

Министерство образования и науки Российской Федерации
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА
ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЁРДЫХ ТЕЛ**

Методические указания к лабораторной работе №6 по курсу «Физика»
для студентов всех форм обучения всех направлений подготовки

Екатеринбург

УрФУ

2015

УДК 541.24.533.12.(075.8)

Составители: В.П. Левченко, А.В. Мелких, А.А. Сабирзянов

Научный редактор: проф., д. ф.- м. н. А.А. Повзнер

Определение температурного коэффициента линейного расширения твердых тел: методические указания к лабораторной работе № 6 по физике / сост. В.П. Левченко, А.В. Мелких, А.А. Сабирзянов. Екатеринбург: УрФУ, 2015. 17 с.

В данной лабораторной работе рассматривается зависимость линейных размеров металлов от температуры. Теоретическое объяснение дается на основе современной теории ангармонизма, приводится описание экспериментальной установки, методики проведения опытов, обработки данных, вычисления термического коэффициента линейного расширения. Дана форма отчета.

Подготовлено кафедрой физики.

© УрФУ, 2015

1.МЕЖАТОМНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

Изменение размеров твердых тел при нагревании связано с различием в законе сил притяжения и отталкивания при смещении атомов из положений равновесия. При сближении атомов энергия сил отталкивания возрастает быстрее, чем энергия сил притяжения при соответствующем удалении атомов. С увеличением амплитуд тепловых колебаний атомов в кристалле минимальные расстояния между атомами при их сближении уменьшаются, а максимальные – увеличиваются. Однако при взаимодействии по указанному закону при удалении атомов происходит увеличение расстояний на большую величину, чем уменьшение расстояний при сближении атомов. Это является причиной увеличения размеров тела при нагревании.

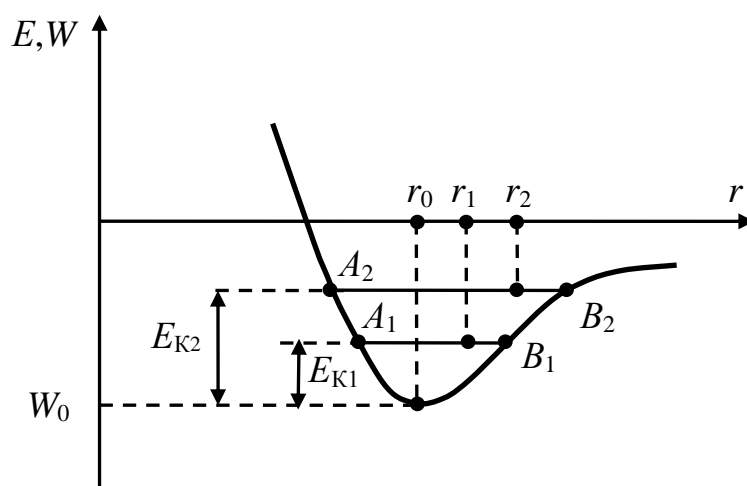


Рис.1. Зависимость потенциальной энергии взаимодействия двух атомов от расстояния между ними

Для объяснения механизма расширения рассмотрим два соседних атома, левый из которых закреплен неподвижно, а правый колеблется около своего положения равновесия. При повышении температуры увеличивается его кинетическая энергия E_k , а значит, и амплитуда колебаний.

Атомы взаимодействуют между собой: при их сближении возникают силы отталкивания, а при удалении – силы притяжения. График зависимости потенциальной энергии W взаимодействия двух атомов от расстояния r между ними (потенциальная кривая) изображен на рис. 1.

По оси ординат, кроме потенциальной энергии W , отложена еще полная энергия колеблющегося атома $E = E_k + W$, изображенная горизонтальными отрезками A_1B_1 и A_2B_2 для температур T_1 и T_2 .

