



НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
СТАНДАРТ  
РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р  
8.1034—  
2024

---

## БЕРИЛЛИЙ

Температурный коэффициент  
линейного расширения и удельная теплоемкость  
в диапазоне температур от 260 К до 870 К

Издание официальное

Москва  
Российский институт стандартизации  
2024

## Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева» (ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»)

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 180 «Стандартные справочные данные о физических константах и свойствах веществ и материалов»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 14 февраля 2024 г. № 212-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет ([www.rst.gov.ru](http://www.rst.gov.ru))*

© Оформление. ФГБУ «Институт стандартизации», 2024

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

II

## Содержание

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 Область применения . . . . .                                               | 1  |
| 2 Нормативные ссылки . . . . .                                               | 1  |
| 3 Общие положения . . . . .                                                  | 1  |
| Приложение А (справочное) Характеристики материала . . . . .                 | 4  |
| Приложение Б (справочное) Экспериментальная аппаратура . . . . .             | 5  |
| Приложение В (справочное) Экспериментальные данные . . . . .                 | 10 |
| Приложение Г (справочное) Метод обработки экспериментальных данных . . . . . | 17 |
| Библиография . . . . .                                                       | 24 |



## БЕРИЛЛИЙ

Температурный коэффициент линейного расширения и удельная теплоемкость  
в диапазоне температур от 260 К до 870 К

Beryllium. Temperature coefficient of linear expansion and specific heat in the temperature range from 260 K to 870 K

Дата введения — 2024—12—01

## 1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на стандартные справочные данные (ССД) о температурном коэффициенте линейного расширения (ТКЛР) и удельной теплоемкости бериллия в диапазоне температуры от 260 К до 870 К. Характеристики исследуемого материала приведены в приложении А. Описание оборудования представлено в приложении Б.

## 2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использована нормативная ссылка на следующий стандарт:  
ГОСТ 34100.3 Неопределенность измерений. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения

**Примечание** — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения.

## 3 Общие положения

3.1 Основой для составления таблиц ССД явились экспериментальные данные, приведенные в таблицах В.1—В.8. Порядок обработки результатов измерений приведен в приложении Г.

3.1.1 Тепловое (линейное) расширение — это деформация, вызванная изменением температуры. Тепловое расширения характеризуется относительным удлинением и ТКЛР.

3.1.2 Относительное удлинение (деформацию)  $\Delta L$  вычисляют по формуле

$$\Delta L_{(T_i - T_0)} / L_{T_0} = (L_{T_i} - L_{T_0}) / L_{T_0}, \quad (1)$$

где  $T_i$  — конечная температура интервала;

$T_0$  — некоторая фиксированная температура, равная 293,15 К для рассматриваемых данных;



$\Delta L_{(T_i - T_0)}$  — удлинение в интервале температуры  $T_i - T_0$ ;

$L_{T_0}$  — длина образца (геометрический размер в направлении оси образца) при температуре  $T_0$ ;

$L_{T_i}$  — длина образца при температуре  $T_i$ .

3.1.3 Дифференциальный (или истинный) ТКЛР вычисляют по формуле

$$\alpha = \frac{1}{L_T} \cdot \left( \frac{dL_T}{dT} \right)_p, \quad (2)$$

где  $L_T$  — длина образца при температуре  $T$ ;

$p$  — давление.

3.1.4 Средний ТКЛР в интервале температуры  $T_i - T_0$  (интегральный) вычисляют по формуле

$$\alpha_{(T_i - T_0)} = \frac{1}{L_{T_0}} \cdot \left( \frac{\Delta L_{(T_i - T_0)}}{(T_i - T_0)} \right). \quad (3)$$

3.1.5 Средний ТКЛР в интервале температуры  $T_i \dots T_{i+1}$  вычисляют по формуле

$$\alpha_{(T_i \dots T_{i+1})} = \frac{1}{L_{T_i}} \cdot \left( \frac{\Delta L_{(T_i \dots T_{i+1})}}{(T_{i+1} - T_i)} \right), \quad (4)$$

где  $\Delta L_{(T_i \dots T_{i+1})}$  — удлинение в интервале температуры от  $T_i$  до  $T_{i+1}$ ;

$L_{T_i}$  — длина образца при температуре  $T_i$ .

3.1.6 В таблице 1 приведены стандартные справочные значения относительного удлинения  $\Delta L/L$  и среднего ТКЛР  $\alpha_{\text{ср}}$  для бериллия.

Т а б л и ц а 1 — Стандартные справочные значения относительного удлинения  $\Delta L/L$  и среднего ТКЛР  $\alpha_{\text{ср}}$  для бериллия в диапазоне температур от 260 К до 870 К

| Температура, $T_i$ , К | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{\text{ср}} \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$ | Температура, $T_i$ , К | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{\text{ср}} \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$ |
|------------------------|-------------------------|------------------------------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------------------------|
| 260                    | −136,892                | 10,41                                          | 620                    | 4977,298                | 14,35                                          |
| 300                    | 303,405                 | 11,30                                          | 660                    | 5675,090                | 14,67                                          |
| 340                    | 794,847                 | 11,89                                          | 700                    | 6364,334                | 14,91                                          |
| 380                    | 1316,392                | 12,32                                          | 740                    | 7091,452                | 15,19                                          |
| 420                    | 1875,275                | 12,77                                          | 780                    | 7830,833                | 15,45                                          |
| 460                    | 2462,683                | 13,18                                          | 820                    | 8755,069                | 16,01                                          |
| 500                    | 3069,281                | 13,53                                          | 860                    | 9735,842                | 16,59                                          |
| 540                    | 3693,204                | 13,84                                          | 870                    | 10003,206               | 16,76                                          |
| 580                    | 4335,791                | 14,13                                          | —                      | —                       | —                                              |

3.1.7 Расширенная неопределенность результатов составляет  $1,2 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$  для диапазона температур от 260 К до 870 К.

Расширенная неопределенность получена путем умножения стандартной неопределенности на коэффициент охвата  $k = 2$ , соответствующий уровню доверия, равному 95 % при допущении нормального распределения. Оценивание неопределенности проведено в соответствии с ГОСТ 34100.3.

3.2 Удельная теплоемкость — количество энергии, которое необходимо передать или забрать у 1 г вещества для изменения его температуры на 1 градус.

3.2.1 Определение удельной теплоемкости бериллия включает измерение тепловых эквивалентов пустого калориметра и калориметра с бериллием, построение их полиномиальных зависимостей от температуры и вычисление удельной теплоемкости бериллия по формуле

$$C_{\text{уд}} = \frac{1}{m}(\overline{W}_1 - \overline{W}_2), \quad (5)$$

где  $\overline{W}_1$  — определенное по полиному значение теплового эквивалента адиабатического калориметра с бериллием при заданной температуре;

$\overline{W}_2$  — определенное по полиному значение теплового эквивалента пустого адиабатического калориметра, соответствующее значению полинома при заданной температуре.

3.2.2 По полученным значениям удельной теплоемкости  $C_{\text{уд}}$  был определен полином  $C = C(T)$ , описывающий зависимость удельной теплоемкости бериллия

$$C(T) = 822,0739 + 3,522 \cdot T^{-6} \cdot T^3 - 7,62954 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 6,405165 \cdot T - 3,02294 \cdot 10^5/T^2. \quad (6)$$

СКО результатов измерений удельной теплоемкости составило 0,3 %.

3.2.3 В таблице 2 приведены стандартные справочные значения удельной теплоемкости  $C_p$  бериллия в диапазоне температур от 260 К до 870 К.

Т а б л и ц а 2 — Стандартные справочные значения удельной теплоемкости  $C_p$  бериллия в диапазоне температур от 260 К до 870 К

| Температура, $T_p$ , К | $C_p$ , Дж/(кг · К) | Температура, $T_p$ , К | $C_p$ , Дж/(кг · К) |
|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
| 260                    | 1586,387            | 580                    | 2567,872            |
| 273,15                 | 1669,021            | 600                    | 2595,382            |
| 280                    | 1709,106            | 620                    | 2621,301            |
| 300                    | 1816,184            | 640                    | 2645,864            |
| 320                    | 1910,671            | 660                    | 2669,302            |
| 340                    | 1994,795            | 680                    | 2691,832            |
| 360                    | 2070,229            | 700                    | 2713,667            |
| 380                    | 2138,261            | 720                    | 2735,013            |
| 400                    | 2199,906            | 740                    | 2756,072            |
| 420                    | 2255,983            | 760                    | 2777,041            |
| 440                    | 2307,166            | 780                    | 2798,113            |
| 460                    | 2354,023            | 800                    | 2819,479            |
| 480                    | 2397,040            | 820                    | 2841,326            |
| 500                    | 2436,640            | 840                    | 2863,841            |
| 520                    | 2473,199            | 860                    | 2887,208            |
| 540                    | 2507,055            | 870                    | 2899,268            |
| 560                    | 2538,518            | —                      | —                   |

3.2.4 Расширенная неопределенность результатов составляет 0,6 % для диапазона температур от 260 К до 870 К.

Расширенная неопределенность получена путем умножения стандартной неопределенности на коэффициент охвата  $k = 2$ , соответствующий уровню доверия, приблизительно равному 95 % при допущении нормального распределения. Оценивание неопределенности проведено в соответствии с ГОСТ 34100.3.

**Приложение А**  
**(справочное)**

**Характеристики материала**

Во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» проведены исследования бериллия марки ТГП-56 с содержанием бериллия не менее 97,8 %. Химический состав исследуемых заготовок приведен в таблице А.1, а характеристика материала — в таблице А.2.

