334 6.207× 10-6
360.299 6.961× 10-6
371.318 6.441× 10-6
)

```

Аппроксимация данных полиномом 3 порядка

$$F(x) := \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \end{pmatrix} \quad a := \text{linfit}(\text{result}^{\langle 0 \rangle}, \text{result}^{\langle 1 \rangle}, F) \quad a = \begin{pmatrix} -6.536 \times 10^{-6} \\ 7.053 \times 10^{-8} \\ -9.493 \times 10^{-11} \end{pmatrix}$$

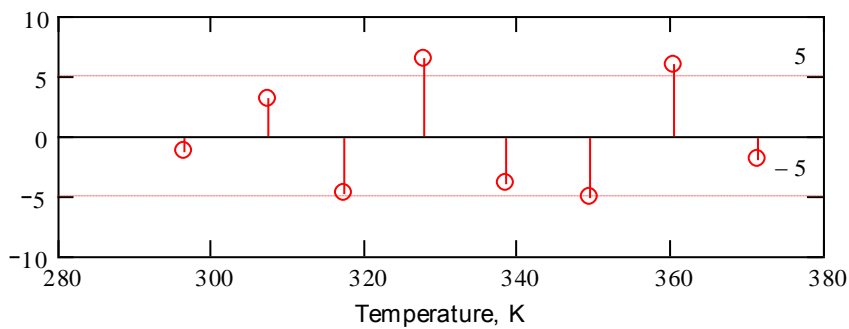
app(x) := a · F(x) x := 290.. 420



Ошибки аппроксимации

k := 0.. rows(result) - 1

$$\text{em}_k := \frac{\text{result}_{k,1} - \text{app}(\text{result}_{k,0})}{\text{result}_{k,1}} \cdot 100$$



ОГЛАВЛЕНИЕ

Общие сведения	3
Температура. Температурные шкалы	4
Лабораторная работа № 1. Определение температуры платиновым термометром сопротивления	10
Лабораторная работа № 2. Определение температуры термоэлектрическим Термометром (термопарой)	21
Удельный объем	28
Связь удельного объема с некоторыми термодинамическими функциями и свойствами	28
Лабораторная работа № 3. Определение удельного объема	30
Тепловое расширение твердых тел	35
Лабораторная работа № 4. Определение коэффициента теплового расширения	42
Приложения	48