В анизотропном кристалле для некоторых направлений можно представить обратный ход асимметрии потенциальной кривой взаимодействия. В этом случае для указанных направлений при нагревании должно наблюдаться сокращение линейных размеров. Для симметричной кривой потенциальной энергии никакого изменения размеров тела при изменении температуры происходить не должно. Нижний участок потенциальной кривой вблизи минимума всегда можно аппроксимировать с достаточной точностью симметричной ветвью параболы. Это объясняет, почему термический (или тепловой) коэффициент линейного расширения (ТКЛР) для различных тел вблизи абсолютного нуля температуры стремится к нулю. Таким образом, причина теплового расширения большинства твердых тел заключается в аангармоничности тепловых колебаний атомов в кристалле. Термическое расширение большинства кристаллов анизотропно и может быть описано полярной диаграммой ТКЛР.

2. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Тепловое расширение представляет собой изменение размеров тела в процессе изменения его температуры. Взаимодействие атомов твердого тела складываются 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 – объем тела.

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

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

где $\langle \beta \rangle$ – 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 $\beta = \Delta V / (V \cdot \Delta T)$ и, положив $\Delta V = V$, $\Delta T = 1$ градус, найдем, что 1 единица коэффициента объемного расширения равна $V / (V \cdot 1 \text{ град}) = 1 \text{ град}^{-1}$.

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:

$$\alpha = \frac{1}{l_i} \cdot \left(\frac{dl_i}{dT} \right)_P, \quad (3)$$

где l_i – начальная длина образца в измеряемом направлении.

Используя вышеизложенные рассуждения относительно β , можно записать выражение для экспериментально определяемой величины коэффициента линейного теплового расширения

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

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

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

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

Средние значения коэффициентов расширения $\langle \beta \rangle$ и $\langle \alpha \rangle$, 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.

На рис. 2 в качестве примера приведена экспериментальная зависимость двух параметров (а, с) ячейки кварца от температуры (по шкале Цельсия). Видна нелинейность размеров ячейки и, следовательно, зависимость ТКЛР от температуры.

Так как коэффициенты линейного расширения твёрдых тел малы и по порядку величины составляют $\sim 10^{-5}$ град.⁻¹, то из (3) вытекает линейный закон расширения, справедливый для сравнительно небольших интервалов температур.

$$l \approx l_0 [1 + \alpha(T_2 - T_1)] \quad (6)$$

Следует иметь в виду, что вследствие анизотропии кристаллов всех сингоний, кроме кубической, ТКЛР зависит от направления.

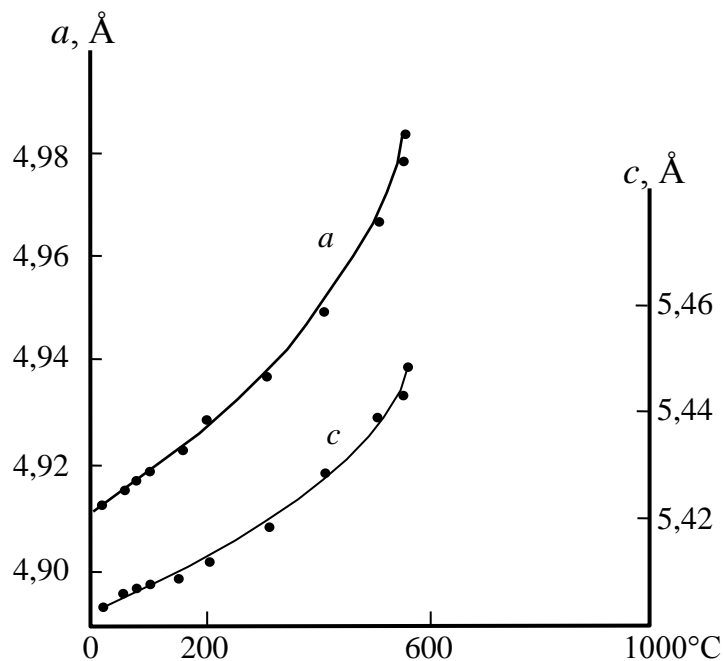


Рис. 2. Зависимость параметров (в ангстремах) элементарной ячейки кварца от температуры

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: трамвайные и железнодорожные рельсы, стальные мостовые конструкции, линии газопроводов, оси точных механизмов, подшипники, пластины полупроводников, детали и узлы механизмов и т. д.