Т а б л и ц а А.1 — Химический состав бериллия

| Массовая доля примесей, %, не более |      |      |      |      |     |      |      |                      |                |
|-------------------------------------|------|------|------|------|-----|------|------|----------------------|----------------|
| Fe                                  | Al   | Si   | Cr   | F    | O   | C    | Ti   | Сумма Mg, Mn, Ni, Cu | Сумма N, H, Cl |
| 0,25                                | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,02 | 1,3 | 0,12 | 0,04 | 0,08                 | 0,27           |

Т а б л и ц а А.2 — Характеристики бериллия

| Параметр                    | Единица измерения          | Значение                |
|-----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 1 Модуль упругости          | ГПа                        | 290                     |
| 2 Удельный модуль упругости | (ГПа · м <sup>3</sup> )/кг | 156,7 · 10 <sup>3</sup> |
| 3 Плотность                 | кг/м <sup>3</sup>          | 1850                    |
| 4 Предел прочности          | МПа                        | 350                     |
| 5 Предел текучести          | МПа                        | 25                      |



## Приложение Б (справочное)

### Экспериментальная аппаратура

#### Б.1 Измерение удлинения и температурного коэффициента линейного расширения бериллия

Б.1.1 Измерения относительного удлинения и ТКЛР образцов из бериллия в диапазоне температур от 260 К до 870 К проведены на высокотемпературном dilatометре с толкателем (далее — ВДТ) и гетеродинно-поляризационном dilatометре (далее — ГПД), которые входят в состав государственного вторичного эталона единицы температурного коэффициента линейного расширения твердых тел в диапазоне значений от  $0,05 \cdot 10^{-6}$  до  $100,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , в диапазоне значений температуры от 90 до 1900 К (регистрационный номер 2.1.ZZB.0240.2017).

##### Б.1.1.1 ВДТ

Среднее квадратическое отклонение результатов измерений на ВДТ в интервале температуры 100 К при проведении трех независимых измерений составляет от  $0,30 \cdot 10^{-7}$  до  $2,20 \cdot 10^{-7}$  в зависимости от значений температуры.

Измерения проведены при скорости нагрева  $1 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  и выдержке при каждой стационарной температуре не менее двух часов. Стационарные температуры, при которых проводили измерения, приведены в таблицах В.1—В.3.

На рисунке Б.1 представлена функциональная блок-схема эталонного ВДТ.



Рисунок Б.1 — Функциональная блок-схема ВДТ

В нижней части корпуса ВДТ расположена система измерения и регулирования температуры. Над ней размещены печь-термостат и вентиляторы охлаждения. Температурная печь выполнена с применением нагревателей из дисилицида молибдена  $\text{MoSi}_2$ , равномерно расположенных вокруг внутренней трубы. Внешняя теплоизоляция имеет малую теплопроводность, позволяет обходиться без традиционного водяного охлаждения и использовать для охлаждения только вентиляторы. Внутренняя труба из керамики, в которую помещают держатель с образцами и толкателями, герметично закрыта снизу, а сверху уплотнена по держателю, что позволяет проводить измерения в вакууме или атмосфере инертного газа.

Печь снабжена двумя микропроцессорными регуляторами — измерителями температуры, имеющими связь с компьютером. Один из них задействован в канале управления системы регулирования температуры печи. Датчиком системы регулирования является термopара, расположенная в непосредственной близости от нагревателя, что позволяет сократить постоянные времени регулирования. Исполнительным устройством становится тиристорный усилитель, посредством которого производят регулировку мощности нагревателя печи. Программы регулирования температуры позволяют проводить измерения как в динамическом режиме, так и в стационарном температурном режиме с выдержкой образца при заданной температуре.

Измерение температуры образца производят платинородий-платиновой термопарой типа S с возможностью ее замены на хромель-алюмелевую термопару типа K (или любую другую). Особенностью печи является ее малая инерционность, что позволяет сократить время выдержки образца при заданной статической температуре. Для проведения измерений в вакууме к печи подключена система вакуумной откачки, состоящая из насоса, вакуумного крана и вакуумметра. Имеется также возможность проведения измерений в атмосфере инертного газа, для чего использован герметичный кран, соединенный с газовым баллоном.

Держатель образцов выполнен в виде корундовой трубы, в нижней части которой установлены образцы. Внутри держателя размещена теплоизолирующая втулка с тремя каналами. В одном канале в двухканальной керамической трубочке размещена армированная термопара для измерения температуры образцов. Чувствительный элемент термопары расположен на уровне середины образцов. В двух других каналах свободно, без трения, перемещаются корундовые цилиндрические толкатели.

Блок индикаторов расположен на пластине основания индикаторов. В блоке размещены два одинаковых индуктивных цифровых датчика перемещения фирмы «Антер». Датчики имеют встроенный интерфейс для связи с компьютером. Измерительная головка каждого датчика упирается в соответствующий толкатель, регистрируя перемещение, вызванное изменением размеров исследуемых образцов при изменении их температуры. Блок индикаторов изображен на рисунке Б.2.



Рисунок Б.2 — Конструкция блока индикаторов

#### Б.1.1.2 ГПД

Среднее квадратическое отклонение результатов измерений на ГПД в интервале температуры 100 К при проведении трех независимых измерений составляет от  $0,16 \cdot 10^{-7}$  до  $0,65 \cdot 10^{-7}$  в зависимости от значений температуры.

Измерения проведены при скорости нагрева  $1^\circ\text{C}/\text{мин}$  и выдержке при каждой стационарной температуре не менее часа. Значения стационарных температур приведены в таблицах В.4—В.6.

На рисунке Б.3 представлена функциональная блок-схема ГПД.

В основу работы ГПД положен интерференционный метод измерения удлинения образца при изменении его температуры. ГПД имеет вертикальную конфигурацию и состоит из термокриостата, системы подачи азота, электронного блока измерения и регулирования температуры, измерительной системы с держателем образцов, двухканального интерферометра и блока сопряжения с компьютером. В комплект прибора включены также системы форвакуумной откачки и подачи инертного газа.

Термокриостат дилатометра предназначен для создания требуемой температуры исследуемого образца в соответствии с заданной температурной программой измерений. Внутри криостата расположен нагревательный элемент и два микропроцессорных регулятора — измерителя температуры. Мощность, выделяемая в нагревателе, задается системой регулирования. В непосредственной близости от нагревателя находится термоэлектрический преобразователь, служащий датчиком температуры системы регулирования и подающий сигнал на один из регуляторов — измерителей температуры. Вакуумно-плотная конструкция термокриостата обеспечивает герметичность

измерительной системы с держателем образцов и позволяет проводить измерения при разрежении до 10 Па или в среде инертного газа.

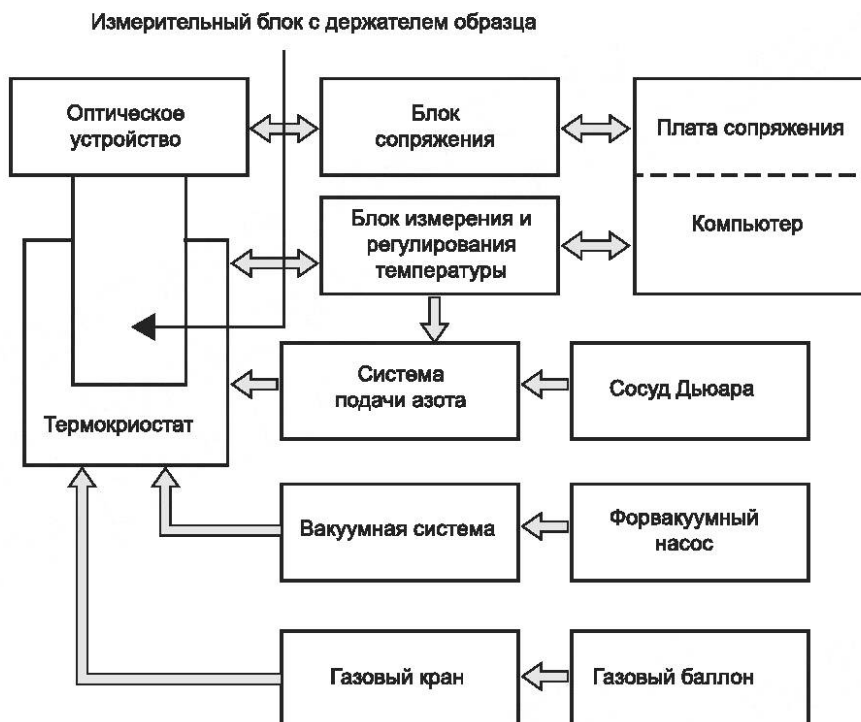


Рисунок Б.3 — Функциональная блок-схема ГПД

Для измерений при отрицательных температурах в криостате предусмотрена система подачи жидкого азота из сосуда Дьюара. Подача необходимого количества азота для поддержания температуры на заданном уровне осуществляется специальным электромагнитным клапаном, управляемым от электронного блока.

Держатель образцов представляет собой вертикально расположенную кварцевую трубу, к основанию которой приварено дно, перпендикулярно к осевой линии трубы. На этом дне установлен массивный медный блок, выравнивающий температуру. Верхний конец держателя закреплен в металлической обойме на основании оптического устройства. По краям трубы, в ее нижней части, сделаны вырезы для обеспечения возможности установки образцов. В медном блоке имеются три направляющих канала, два из которых служат для размещения образцов, а в третьем располагается измеритель температуры образцов — термоэлектрический преобразователь (термопара), подающий сигнал на второй регулятор — измеритель температуры термокриостата. Чувствительный элемент данной термопары находится на уровне середины образца, и имеется возможность перемещения его в зависимости от длины образца. На верхних торцах образцов, установленных в каналах, размещены оптические датчики положения. Датчики выполнены в защитном металлическом кожухе. С нижней стороны датчика находится конический выступ для точечного контакта с образцом, с верхней — призма, отражающая падающий луч интерферометра. Внешний вид датчиков положения приведен на рисунке Б.4.

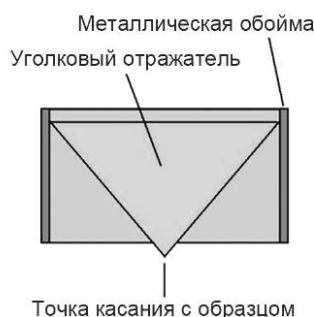


Рисунок Б.4 — Конструкция оптического датчика положения образца



Для измерения удлинения в dilatометре ГПД используется двухканальный гетеродинный интерферометр. Каналы интерферометра между собой независимы и могут измерять удлинение двух образцов либо удлинение исследуемого образца относительно известного. Гетеродинно-поляризационный интерферометр включает призму — поляризационный делитель, две фазовые пластинки  $\lambda/4$ , анализатор и уголкового отражателя. Внешний вид интерферометра представлен на рисунке Б.5.

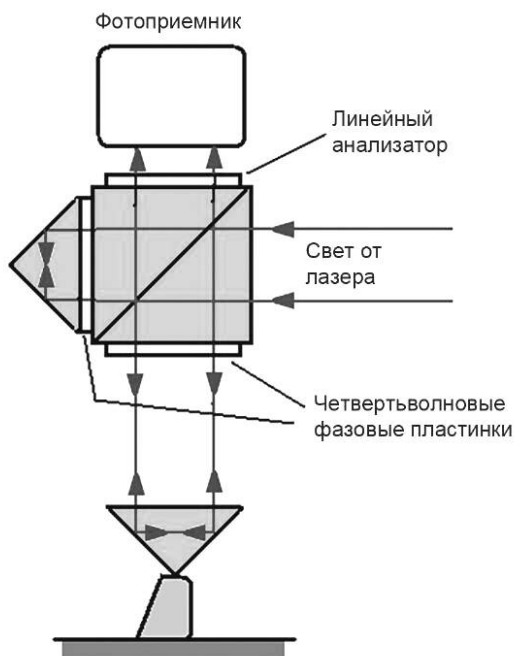


Рисунок Б.5 — Внешний вид и принцип работы интерферометра ГПД

Источником света в интерферометре является специальное лазерное устройство, генерирующее излучение на двух близких длинах волн. Пространственно пучки совпадают. Разность частот компонент составляет 3,6 МГц, что дает возможность получить оба луча из одной линии люминесценции активной среды. Один из лучей служит опорным, другой луч несет информацию об удлинении образца. Лазерное устройство обеспечивает также на отдельном электрическом выходе электрический сигнал на разностной частоте двух лучей. Электрический сигнал синхронизирован с оптической разностью частот лучей.

Принцип измерений интерферометра заключается в следующем. На выходе из лазера лучи света линейно поляризованы во взаимно ортогональных плоскостях, не интерферируют, т. е. на выходе из лазера биения интенсивности с разностной частотой отсутствуют. Лазерный луч конечной ширины (далее — пучок), содержащий обе компоненты, падает на призму-разделитель (на рисунке Б.5 справа налево). Два луча, показанные на рисунке Б.5, — крайние лучи пучка. Опорный луч, поляризованный так, что вектор световой волны лежит в плоскости рисунка Б.5, проходит поляризационную призму-расщепитель и далее через четвертьволновую фазовую пластинку попадает в уголкового отражателя (на рисунке Б.5 слева). В уголкового отражателя направление света строго параллельно падающему пучку и не зависит от юстировки. После отражения уголкового отражателем свет проходит через ту же четвертьволновую фазовую пластинку. Двукратное прохождение четвертьволновой фазовой пластинки поворачивает плоскость поляризации этой компоненты лазера на  $90^\circ$ . В результате вектор света опорного пучка на входе в призму-расщепитель (после фазовой пластинки) направлен перпендикулярно к плоскости рисунка Б.5. Свет отражается диагональю призмы в соответствии с рисунком Б.5 — вверх, в фотоприемник. Зондирующий луч (другая компонента света лазера) исходно поляризован так, что вектор лежит перпендикулярно к плоскости рисунка Б.5. Войдя (на рисунке Б.5 справа налево) от лазера в призму-расщепитель, он отражается диагональю призмы вниз, в направлении второго уголкового отражателя (оптический датчик положения образца). Зондирующий луч отражается от второго уголкового отражателя и вторично проходит четвертьволновую фазовую пластинку. Плоскость поляризации зондирующего луча также поворачивается на  $90^\circ$  по отношению к исходной. На входе в призму-расщепитель вектор света этой компоненты находится в плоскости рисунка Б.5. Свет, поляризованный таким образом, проходит сквозь диагональ расщепляющей призмы вверх, на выход из призмы. На выходе (наверх) из призмы опорный и зондирующий лучи снова совпадают, но поляризованы они ортогонально друг другу и со сдвигом фазы. Для обеспечения интерференции оба луча призмы-расщепителя проходят линейный анализатор, ориентированный под  $45^\circ$  к направлениям поляризаций двух компонент пучка. При этом интенсивность компонент

уменьшается на 0,7. Фазовый сдвиг, приобретенный зондирующим пучком в результате дополнительной разности хода, трансформируется в фазовый сдвиг модуляционных колебаний. Фазовый сдвиг модуляции сигнала фотоприемника несет информацию о расстоянии от призмы до образца, а изменение фазы — о расширении образца. Изменение фазы сигнала модуляции, приходящее с фотоприемника, измеряется электронным устройством низкочастотного опорного сигнала, приходящего из лазерного устройства (3,6 МГц). Величина изменения фазы прямо пропорциональна удлинению образца. Дискретность измерения изменения фазы в интерферометре составляет  $2\pi/512$ , что соответствует неопределенности измерения удлинения образца 1,24 нм.

## Б.2 Измерение удельной теплоемкости бериллия

Измерения удельной теплоемкости образцов из бериллия в диапазоне температур от 260 К до 870 К проведены на адиабатическом калориметре КА-С4 из состава государственного первичного эталона единицы удельной теплоемкости твердых тел ГЭТ 60-2019. СКО результатов измерений калориметра при воспроизведении единицы удельной теплоемкости составляет  $(0,136 \div 0,179) \%$  при пятидесяти измерениях. Неисключенная систематическая погрешность не превышает 0,008 %. Стандартная неопределенность измерений, оцененная по типу А КА-С4, составляет  $(0,136 \div 0,179) \%$ , по типу В — 0,004 %.

Адиабатический калориметр представляет собой цилиндрическую ячейку из серебра, окруженную двумя цилиндрическим охранными оболочками и печью либо термостатом в зависимости от температурного диапазона измерений. Ячейка содержит четырнадцать больших цилиндрических каналов для размещения исследуемых образцов, три больших канала для центрального измерительного термометра сопротивления и двух термометров сопротивления, включенных в систему автоматического регулирования, и тридцать два малых цилиндрических канала с нихромовым нагревателем в керамической изоляции. Все каналы ячейки расположены симметрично относительно центральной оси ячейки. Ячейку размещают коаксиально обеим охранным оболочкам. Геометрические размеры охранных оболочек, их конструкция и размещение в калориметре и способ размещения ячейки выполнены таким образом, чтобы минимизировать тепловые потери, вызванные разными механизмами передачи тепла. Каждая оболочка представляет собой цилиндр с дном и крышкой из серебра Ср 99,99, на внешней боковой стороне которой спирально намотан нагреватель. Печь калориметра выполнена в виде двустенного кожуха. На внутренней стенке кожуха с внешней стороны расположен фоновый нагреватель. Для измерений в области отрицательных температур вместо печи используют термостат: конструкция в виде двустенного колпака и внешнего теплоизоляционного слоя [1].

Алгоритм управления калориметром приведен на рисунках Б.6



Рисунок Б.6 — Алгоритм управления оборудованием

Методика измерений удельной теплоемкости КА-С4 включает два этапа: измерение теплового эквивалента пустого калориметра и теплового эквивалента калориметра с мерой. Тепловые эквиваленты в обоих случаях определяют по результатам измерений вводимой энергии и диапазону изменения температуры образца при нагреве от одной заданной стационарной температуры до другой. По результатам полученных значений для пустого калориметра и калориметра с мерой строят полиномиальные зависимости от температуры. А затем согласно формуле (5) определяют удельную теплоемкость исследуемого вещества при выбранных значениях температуры.



**Приложение В**  
**(справочное)**

**Экспериментальные данные**

Результаты измерений относительного удлинения и среднего ТКЛР образцов из бериллия на ГПД и ВДТ, реализующем абсолютное измерение относительного удлинения в соответствии с методикой, разработанной для данного материала в статическом режиме, приведены в таблицах В.1—В.6.

**Таблица В.1** — Результаты измерений относительного удлинения и среднего ТКЛР образца 1 из бериллия на ВДТ

| Температура,<br>$T_p$ , К | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ |
|---------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 413,11                    | 1783,706                | 12,74                            | 1765,940                | 12,61                            | 1778,377                | 12,70                            |
| 433,05                    | 2070,192                | 12,94                            | 2053,680                | 12,84                            | 2064,000                | 12,90                            |
| 452,89                    | 2360,912                | 13,12                            | 2346,775                | 13,04                            | 2353,844                | 13,08                            |
| 473,15                    | 2655,342                | 13,28                            | 2655,342                | 13,28                            | 2647,368                | 13,24                            |
| 493,08                    | 2967,122                | 13,49                            | 2949,355                | 13,41                            | 2958,239                | 13,45                            |
| 513,11                    | 3275,338                | 13,65                            | 3255,725                | 13,57                            | 3265,531                | 13,61                            |
| 533,14                    | 3592,571                | 13,82                            | 3571,058                | 13,73                            | 3581,815                | 13,78                            |
| 552,99                    | 3916,002                | 13,99                            | 3876,998                | 13,85                            | 3904,300                | 13,94                            |
| 573,23                    | 4231,227                | 14,10                            | 4214,319                | 14,05                            | 4218,546                | 14,06                            |
| 593,20                    | 4559,501                | 14,25                            | 4532,198                | 14,16                            | 4545,850                | 14,21                            |
| 612,93                    | 4867,753                | 14,32                            | 4887,282                | 14,37                            | 4853,106                | 14,27                            |
| 633,06                    | 5240,880                | 14,56                            | 5188,680                | 14,41                            | 5225,220                | 14,51                            |
| 653,01                    | 5566,711                | 14,65                            | 5533,378                | 14,56                            | 5550,044                | 14,61                            |
| 672,99                    | 5909,904                | 14,77                            | 5886,288                | 14,72                            | 5892,192                | 14,73                            |
| 693,15                    | 6272,561                | 14,93                            | 6222,531                | 14,82                            | 6253,800                | 14,89                            |
| 713,22                    | 6617,609                | 15,04                            | 6577,982                | 14,95                            | 6597,796                | 14,99                            |
| 732,94                    | 6945,880                | 15,10                            | 6959,800                | 15,13                            | 6925,001                | 15,05                            |
| 752,99                    | 7305,360                | 15,22                            | 7320,000                | 15,25                            | 7283,400                | 15,17                            |
| 773,09                    | 7669,630                | 15,34                            | 7685,000                | 15,37                            | 7646,575                | 15,29                            |
| 820,01                    | 8768,201                | 16,03                            | 8724,426                | 15,95                            | 8741,936                | 15,99                            |
| 858,15                    | 9716,370                | 16,56                            | 9735,842                | 16,59                            | 9687,162                | 16,51                            |
| 868,83                    | 9963,193                | 16,69                            | 10023,212               | 16,79                            | 9933,184                | 16,64                            |