3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка для определения ТКЛР (рис. 3) состоит из вертикального оптического длинномера ИЗВ-1, электрической печи, блока питания «Агат», цифрового вольтметра и хромель-алюмелевой термопары. Вертикальный оптический длинномер предназначен для измерения линейных размеров различных объектов контактным способом.

Предел измерений прибора 250 мм, погрешность измерения составляет 0,001 мм (1 мкм).

Прибор состоит из 4 основных частей: штатива 1, измерительной головки 9, измерительного стержня 5 и отсчетного микроскопа 8. Если посмотреть в окуляр микроскопа, то будут видны три шкалы (рис. 4): прозрачная миллиметровая шкала А, укрепленная в измерительном стержне и перемещающаяся вместе с ним; неподвижная шкала В, имеющая вертикальную линейку с делениями от 0 до 10 со стрелкой-указателем вверху. В поле зрения эти 10 делений укладываются в 1 деление миллиметровой шкалы А и, таким образом, каждое деление линейки В соответствует 0,1 мм; круговая шкала С, связанная с 10 двойными спиралями Архимеда, делит их на 100 равных частей.

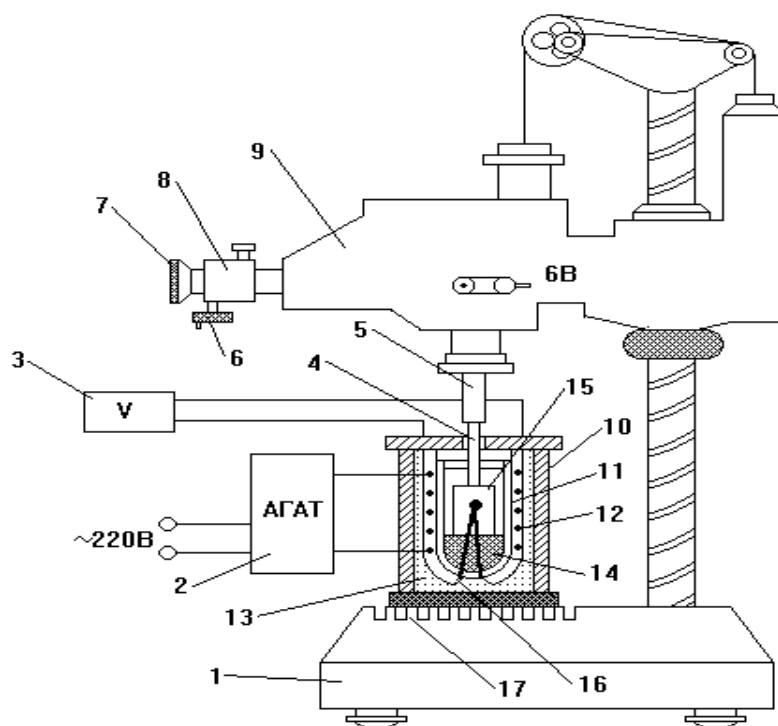


Рис. 3. Установка для определения ТКЛР

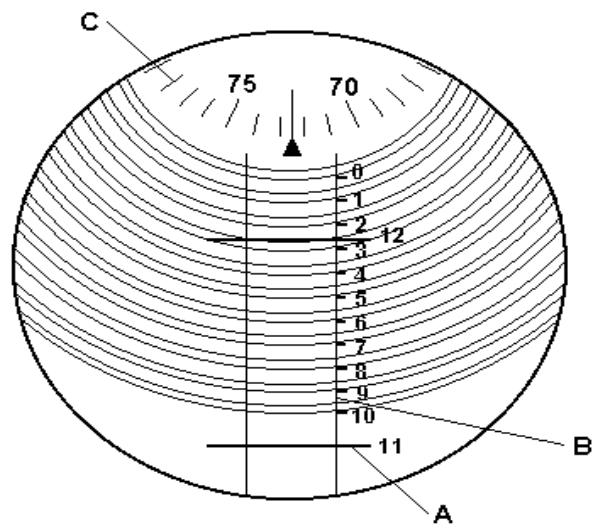


Рис. 4. Шкалы длинномера ИЗВ-1:
 А – миллиметровая (подвижная);
 В – неподвижная; С – круговая.