**Таблица В.2** — Результаты измерений относительного удлинения и среднего ТКЛР образца 2 из бериллия на ВДТ

| Температура,<br>$T_p$ , К | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ |
|---------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 412,13                    | 1778,377                | 12,70                            | 1781,930                | 12,73                            | 1780,153                | 12,72                            |
| 433,06                    | 2068,128                | 12,93                            | 2072,256                | 12,95                            | 2070,192                | 12,94                            |

Окончание таблицы В.2

| Температура,<br>$T_j$ , К | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ |
|---------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 453,08                    | 2363,269                | 13,13                            | 2367,981                | 13,16                            | 2365,625                | 13,14                            |
| 473,05                    | 2663,316                | 13,32                            | 2668,632                | 13,34                            | 2665,974                | 13,33                            |
| 492,04                    | 2958,239                | 13,45                            | 2964,161                | 13,47                            | 2961,200                | 13,46                            |
| 513,03                    | 3265,531                | 13,61                            | 3272,069                | 13,63                            | 3268,800                | 13,62                            |
| 533,01                    | 3581,815                | 13,78                            | 3588,985                | 13,80                            | 3585,400                | 13,79                            |
| 553,01                    | 3892,599                | 13,90                            | 3900,400                | 13,93                            | 3896,500                | 13,92                            |
| 573,08                    | 4222,773                | 14,08                            | 4231,227                | 14,10                            | 4227,000                | 14,09                            |
| 592,98                    | 4541,299                | 14,19                            | 4550,400                | 14,22                            | 4545,850                | 14,21                            |
| 613,10                    | 4867,753                | 14,32                            | 4877,518                | 14,35                            | 4872,635                | 14,33                            |
| 633,11                    | 5204,340                | 14,46                            | 5214,780                | 14,49                            | 5209,560                | 14,47                            |
| 653,04                    | 5544,489                | 14,59                            | 5555,600                | 14,62                            | 5550,044                | 14,61                            |
| 673,05                    | 5886,288                | 14,72                            | 5898,096                | 14,75                            | 5892,192                | 14,73                            |
| 693,01                    | 6235,039                | 14,85                            | 6247,546                | 14,88                            | 6241,292                | 14,86                            |
| 713,03                    | 6591,191                | 14,98                            | 6604,400                | 15,01                            | 6597,796                | 14,99                            |
| 732,91                    | 6945,880                | 15,10                            | 6959,800                | 15,13                            | 6952,840                | 15,11                            |
| 753,11                    | 7298,040                | 15,20                            | 7312,680                | 15,23                            | 7305,360                | 15,22                            |
| 773,21                    | 7669,630                | 15,34                            | 7685,000                | 15,37                            | 7677,315                | 15,35                            |
| 819,34                    | 8728,803                | 15,96                            | 8746,313                | 15,99                            | 8737,558                | 15,98                            |
| 859,58                    | 9716,370                | 16,56                            | 9735,842                | 16,59                            | 9726,106                | 16,57                            |
| 867,90                    | 9973,196                | 16,71                            | 9993,203                | 16,74                            | 9983,200                | 16,73                            |

Таблица В.3 — Результаты измерений относительного удлинения и среднего ТКЛР образца 3 из бериллия на ВДТ

| Температура, $T_j$ , К | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ |
|------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 412,89                 | 1773,047                | 12,66                            | −0,1                    | 1774,823                         | 12,68                   | 0,1                              |
| 432,93                 | 2070,192                | 12,94                            | 0,4                     | 2072,256                         | 12,95                   | 0,6                              |
| 453,11                 | 2365,625                | 13,14                            | 0,5                     | 2367,981                         | 13,16                   | 0,7                              |
| 472,93                 | 2663,316                | 13,32                            | 0,3                     | 2665,974                         | 13,33                   | 0,5                              |
| 493,07                 | 2964,161                | 13,47                            | 0,2                     | 2967,122                         | 13,49                   | 0,4                              |
| 513,12                 | 3275,338                | 13,65                            | 0,3                     | 3278,606                         | 13,66                   | 0,5                              |
| 533,11                 | 3592,571                | 13,82                            | 0,3                     | 3596,156                         | 13,83                   | 0,5                              |
| 553,04                 | 3904,300                | 13,94                            | 0,2                     | 3908,201                         | 13,96                   | 0,4                              |
| 573,03                 | 4231,227                | 14,10                            | 0,2                     | 4235,454                         | 14,12                   | 0,4                              |
| 593,01                 | 4559,501                | 14,25                            | 0,3                     | 4564,051                         | 14,26                   | 0,5                              |
| 613,10                 | 4892,165                | 14,39                            | 0,3                     | 4897,047                         | 14,40                   | 0,5                              |

Окончание таблицы В.3

| Температура, $T_p$ , К | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ |
|------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 633,21                 | 5235,660                | 14,54                            | 0,4                     | 5240,880                         | 14,56                   | 0,6                              |
| 652,18                 | 5561,156                | 14,63                            | 0,2                     | 5566,711                         | 14,65                   | 0,4                              |
| 673,16                 | 5909,904                | 14,77                            | 0,2                     | 5915,808                         | 14,79                   | 0,4                              |
| 692,92                 | 6241,292                | 14,86                            | −0,1                    | 6247,546                         | 14,88                   | 0,1                              |
| 713,01                 | 6577,982                | 14,95                            | −0,3                    | 6584,587                         | 14,96                   | −0,1                             |
| 732,07                 | 6973,720                | 15,16                            | 0,3                     | 6980,679                         | 15,18                   | 0,5                              |
| 753,17                 | 7327,320                | 15,27                            | 0,2                     | 7334,640                         | 15,28                   | 0,4                              |
| 773,14                 | 7700,370                | 15,40                            | 0,3                     | 7708,055                         | 15,42                   | 0,5                              |
| 821,00                 | 8746,313                | 15,99                            | 0                       | 8755,069                         | 16,01                   | 0,2                              |
| 859,93                 | 9755,313                | 16,62                            | 0,3                     | 9765,049                         | 16,64                   | 0,5                              |
| 868,75                 | 9983,200                | 16,73                            | −0,1                    | 9993,203                         | 16,74                   | 0,1                              |

Таблица В.4 — Результаты измерений относительного удлинения и среднего ТКЛР образца 1 из бериллия на ГПД

| Температура, $T_p$ , К | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ |
|------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 253,14                 | −205,205                | 10,26                            | −204,385                | 10,22                            | −204,590                | 10,23                            |
| 312,99                 | 461,076                 | 11,53                            | 462,000                 | 11,55                            | 459,690                 | 11,49                            |
| 333,10                 | 708,214                 | 11,80                            | 703,973                 | 11,73                            | 706,093                 | 11,77                            |
| 353,07                 | 962,722                 | 12,03                            | 956,957                 | 11,96                            | 959,839                 | 12,00                            |
| 373,23                 | 1225,446                | 12,25                            | 1218,108                | 12,18                            | 1221,777                | 12,22                            |
| 393,27                 | 1498,190                | 12,48                            | 1489,219                | 12,41                            | 1493,705                | 12,45                            |

Таблица В.5 — Результаты измерений относительного удлинения и среднего ТКЛР образца 2 из бериллия на ГПД

| Температура, $T_p$ , К | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ |
|------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 252,97                 | −203,975                | 10,20                            | −204,385                | 10,22                            | −204,180                | 10,21                            |
| 313,04                 | 463,848                 | 11,60                            | 464,772                 | 11,62                            | 464,310                 | 11,61                            |
| 333,01                 | 708,214                 | 11,80                            | 709,627                 | 11,83                            | 708,920                 | 11,82                            |
| 352,99                 | 961,761                 | 12,02                            | 963,682                 | 12,05                            | 962,722                 | 12,03                            |
| 373,15                 | 1225,446                | 12,25                            | 1227,892                | 12,28                            | 1226,669                | 12,27                            |
| 393,03                 | 1502,676                | 12,52                            | 1505,666                | 12,55                            | 1504,171                | 12,53                            |

Таблица В.6 — Результаты измерений относительного удлинения и среднего ТКЛР образца 3 из бериллия на ГПД

| Температура, $T_p$ , К | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6, K^{-1}$ |
|------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 253,12                 | −204,385                | 10,22                            | −0,2                    | −204,590                         | 10,23                   | 0                                |

Окончание таблицы В.6

| Температура,<br>$T_p$ , К | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup> | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup> | $\Delta L/L \cdot 10^6$ | $\alpha_{cp} \cdot 10^6$ , К <sup>-1</sup> |
|---------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|
| 312,89                    | 461,076                 | 11,53                                      | −0,1                    | 461,538                                    | 11,54                   | 0,1                                        |
| 332,04                    | 706,093                 | 11,77                                      | 0                       | 706,800                                    | 11,78                   | 0,2                                        |
| 353,11                    | 961,761                 | 12,02                                      | 0,2                     | 962,722                                    | 12,03                   | 0,4                                        |
| 372,97                    | 1224,223                | 12,24                                      | 0,2                     | 1225,446                                   | 12,25                   | 0,4                                        |
| 392,99                    | 1496,695                | 12,47                                      | 0,2                     | 1498,190                                   | 12,48                   | 0,4                                        |

Для приведения данных к единым температурам были определены полиномиальные зависимости тепловых эквивалентов пустого калориметра  $W_1$  и калориметра с бериллием  $W_2$  от температуры. Результаты измерений тепловых эквивалентов калориметров приведены в таблице В.7.

Таблица В.7 — Результаты измерений тепловых эквивалентов пустого калориметра и калориметра с бериллием

| Температура, °С | $W_1$ , Дж/К | Температура, °С | $W_2$ , Дж/К |
|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| −13,16          | 264,463      | −13,212         | 344,8705     |
| −9,53           | 265,142      | −9,654          | 343,8574     |
| −4,01           | 266,134      | −4,325          | 346,5658     |
| −2,80           | 266,435      | −2,677          | 347,4606     |
| −0,10           | 266,902      | −0,091          | 348,6979     |
| 6,41            | 268,043      | 6,385           | 351,7636     |
| 9,01            | 268,481      | 8,929           | 352,8132     |
| 16,89           | 269,803      | 16,818          | 356,3084     |
| 27,00           | 271,427      | 26,949          | 360,5969     |
| 37,01           | 272,957      | 36,960          | 364,5777     |
| 46,90           | 274,412      | 46,914          | 368,1630     |
| 56,72           | 275,779      | 56,675          | 371,9348     |
| 56,60           | 275,777      | 56,665          | 371,9106     |
| 65,00           | 276,909      | 65,054          | 374,6372     |
| 74,63           | 278,156      | 74,648          | 377,8263     |
| 84,01           | 279,348      | 84,161          | 380,8982     |
| 95,00           | 280,650      | 94,956          | 383,7759     |
| 104,30          | 281,738      | 104,316         | 386,6553     |
| 120,13          | 283,498      | 120,128         | 390,7699     |
| 129,70          | 284,522      | 129,739         | 393,1835     |
| 139,80          | 285,558      | 139,766         | 395,5720     |



Продолжение таблицы В.7

| Температура, °C | $W_1$ , Дж/К | Температура, °C | $W_2$ , Дж/К |
|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| 149,68          | 286,549      | 149,667         | 397,8334     |
| 159,71          | 287,523      | 159,690         | 400,2802     |
| 169,46          | 288,446      | 169,458         | 402,2480     |
| 184,88          | 289,852      | 184,874         | 405,2825     |
| 194,90          | 290,738      | 194,926         | 407,2672     |
| 210,42          | 292,062      | 210,431         | 410,1591     |
| 220,76          | 292,918      | 220,753         | 411,9175     |
| 237,66          | 294,277      | 237,654         | 414,9608     |
| 249,90          | 295,240      | 249,982         | 416,9960     |
| 265,15          | 296,394      | 265,123         | 419,4004     |
| 279,14          | 297,436      | 279,124         | 421,5411     |
| 291,02          | 298,319      | 291,214         | 423,3310     |
| 307,30          | 299,469      | 307,243         | 425,6300     |
| 315,25          | 300,036      | 315,246         | 426,7501     |
| 324,55          | 300,689      | 324,541         | 428,0278     |
| 332,46          | 301,241      | 332,452         | 429,1003     |
| 341,16          | 301,845      | 341,15          | 430,2623     |
| 354,14          | 302,742      | 354,142         | 431,9692     |
| 365,60          | 303,531      | 365,612         | 433,4530     |
| 374,13          | 304,116      | 374,128         | 434,5411     |
| 382,33          | 304,679      | 382,321         | 435,5800     |
| 391,121         | 305,284      | 391,124         | 436,6876     |
| 401,672         | 306,009      | 401,652         | 438,0036     |
| 412,505         | 306,761      | 412,521         | 439,3546     |
| 424,001         | 307,559      | 423,987         | 440,7743     |
| 431,835         | 308,110      | 431,842         | 441,7451     |
| 442,110         | 308,835      | 442,112         | 443,0149     |
| 457,570         | 309,939      | 457,564         | 444,9298     |
| 466,001         | 310,549      | 465,987         | 445,9785     |
| 474,352         | 311,162      | 474,354         | 447,0246     |
| 482,320         | 311,752      | 482,321         | 448,0263     |
| 490,684         | 312,378      | 490,682         | 449,0850     |

Окончание таблицы В.7

| Температура, °C | $W_1$ , Дж/К | Температура, °C | $W_2$ , Дж/К |
|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| 501,230         | 313,179      | 501,231         | 450,4321     |
| 511,107         | 313,942      | 511,112         | 451,7078     |
| 524,241         | 314,976      | 524,236         | 453,4265     |
| 531,952         | 315,595      | 531,946         | 454,4505     |
| 540,218         | 316,270      | 540,224         | 455,5633     |
| 549,882         | 317,072      | 549,876         | 456,8793     |
| 561,230         | 318,034      | 561,227         | 458,4548     |
| 569,119         | 318,717      | 569,122         | 459,5697     |
| 583,125         | 319,958      | 583,121         | 461,5886     |
| 590,180         | 320,598      | 590,172         | 462,6271     |
| 599,130         | 321,425      | 599,121         | 463,9672     |
| −13,010         | 264,504      | −13,001         | 342,1030     |
| −5,047          | 266,003      | −5,040          | 346,2086     |
| −2,018          | 266,556      | −2,014          | 347,7099     |
| −2,021          | 266,555      | −2,015          | 347,7145     |
| 0,012           | 266,920      | 0,011           | 348,8355     |
| 50,033          | 274,855      | 50,032          | 369,1057     |
| 100,078         | 281,251      | 100,087         | 385,0981     |
| 150,025         | 286,584      | 150,021         | 397,8822     |
| 199,980         | 291,176      | 199,988         | 408,2955     |
| 249,015         | 295,165      | 249,011         | 416,9206     |
| 300,010         | 298,952      | 300,009         | 424,5169     |
| 349,980         | 302,455      | 349,978         | 431,3006     |
| 399,985         | 305,894      | 399,982         | 437,7099     |
| 450,055         | 309,400      | 450,053         | 444,0247     |
| 499,999         | 313,085      | 500,001         | 450,4270     |
| 550,029         | 317,085      | 550,032         | 457,0540     |
| 600,001         | 321,507      | 599,998         | 463,9409     |

А затем с учетом массы образца из бериллия 49,140881 г рассчитаны значения удельной теплоемкости, представленные в таблице В.8.

Т а б л и ц а В.8 — Полученные значения удельной теплоемкости бериллия

| Температура, °С | $C_p$ , Дж/(кг · К) | Температура, °С | $C_p$ , Дж/(кг · К) | Температура, °С | $C_p$ , Дж/(кг · К) |
|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|
| –13,212         | 1585,978            | 220,75          | 2424,907            | 511,11          | 2802,635            |
| –9,654          | 1609,134            | 237,65          | 2456,744            | 524,24          | 2816,663            |
| –4,325          | 1642,705            | 249,98          | 2478,671            | 531,95          | 2824,992            |
| –2,677          | 1652,828            | 265,12          | 2504,231            | 540,22          | 2834,023            |
| –0,091          | 1668,475            | 279,12          | 2526,629            | 549,88          | 2844,685            |
| 6,385           | 1706,444            | 291,21          | 2545,093            | 561,23          | 2857,433            |
| 8,929           | 1720,905            | 307,24          | 2568,429            | 569,12          | 2866,45             |
| 16,818          | 1764,215            | 315,25          | 2579,63             | 583,12          | 2882,778            |
| 26,949          | 1816,681            | 324,54          | 2592,292            | 590,17          | 2891,184            |
| 36,96           | 1865,366            | 332,45          | 2602,792            | 599,12          | 2902,045            |
| 46,914          | 1910,956            | 341,15          | 2614,062            | –13,001         | 1587,368            |
| 56,675          | 1953,177            | 354,14          | 2630,401            | –5,04           | 1638,275            |
| 56,665          | 1953,135            | 365,61          | 2644,379            | –2,014          | 1656,867            |
| 65,054          | 1987,617            | 374,13          | 2654,512            | –2,015          | 1656,861            |
| 74,648          | 2025,162            | 382,32          | 2664,082            | 0,011           | 1669,087            |
| 84,161          | 2060,543            | 391,12          | 2674,185            | 50,032          | 1924,699            |
| 94,956          | 2098,632            | 401,65          | 2686,052            | 100,09          | 2116,017            |
| 104,32          | 2130,014            | 412,52          | 2698,085            | 150,02          | 2264,409            |
| 120,13          | 2179,846            | 423,99          | 2710,576            | 199,99          | 2382,686            |
| 129,74          | 2208,333            | 431,84          | 2719,033            | 249,01          | 2476,982            |
| 139,77          | 2236,713            | 442,11          | 2729,99             | 300,01          | 2558,052            |
| 149,67          | 2263,474            | 457,56          | 2746,318            | 349,98          | 2625,226            |
| 159,69          | 2289,368            | 465,99          | 2755,167            | 399,98          | 2684,184            |
| 169,46          | 2313,511            | 474,35          | 2763,94             | 450,05          | 2738,4              |
| 184,87          | 2349,572            | 482,32          | 2772,29             | 500             | 2790,873            |
| 194,93          | 2371,831            | 490,68          | 2781,064            | 550,03          | 2844,859            |
| 210,43          | 2404,37             | 501,23          | 2792,171            | 600             | 2903,121            |

## Приложение Г (справочное)

### Метод обработки экспериментальных данных

#### Г.1 Метод обработки экспериментальных данных по ТКЛР

##### Г.1.1 Основные положения

При обработке результатов измерений ТКЛР бериллия для аппроксимации экспериментальных данных в системе были использованы кубические сплайны пониженной кривизны, минимизирующие взвешенное СКО. Построение сплайнов осуществляли по значениям удлинения при различных температурах с добавлением условий непрерывности первой и второй производной в узлах аппроксимации. На краях интервала применяли квадратичную аппроксимацию: для  $N$  узлов аппроксимации сплайны содержат  $4(N - 3) + 3 \cdot 2 = 4N - 6$  коэффициентов, для определения которых имеется  $N + 3(N - 2) = 4N - 6$  уравнений. На данном множестве узлов аппроксимации сумма сплайнов также являлась сплайном того же вида, что позволило представить аппроксимирующий сплайн в виде, аналогичном полиномам Лагранжа  $S(T) = \sum_1^N C_i S_i(T)$ , где сплайны  $S_i$  удовлетворяют условиям  $S_i(T_j) = \delta_{ij}$  (символ Кронекера).