Измерение длины длинномером производится следующим образом. Включают ИЗВ-1 в сеть переменного тока (с напряжением 6 В) для освещения шкал микроскопа. Вращая обойму 7 окуляра микроскопа, добиваются четкого изображения шкал.

Поднимают измерительный стержень 5, кладут на предметный (ребристый) столик 17 измеряемый объект и *плавно* опускают на него измерительный стержень.

Для снятия показаний прибора необходимо предварительно вращением маховичка 6 (рис. 3) подвести двойной виток спирали так, чтобы штрих миллиметровой шкалы А оказался посередине между линиями двойного витка спирали (рис. 5), касаясь одной из спиралей. После этого целые и десятые доли миллиметра отсчитывают по шкалам А и В длинномера (в нашем примере 12,2 мм). Сотые и тысячные доли миллиметра определяют по круговой шкале С против стрелки (0,072 мм). Следовательно, длина измеряемого объекта равна 12,272 мм.

Печь состоит из металлического кожуха 10, запаянной с одного конца кварцевой трубки 11, на которую намотан бифилярно нихромовый нагреватель

12. Пространство между нагревателем и кожухом печи для уменьшения теплопотерь заполнено асбестовой ватой 13.

Внутри кварцевой трубки, имеющей в запаянном конце прорезь для выхода концов термопары, находится алундовый сплошной цилиндр 14. Испытуемый металлический образец 15 нижним концом опирается на этот цилиндр. Сверху на образец помещают передаточный алундовый стержень 4.

Нагрев печи осуществляется с помощью прибора «Агат 2», питающегося от сети переменного тока. Допускаемое максимальное напряжение на печи не более 20 В.

Для измерения температуры образца используется хромель-алюмелевая термопара 16, горячий спай которой расположен посередине образца 15. Холодные концы термопары подключаются к цифровому вольтметру 3, измеряющему разность потенциалов между ними. По прилагаемой к установке таблицы разность потенциалов между концами термопары переводится в значение температуры образца в градусах Цельсия.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить цифровой вольтметр на прогрев (время прогрева 10 мин).
2. Убедиться в том, что измерительный стержень 5 касается верхнего конца передаточного стержня 4.
3. Вращением обоймы окуляра 7 отсчетного микроскопа добиться четкого изображения шкал.
4. После выполнения всех подготовительных операций перед измерениями необходимо, чтобы преподаватель проверил готовность установки к работе и дал разрешение на выполнение работы.
5. Произвести отсчет при комнатной температуре, которая определяется по термометру.
6. После снятия отсчета, соответствующего комнатной температуре, можно подать напряжение на нагреватель печи. Для этого следует включить тумблер на панели прибора «Агат» в положение «Сеть», предварительно установив

переключатель пределов выходного напряжения в положение (8 – 11) В, а ручку регулировки напряжения – в крайнее левое положение. При этом выходное напряжение достаточно для нагрева образца со средней скоростью 4-6°С/мин до температуры порядка 100 – 120°С. В дальнейшем для поддержания указанной скорости нагрева образца необходимо после достижения 100 °С увеличивать U медленным вращением ручки плавной регулировки напряжения на одно малое деление шкалы вольтметра через каждые 3 минуты.

7. Измерение температуры осуществляется с помощью цифрового вольтметра, который показывает Э.Д.С. ε , возникающую в термопаре. По прилагаемой таблице находится температура.

8. Снятие отсчетов длины образца производится в режиме непрерывного нагрева через каждые 20 °С, от комнатной температуры до 300 °С.

9. Результаты измерений фиксируются в соответствующей таблице отчета и оформляются в виде графика.

10. Расчет α по полученным данным производят одним из двух методов: по среднему удлинению образца или графически (по усмотрению преподавателя).

11. Расчет α по среднему удлинению.