Особенностью результатов дилатометрических измерений является их привязка в пределах каждой  $k$ -серии к ее начальной температуре  $T_{k0}$  относительно длины образца, при которой и измеряют его удлинение. Аналогично аппроксимирующую зависимость строят относительно некоторой фиксированной температуры  $T_0$  (обычно 20 °С), значение удлинения при которой принимают равным нулю. Соответственно к множеству узлов аппроксимации добавляют точку  $T_0$ , в которой все  $S_i = 0$ . Дальнейшие вычисления проводят методом сингулярного разложения, позволяющим находить решение линейных систем с матрицами неполного ранга. Поиск аппроксимирующей функции сводят к решению системы линейных уравнений относительно коэффициентов  $C_i$ :  $A_{kij} C_i = DL_{kj} w_{kj}$  с матрицей  $A_{kij}$ , вычисляемой как  $A_{kij} = (S_i(T_{kj}) - (S_i(T_{k0})w_{kj})$ . Значения весов  $w_{kj}$  выбирают согласно оценкам погрешности экспериментальных данных. Для получения сглаженных сплайнов к матрице  $A_{kij}$  добавляют строки, соответствующие скачкам производных от сплайнов в узлах аппроксимации, умноженные на коэффициент сглаживания. Соответствующие компоненты вектора правых частей принимают равными нулю. Сингулярное разложение минимизирует квадратичное отклонение. Таким образом, сплайны, полученные в результате расчетов, оказываются «спрямленными». Степень спрямления зависит от коэффициента сглаживания и может быть выбрана в процессе аппроксимации.

Увеличение коэффициента сглаживания совместно с увеличением числа узлов аппроксимации позволяет повысить ее точность. При оптимальном выборе коэффициента сглаживания получают достаточно гладкие кривые не только для относительного удлинения, но и для истинного ТКЛР, т. е. для производной удлинения по температуре.

##### Г.1.2 Порядок оценки неопределенности измерений ТКЛР

При оценке характеристик точности измерений для каждого температурного диапазона вычисляют среднее арифметическое значение ТКЛР  $\bar{\alpha}$  из  $n$ , полученных методом сплайнов ТКЛР по формуле

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_{i=1}^5 \alpha_i}{n}, \quad (\text{Г.1})$$

где  $n$  — число измерений всех образцов ТКЛР.

Стандартную неопределенность  $u_A$  по типу А вычисляют по формулам:

$$u_A = \frac{S}{\sqrt{n}}; \quad (\text{Г.2})$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum (\alpha_i - \bar{\alpha})^2}{n-1}}, \quad (\text{Г.3})$$

где  $S$  — выборочное СКО случайной погрешности измерений.



Стандартную неопределенность  $u_B$  по типу В вычисляют по формуле

$$u_B = \frac{\Theta_{(p)}}{k\sqrt{3}}, \quad (\text{Г.4})$$

где  $\Theta_{(p)}$  — доверительные границы неисключенной систематической погрешности результата измерений на используемом средстве измерений, складываемой из неисключенной систематической погрешности (далее — НСП) метода и неисключенной систематической погрешности средства измерений:

$$\Theta_{(p)} = \sqrt{\sum \Theta_j^2},$$

где  $j$  — обозначение составляющей неисключенной систематической погрешности;

$\Theta_{(p)}$  принимают равным суммарному квадратическому отклонению результатов измерений на применимом СИ, так как оно учитывает и НСП метода и НСП самого СИ;

$k$  — коэффициент, равный 1,1 при доверительной вероятности  $P = 0,95$ . Суммарную стандартную неопределенность  $u_C$  вычисляют по формуле

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}. \quad (\text{Г.5})$$

Расширенную неопределенность  $U_p$  вычисляют по формуле

$$U_p = k \cdot u_C, \quad (\text{Г.6})$$

где  $k$  — принимают равным 2 при уровне доверия 95 %.

### Г.1.3 Результаты оценки неопределенности измерений ТКЛР

Результаты оценки неопределенности измерений ТКЛР для образцов 1—3 после обработки измеренных значений методом, указанным в Г.1, приведены в таблице Г.1.

Т а б л и ц а Г.1 — Результаты оценки неопределенности измерений ТКЛР

| $T_i$                     |                |   | Измеренный коэффициент линейного расширения в диапазоне 293,15 – $T_i$ , $\alpha_{cp} \times 10^6, K^{-1}$ |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------|----------------|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                           |                |   | 260                                                                                                        | 300   | 340   | 380   | 420   | 460   | 500   | 540   |
| Образец 1                 | Измере-<br>ние | 1 | 10,41                                                                                                      | 11,28 | 11,91 | 12,33 | 12,8  | 13,2  | 13,55 | 13,87 |
|                           |                | 2 | 10,4                                                                                                       | 11,32 | 11,87 | 12,3  | 12,76 | 13,18 | 13,52 | 13,83 |
|                           |                | 3 | 10,41                                                                                                      | 11,3  | 11,88 | 12,32 | 12,79 | 13,17 | 13,54 | 13,84 |
| Образец 2                 |                | 4 | 10,43                                                                                                      | 11,31 | 11,9  | 12,31 | 12,8  | 13,19 | 13,52 | 13,83 |
|                           |                | 5 | 10,4                                                                                                       | 11,33 | 11,92 | 12,34 | 12,76 | 13,22 | 13,55 | 13,86 |
|                           |                | 6 | 10,4                                                                                                       | 11,3  | 11,88 | 12,3  | 12,79 | 13,18 | 13,53 | 13,84 |
| Образец 3                 |                | 7 | 10,39                                                                                                      | 11,27 | 11,87 | 12,3  | 12,73 | 13,17 | 13,52 | 13,84 |
|                           |                | 8 | 10,41                                                                                                      | 11,3  | 11,91 | 12,32 | 12,77 | 13,19 | 13,54 | 13,86 |
| Ср. $\times 10^6, K^{-1}$ |                |   | 10,41                                                                                                      | 10,41 | 11,30 | 11,89 | 12,32 | 12,78 | 13,19 | 13,53 |
| СКО $\times 10^7, K^{-1}$ |                |   | 0,06                                                                                                       | 0,12  | 0,20  | 0,20  | 0,15  | 0,24  | 0,17  | 0,13  |
| $u_A \times 10^7, K^{-1}$ |                |   | 0,03                                                                                                       | 0,04  | 0,07  | 0,07  | 0,05  | 0,09  | 0,06  | 0,05  |
| $u_B \times 10^7, K^{-1}$ |                |   | 0,2                                                                                                        | 0,2   | 0,2   | 0,2   | 0,2   | 0,50  | 0,50  | 0,50  |
| $u_C \times 10^7, K^{-1}$ |                |   | 0,20                                                                                                       | 0,20  | 0,21  | 0,21  | 0,21  | 0,51  | 0,50  | 0,50  |
| $U_D \times 10^7, K^{-1}$ |                |   | 0,41                                                                                                       | 0,41  | 0,42  | 0,42  | 0,41  | 1,01  | 1,01  | 1,00  |

Окончание таблицы Г.1

| $T_i$                               |           |   | Измеренный коэффициент линейного расширения в диапазоне 293,15 – $T_i$ , $\alpha_{\text{ср}} \times 10^6$ , К <sup>-1</sup> |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------|-----------|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                     |           |   | 580                                                                                                                         | 620   | 660   | 700   | 740   | 780   | 820   | 860   | 870   |
| Образец 1                           | Измерение | 1 | 14,15                                                                                                                       | 14,35 | 14,68 | 14,92 | 15,18 | 15,44 | 16,03 | 16,57 | 16,76 |
|                                     |           | 2 | 14,12                                                                                                                       | 14,37 | 14,65 | 14,91 | 15,2  | 15,46 | 15,95 | 16,6  | 16,79 |
|                                     |           | 3 | 14,12                                                                                                                       | 14,32 | 14,66 | 14,91 | 15,19 | 15,42 | 15,99 | 16,53 | 16,75 |
| Образец 2                           |           | 4 | 14,16                                                                                                                       | 14,33 | 14,64 | 14,89 | 15,19 | 15,42 | 15,97 | 16,56 | 16,73 |
|                                     |           | 5 | 14,12                                                                                                                       | 14,38 | 14,69 | 14,93 | 15,21 | 15,46 | 15,99 | 16,59 | 16,76 |
|                                     |           | 6 | 14,1                                                                                                                        | 14,34 | 14,68 | 14,91 | 15,17 | 15,43 | 15,99 | 16,57 | 16,75 |
| Образец 3                           |           | 7 | 14,12                                                                                                                       | 14,33 | 14,64 | 14,87 | 15,17 | 15,43 | 15,98 | 16,62 | 16,74 |
|                                     |           | 8 | 14,13                                                                                                                       | 14,36 | 14,7  | 14,92 | 15,2  | 15,45 | 15,99 | 16,64 | 16,75 |
| Ср. $\times 10^6$ , К <sup>-1</sup> |           |   | 10,41                                                                                                                       | 14,13 | 14,35 | 14,67 | 14,91 | 15,19 | 15,44 | 15,99 | 16,59 |
| СКО $\times 10^7$ , К <sup>-1</sup> |           |   | 0,06                                                                                                                        | 0,19  | 0,21  | 0,23  | 0,19  | 0,15  | 0,16  | 0,23  | 0,35  |
| $u_A \times 10^7$ , К <sup>-1</sup> |           |   | 0,03                                                                                                                        | 0,07  | 0,07  | 0,08  | 0,07  | 0,05  | 0,06  | 0,08  | 0,12  |
| $u_B \times 10^7$ , К <sup>-1</sup> |           |   | 0,2                                                                                                                         | 0,50  | 0,50  | 0,50  | 0,50  | 0,60  | 0,60  | 0,60  | 0,60  |
| $u_C \times 10^7$ , К <sup>-1</sup> |           |   | 0,20                                                                                                                        | 0,50  | 0,51  | 0,51  | 0,50  | 0,60  | 0,60  | 0,61  | 0,61  |
| $U_p \times 10^7$ , К <sup>-1</sup> |           |   | 0,41                                                                                                                        | 1,01  | 1,01  | 1,01  | 1,01  | 1,20  | 1,21  | 1,21  | 1,23  |

**Г.1.4 Оценка достоверности данных по ТКЛР**

Оценку достоверности полученных данных по ТКЛР из бериллия проводили многократным повторением измерений ТКЛР в выбранном температурном диапазоне с последующей совместной обработкой измерений и сравнением с экспериментальными данными для этого материала, полученными в 2017—2019 гг.

Расхождения не превышают суммарной стандартной неопределенности ВДТ в данном температурном интервале ( $1,5 \cdot 10^{-7} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

**Г.2 Метод обработки данных по удельной теплоемкости****Г.2.1 Порядок оценки неопределенности измерений удельной теплоемкости**

Значения СКО  $S_{\delta W_{\text{ед}}}$  единичных измерений тепловых эквивалентов для пустого адиабатического калориметра и калориметра с бериллием вычисляют по формулам:

$$S_{W_{1\text{ед}}} = \sqrt{\frac{\sum (W_1 - \overline{W}_1)^2}{(n_1 - \nu_1)}}, S_{W_{2\text{ед}}} = \sqrt{\frac{\sum (W_2 - \overline{W}_2)^2}{n_2 - \nu_2}}, \quad (\text{Г.7})$$

где  $\overline{W}_1$  — значение теплового эквивалента адиабатического калориметра с бериллием, соответствующее значению полинома при заданной температуре;

$\overline{W}_2$  — значение теплового эквивалента пустого адиабатического калориметра, соответствующее значению полинома при заданной температуре;

$n_1$  — число измерений теплового эквивалента адиабатического калориметра с бериллием;

$n_2$  — число измерений теплового эквивалента пустого адиабатического калориметра;

$\nu_1 = l_1 + 1$  — степень полинома  $l_1$  с учетом свободного члена для измерений теплового эквивалента адиабатического калориметра с бериллием;

$\nu_2 = l_2 + 1$  — степень  $l_2$  полинома с учетом свободного члена для измерений теплового эквивалента пустого адиабатического калориметра.

Абсолютное СКО измерений удельной теплоемкости определяют по формуле

$$S_{C_{уд}} = \frac{1}{m} \sqrt{S_{(W_1 - W_2)}^2} = \frac{1}{m} \sqrt{S_{W_{1ед}}^2 + S_{W_{2ед}}^2}. \quad (\text{Г.8})$$

Относительное СКО  $S_{\delta C_{уд}}$ , измерений удельной теплоемкости бериллия определяют по формуле

$$S_{\delta C_{уд}} = \frac{S_{C_{уд}}}{C_{уд}} = \frac{\sqrt{S_{W_{1ед}}^2 + S_{W_{2ед}}^2}}{W_1^* - W_2^*}, \quad (\text{Г.9})$$

где  $W_1^*, W_2^*$  — средние значения тепловых эквивалентов для адиабатического калориметра с бериллием и пустого адиабатического калориметра во всем диапазоне измерений температуры.

$$\text{Или в процентном выражении: } S_{\delta C_{уд}} = \frac{S_{C_{уд}}}{C_{уд}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{S_{W_{1ед}}^2 + S_{W_{2ед}}^2}}{W_1^* - W_2^*} \cdot 100\%.$$

Стандартная неопределенность по типу  $u_A$  равна [2] относительной СКО измерений удельной теплоемкости:  $u_A = S_{\delta W}$ .

Суммарную стандартную неопределенность  $u_C$  вычисляют по формуле

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}, \quad (\text{Г.10})$$

где  $u_B$  — неопределенность результата измерений, оцениваемая по типу В, приведена в паспорте на эталон.

Расширенную неопределенность для уровня доверия 0,95 определяют по выражению

$$U_p = k \cdot u_C, \quad (\text{Г.11})$$

где  $k$  — принимают равным 2 при уровне доверия 95 %.

## Г.2.2 Результаты оценки неопределенности измерений удельной теплоемкости

В таблице В.7 приведены измеренные значения тепловых эквивалентов пустого калориметра и калориметра с бериллием (обозначены индексом «э»), по которым осуществлялись определения полиномиальных зависимостей тепловых эквивалентов от температуры (обозначены индексом «п»).

Для определения полиномиальных зависимостей пустого калориметра и калориметра с бериллием применяли метод наименьших квадратов. В таблице Г.2 представлены результаты расчета неопределенности с учетом полученных полиномов и экспериментальных отклонений от них при соответствующих температурах.

Т а б л и ц а Г.2 — Расчет неопределенности измерений удельной теплоемкости

| Температура, °С | $W_{1э}$ , Дж/К<br>эксперимент | $W_{1п}$ , Дж/К<br>полином | $(W_{1п} - W_{1э})^2$ ,<br>(Дж/К) <sup>2</sup> | $W_{2э}$ , Дж/К<br>эксперимент | $W_{2п}$ , Дж/К<br>полином | $(W_{1п} - W_{1э})^2$ ,<br>(Дж/К) <sup>2</sup> |
|-----------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------|
| −13,212         | 264,463                        | 264,4738                   | $1,08 \cdot 10^{-4}$                           | 344,8705                       | 342,400                    | 6,10                                           |
| −9,654          | 265,142                        | 265,1651                   | $5,14 \cdot 10^{-4}$                           | 343,8574                       | 344,217                    | 0,13                                           |
| −4,325          | 266,134                        | 266,1919                   | $3,31 \cdot 10^{-3}$                           | 346,5658                       | 346,858                    | $8,56 \cdot 10^{-2}$                           |
| −2,677          | 266,435                        | 266,4123                   | $5,25 \cdot 10^{-4}$                           | 347,4606                       | 347,657                    | $3,84 \cdot 10^{-2}$                           |
| −0,091          | 266,902                        | 266,9002                   | $3,21 \cdot 10^{-6}$                           | 348,6979                       | 348,892                    | $3,78 \cdot 10^{-2}$                           |
| 6,385           | 268,043                        | 268,0476                   | $2,19 \cdot 10^{-5}$                           | 351,7636                       | 351,899                    | $1,83 \cdot 10^{-2}$                           |
| 8,929           | 268,481                        | 268,4943                   | $1,87 \cdot 10^{-4}$                           | 352,8132                       | 353,047                    | $5,48 \cdot 10^{-2}$                           |
| 16,818          | 269,803                        | 269,8139                   | $1,28 \cdot 10^{-4}$                           | 356,3084                       | 356,498                    | $3,58 \cdot 10^{-2}$                           |
| 26,949          | 271,427                        | 271,4349                   | $6,87 \cdot 10^{-5}$                           | 360,5969                       | 360,700                    | $1,06 \cdot 10^{-2}$                           |
| 36,960          | 272,957                        | 272,9649                   | $6,03 \cdot 10^{-5}$                           | 364,5777                       | 364,623                    | $2,04 \cdot 10^{-3}$                           |



Продолжение таблицы Г.2

| Температура, °С | $W_{1э}$ , Дж/К<br>эксперимент | $W_{1п}$ , Дж/К<br>полином | $(W_{1п} - W_{1э})^2$ ,<br>(Дж/К) <sup>2</sup> | $W_{2э}$ , Дж/К<br>эксперимент | $W_{2п}$ , Дж/К<br>полином | $(W_{1п} - W_{1э})^2$ ,<br>(Дж/К) <sup>2</sup> |
|-----------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------|
| 46,914          | 274,412                        | 274,4091                   | $7,38 \cdot 10^{-6}$                           | 368,1630                       | 368,318                    | $2,40 \cdot 10^{-2}$                           |
| 56,675          | 275,779                        | 275,7843                   | $3,01 \cdot 10^{-5}$                           | 371,9348                       | 371,760                    | $3,07 \cdot 10^{-2}$                           |
| 56,665          | 275,777                        | 275,7683                   | $8,45 \cdot 10^{-5}$                           | 371,9106                       | 371,756                    | $2,38 \cdot 10^{-2}$                           |
| 65,054          | 276,909                        | 276,9016                   | $4,94 \cdot 10^{-5}$                           | 374,6372                       | 374,582                    | $3,06 \cdot 10^{-3}$                           |
| 74,648          | 278,156                        | 278,1543                   | $4,17 \cdot 10^{-6}$                           | 377,8263                       | 377,675                    | $2,30 \cdot 10^{-2}$                           |
| 84,161          | 279,348                        | 279,3294                   | $3,55 \cdot 10^{-4}$                           | 380,8982                       | 380,605                    | $8,59 \cdot 10^{-2}$                           |
| 94,956          | 280,650                        | 280,6558                   | $3,22 \cdot 10^{-5}$                           | 383,7759                       | 383,779                    | $8,12 \cdot 10^{-6}$                           |
| 104,316         | 281,738                        | 281,7363                   | $4,24 \cdot 10^{-6}$                           | 386,6553                       | 386,409                    | $6,06 \cdot 10^{-2}$                           |
| 120,128         | 283,498                        | 283,4981                   | $1,88 \cdot 10^{-7}$                           | 390,7699                       | 390,617                    | $2,33 \cdot 10^{-2}$                           |
| 129,739         | 284,522                        | 284,5185                   | $1,43 \cdot 10^{-5}$                           | 393,1835                       | 393,042                    | $2,01 \cdot 10^{-2}$                           |
| 139,766         | 285,558                        | 285,5616                   | $1,27 \cdot 10^{-5}$                           | 395,5720                       | 395,472                    | $1,00 \cdot 10^{-2}$                           |
| 149,667         | 286,549                        | 286,5507                   | $1,64 \cdot 10^{-6}$                           | 397,8334                       | 397,779                    | $3,01 \cdot 10^{-3}$                           |
| 159,690         | 287,523                        | 287,5253                   | $3,67 \cdot 10^{-6}$                           | 400,2802                       | 400,025                    | $6,52 \cdot 10^{-2}$                           |
| 169,458         | 288,446                        | 288,4461                   | $1,39 \cdot 10^{-7}$                           | 402,2480                       | 402,134                    | $1,31 \cdot 10^{-2}$                           |
| 184,874         | 289,852                        | 289,8521                   | $2,87 \cdot 10^{-7}$                           | 405,2825                       | 405,312                    | $8,47 \cdot 10^{-4}$                           |
| 194,926         | 290,738                        | 290,7359                   | $3,67 \cdot 10^{-6}$                           | 407,2672                       | 407,292                    | $5,98 \cdot 10^{-4}$                           |
| 210,431         | 292,062                        | 292,0615                   | $5,69 \cdot 10^{-7}$                           | 410,1591                       | 410,215                    | $3,13 \cdot 10^{-3}$                           |
| 220,753         | 292,918                        | 292,9182                   | $3,29 \cdot 10^{-7}$                           | 411,9175                       | 412,080                    | $2,63 \cdot 10^{-2}$                           |
| 237,654         | 294,277                        | 294,2776                   | $5,63 \cdot 10^{-8}$                           | 414,9608                       | 415,004                    | $1,86 \cdot 10^{-3}$                           |
| 249,982         | 295,240                        | 295,2340                   | $4,11 \cdot 10^{-5}$                           | 416,9960                       | 417,045                    | $2,36 \cdot 10^{-3}$                           |
| 265,123         | 296,394                        | 296,3962                   | $4,12 \cdot 10^{-6}$                           | 419,4004                       | 419,454                    | $2,90 \cdot 10^{-3}$                           |
| 279,124         | 297,436                        | 297,4372                   | $1,76 \cdot 10^{-6}$                           | 421,5411                       | 421,597                    | $3,08 \cdot 10^{-3}$                           |
| 291,214         | 298,319                        | 298,3043                   | $2,04 \cdot 10^{-4}$                           | 423,3310                       | 423,387                    | $3,10 \cdot 10^{-3}$                           |
| 307,243         | 299,469                        | 299,4727                   | $1,64 \cdot 10^{-5}$                           | 425,6300                       | 425,684                    | $2,86 \cdot 10^{-3}$                           |
| 315,246         | 300,036                        | 300,0358                   | $7,97 \cdot 10^{-8}$                           | 426,7501                       | 426,801                    | $2,57 \cdot 10^{-3}$                           |
| 324,541         | 300,689                        | 300,6894                   | $3,97 \cdot 10^{-7}$                           | 428,0278                       | 428,076                    | $2,36 \cdot 10^{-3}$                           |
| 332,452         | 301,241                        | 301,2414                   | $7,76 \cdot 10^{-8}$                           | 429,1003                       | 429,145                    | $1,96 \cdot 10^{-3}$                           |
| 341,15          | 301,845                        | 301,8459                   | $6,91 \cdot 10^{-7}$                           | 430,2623                       | 430,302                    | $1,61 \cdot 10^{-3}$                           |
| 354,142         | 302,742                        | 302,7421                   | $7,59 \cdot 10^{-8}$                           | 431,9692                       | 432,003                    | $1,12 \cdot 10^{-3}$                           |
| 365,612         | 303,531                        | 303,5306                   | $6,80 \cdot 10^{-7}$                           | 433,4530                       | 433,479                    | $6,50 \cdot 10^{-4}$                           |
| 374,128         | 304,116                        | 304,1167                   | $1,70 \cdot 10^{-7}$                           | 434,5411                       | 434,561                    | $4,10 \cdot 10^{-4}$                           |
| 382,321         | 304,679                        | 304,6795                   | $3,82 \cdot 10^{-7}$                           | 435,5800                       | 435,594                    | $2,01 \cdot 10^{-4}$                           |
| 391,124         | 305,284                        | 305,2837                   | $4,26 \cdot 10^{-8}$                           | 436,6876                       | 436,696                    | $6,61 \cdot 10^{-5}$                           |
| 401,652         | 306,009                        | 306,0106                   | $1,91 \cdot 10^{-6}$                           | 438,0036                       | 438,004                    | $2,79 \cdot 10^{-7}$                           |