Рассчитать разности длин $\Delta l = l_j - l_k$ и температур $\Delta t = t_j - t_k$, принимая разность индексов j, k равной восьми (например, $k = 1, j = 9$ или $k = 2, j = 10$ и т.д.) и занести их в табл. П.2.

Рассчитать средний температурный коэффициент линейного расширения по формуле

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\langle \Delta l \rangle}{l_0 \Delta t}, \quad (8)$$

где $\langle \Delta l \rangle$ – среднее удлинение образца, $\Delta t = \Delta T$ – разность температур, l_0 – длина образца при 0 °С (указана на рабочем месте или задается преподавателем).

В качестве l_0 нельзя подставлять отсчет длины l_1 при комнатной температуре, т. к. в ходе работы длина образца измеряется вместе с подставкой и передаточным стержнем.

12. Расчет α графическим методом.

Построить график зависимости $l(t)$, для чего по данным таблицы нанести экспериментальные точки и по ним построить прямую (рис. 5). Для более точного построения графика следует применить метод наименьших квадратов (мнк).

По прямой, взяв координаты двух достаточно далеко отстоящих точек, определить:

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{l_2 - l_1}{t_2 - t_1}. \quad (9)$$

13. Рассчитать погрешность измерения α по формулам, указанным в приложении. При графическом методе расчета погрешность рассчитывается согласно указаниям преподавателя, например мнк.

14. Построить график зависимости длины образца от температуры.

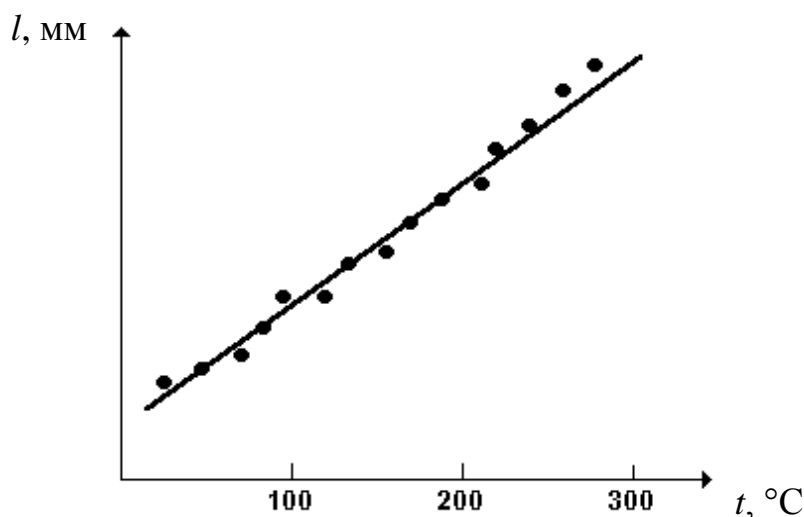


Рис. 5 Примерный график зависимость длины образца от температуры

15. Если измерения проводить многократно и очень внимательно, то можно уловить и более тонкий эффект – зависимость ТКЛР от температуры и построить график зависимости α от температуры.

16. Сделать выводы по работе, оформить отчет и сдать его преподавателю.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключается причина теплового расширения твердых тел?
2. Каков физический смысл ТКЛР?
3. Как ТКЛР зависит от температуры?
4. Как измеряется температура образца в данной работе?
5. Опишите методику расчета ТКЛР по экспериментальным данным.

ФОРМА ОТЧЕТА

Титульный лист

УрФУ

кафедра физики

О Т Ч Е Т

по лабораторной работе № 6

**Определение температурного коэффициента
линейного расширения твёрдых тел**

Студент _____

Группа _____

Преподаватель _____

Дата _____

На внутренних страницах:

1. Расчетная формула для измерения термического коэффициента линейного расширения

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\langle \Delta l \rangle}{l_0 \Delta t},$$

где $\langle \Delta l \rangle$ – среднее удлинение образца,

l_0 – длина образца при 0 °С,

Δt – разность температур.

2. Эскиз установки.

3. Средства измерения и их характеристики.

Наименование средства измерения	Предел измерений	Цена деления шкалы	Предел основной погрешности
Длинномер			
оптический ИЗВ-1			
Вольтметр			
электронный			

4. Результаты измерений.

Таблица 1

№ изм.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ε_i , мВ	0	0,80	1,61	2,43	3,26	4,10	4,92	5,73	6,53	7,33	8,13	8,93	9,74	10,56	11,38
t_i , °C	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
l_i , мм															

Таблица 2

$j - k$	$\Delta t_i, ^\circ C$	$\Delta l_i, ^\circ C$	$\Delta l_i - \langle \Delta l \rangle$, мм	$(\Delta l_i - \langle \Delta l \rangle)^2$, мм ²
9-1				
10-2				
11-3				
12-4				
13-5				
14-6				
15-7				

$$\langle \Delta l \rangle = \dots \quad \sum_{i=1}^n (\Delta l_i - \langle \Delta l \rangle)^2 = \dots$$

5. Расчет искомой величины

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\langle \Delta l \rangle}{l_0 \Delta t}$$

6. Расчет границ погрешностей.

6.1. Среднее квадратическое отклонение

$$S_{\langle \Delta l \rangle} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta l_i - \langle \Delta l \rangle)^2}{n(n-1)}} =$$

6.2. Граница случайной погрешности

$$\varepsilon_{\langle \Delta l \rangle} = t_{P,N} S_{\langle \Delta l \rangle} =$$

6.3. Границы систематических и полных погрешностей

$$\Delta_{l_0} = 1,1\sqrt{\theta_{\text{осн}}^2 + \theta_{\text{отс}}^2} =$$

$$\Delta_{\Delta\varepsilon} = \theta_{\Delta\varepsilon} = \theta_{\text{осн}}$$

$$\Delta_{\Delta t} = \frac{t_{15} - t_1}{\varepsilon_{15} - \varepsilon_1} \Delta_{\Delta\varepsilon} =$$

6.4. Граница полной погрешности измерения длины

$$\Delta_{\langle\Delta l\rangle} = \sqrt{\theta_{\text{осн}}^2 + \varepsilon_{\langle\Delta l\rangle}^2} =$$

6.5. Граница относительной погрешности результата измерения ТКЛР

$$\gamma = \frac{\Delta_\alpha}{\langle\alpha\rangle} = \sqrt{\left(\frac{\Delta_{l_0}}{l_0}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\langle\Delta l\rangle}}{\langle\Delta l\rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2} =$$

6.6. Граница абсолютной погрешности результата измерения ТКЛР

$$\Delta_\alpha = \gamma\langle\alpha\rangle =$$

7. Окончательный результат

$$\alpha = (\langle\alpha\rangle \pm \Delta_\alpha) = \quad , P=0,95.$$

8. График зависимости $l(t)$ и определение ТКЛР графическим способом по формуле

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{l_2 - l_1}{t_2 - t_1} =$$

9. Выводы.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Коэффициент линейного теплового расширения вблизи комнатной температуры

Металл	$\alpha \cdot 10^6$, град ⁻¹	Металл	$\alpha \cdot 10^6$, град ⁻¹
Li	45	Fe	11,7
Na	71	Ni	12,5
K	83	Cr	7,5
Cs	97	Mo	5,2
Cu	17,0	Ta	6,6
Ag	18,9	W	4,6
Au	13,9	Ir	6,5
Ca	22,5	Pd	11,6
Al	23,6	Pt	8,9
Pb	28,8		

Учебное издание

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО
РАСШИРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Составители:

Левченко Виталий Петрович

Мелких Алексей Вениаминович

Сабирзянов Александр Аделевич

Редактор

Компьютерный набор *Н. Н. Суслиной*

Подписано в печать Формат 60×84 1/16.

Бумага писчая. Плоская печать. Усл. печ. л. 1,0.

Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ

Редакционно-издательский отдел ИПЦ УрФУ
620002, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 5
E-mail: rio@ustu.ru

Отпечатано в типографии Издательско-полиграфического центра УрФУ
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4
Тел.: +7 (343) 350-56-64, 350-90-13
Факс: +7 (343) 358-93-06
E-mail.: press.info@usu.ru