Продолжение таблицы Г.2

| Температура, °C | $W_{1э}$ , Дж/К<br>эксперимент | $W_{1п}$ , Дж/К<br>полином | $(W_{1п} - W_{1э})^2$ ,<br>(Дж/К) <sup>2</sup> | $W_{2э}$ , Дж/К<br>эксперимент | $W_{2п}$ , Дж/К<br>полином | $(W_{1п} - W_{1э})^2$ ,<br>(Дж/К) <sup>2</sup> |
|-----------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------|
| 412,521         | 306,761                        | 306,7600                   | $1,23 \cdot 10^{-6}$                           | 439,3546                       | 439,347                    | $5,23 \cdot 10^{-5}$                           |
| 423,987         | 307,559                        | 307,5602                   | $9,57 \cdot 10^{-7}$                           | 440,7743                       | 440,759                    | $2,23 \cdot 10^{-4}$                           |
| 431,842         | 308,110                        | 308,1092                   | $2,42 \cdot 10^{-7}$                           | 441,7451                       | 441,725                    | $3,90 \cdot 10^{-4}$                           |
| 442,112         | 308,835                        | 308,8346                   | $2,01 \cdot 10^{-8}$                           | 443,0149                       | 442,989                    | $6,79 \cdot 10^{-4}$                           |
| 457,564         | 309,939                        | 309,9397                   | $1,87 \cdot 10^{-7}$                           | 444,9298                       | 444,896                    | $1,16 \cdot 10^{-3}$                           |
| 465,987         | 310,549                        | 310,5504                   | $1,04 \cdot 10^{-6}$                           | 445,9785                       | 445,941                    | $1,42 \cdot 10^{-3}$                           |
| 474,354         | 311,162                        | 311,1618                   | $2,17 \cdot 10^{-8}$                           | 447,0246                       | 446,984                    | $1,62 \cdot 10^{-3}$                           |
| 482,321         | 311,752                        | 311,7514                   | $5,54 \cdot 10^{-9}$                           | 448,0263                       | 447,984                    | $1,76 \cdot 10^{-3}$                           |
| 490,682         | 312,378                        | 312,3777                   | $2,27 \cdot 10^{-8}$                           | 449,0850                       | 449,042                    | $1,89 \cdot 10^{-3}$                           |
| 501,231         | 313,179                        | 313,1789                   | $5,87 \cdot 10^{-9}$                           | 450,4321                       | 450,389                    | $1,88 \cdot 10^{-3}$                           |
| 511,112         | 313,942                        | 313,9418                   | $1,52 \cdot 10^{-7}$                           | 451,7078                       | 451,666                    | $1,74 \cdot 10^{-3}$                           |
| 524,236         | 314,976                        | 314,9767                   | $1,59 \cdot 10^{-7}$                           | 453,4265                       | 453,390                    | $1,36 \cdot 10^{-3}$                           |
| 531,946         | 315,595                        | 315,5960                   | $2,36 \cdot 10^{-7}$                           | 454,4505                       | 454,418                    | $1,05 \cdot 10^{-3}$                           |
| 540,224         | 316,270                        | 316,2700                   | $2,43 \cdot 10^{-7}$                           | 455,5633                       | 455,537                    | $6,99 \cdot 10^{-4}$                           |
| 549,876         | 317,072                        | 317,0720                   | $2,53 \cdot 10^{-7}$                           | 456,8793                       | 456,862                    | $3,02 \cdot 10^{-4}$                           |
| 561,227         | 318,034                        | 318,0344                   | $6,63 \cdot 10^{-8}$                           | 458,4548                       | 458,451                    | $1,50 \cdot 10^{-5}$                           |
| 569,122         | 318,717                        | 318,7171                   | $6,86 \cdot 10^{-8}$                           | 459,5697                       | 459,577                    | $5,54 \cdot 10^{-5}$                           |
| 583,121         | 319,958                        | 319,9584                   | $1,30 \cdot 10^{-7}$                           | 461,5886                       | 461,620                    | $1,01 \cdot 10^{-3}$                           |
| 590,172         | 320,598                        | 320,5986                   | $5,35 \cdot 10^{-7}$                           | 462,6271                       | 462,673                    | $2,13 \cdot 10^{-3}$                           |
| 599,121         | 321,425                        | 321,4258                   | $7,06 \cdot 10^{-7}$                           | 463,9672                       | 464,034                    | $4,45 \cdot 10^{-3}$                           |
| −13,001         | 264,504                        | 264,5023                   | $3,00 \cdot 10^{-6}$                           | 342,1030                       | 342,509                    | 0,17                                           |
| −5,040          | 266,003                        | 266,0017                   | $1,66 \cdot 10^{-6}$                           | 346,2086                       | 346,509                    | $9,04 \cdot 10^{-2}$                           |
| −2,014          | 266,556                        | 266,5548                   | $5,25 \cdot 10^{-7}$                           | 347,7099                       | 347,975                    | $7,05 \cdot 10^{-2}$                           |
| −2,015          | 266,555                        | 266,5543                   | $1,18 \cdot 10^{-6}$                           | 347,7145                       | 347,975                    | $6,78 \cdot 10^{-2}$                           |
| 0,011           | 266,920                        | 266,9204                   | $3,21 \cdot 10^{-8}$                           | 348,8355                       | 348,941                    | $1,11 \cdot 10^{-2}$                           |
| 50,032          | 274,855                        | 274,8548                   | $1,99 \cdot 10^{-8}$                           | 369,1057                       | 369,436                    | 0,11                                           |
| 100,087         | 281,251                        | 281,2501                   | $1,09 \cdot 10^{-6}$                           | 385,0981                       | 385,234                    | $1,85 \cdot 10^{-2}$                           |
| 150,021         | 286,584                        | 286,5847                   | $1,55 \cdot 10^{-7}$                           | 397,8822                       | 397,859                    | $5,22 \cdot 10^{-4}$                           |
| 199,988         | 291,176                        | 291,1750                   | $4,73 \cdot 10^{-7}$                           | 408,2955                       | 408,263                    | $1,05 \cdot 10^{-3}$                           |
| 249,011         | 295,165                        | 295,1657                   | $9,57 \cdot 10^{-8}$                           | 416,9206                       | 416,886                    | $1,17 \cdot 10^{-3}$                           |
| 300,009         | 298,952                        | 298,9523                   | $5,14 \cdot 10^{-9}$                           | 424,5169                       | 424,657                    | $1,97 \cdot 10^{-2}$                           |
| 349,978         | 302,455                        | 302,4555                   | $1,90 \cdot 10^{-8}$                           | 431,3006                       | 431,461                    | $2,58 \cdot 10^{-2}$                           |
| 399,982         | 305,894                        | 305,8942                   | $4,28 \cdot 10^{-8}$                           | 437,7099                       | 437,797                    | $7,61 \cdot 10^{-3}$                           |
| 450,053         | 309,400                        | 309,4003                   | $2,04 \cdot 10^{-8}$                           | 444,0247                       | 443,968                    | $3,28 \cdot 10^{-3}$                           |

Окончание таблицы Г.2

| Температура, °C                     | $W_{1э}$ , Дж/К<br>эксперимент | $W_{1п}$ , Дж/К<br>полином | $(W_{1п} - W_{1э})^2$ ,<br>(Дж/К) <sup>2</sup> | $W_{2э}$ , Дж/К<br>эксперимент | $W_{2п}$ , Дж/К<br>полином | $(W_{1п} - W_{1э})^2$ ,<br>(Дж/К) <sup>2</sup> |
|-------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------|
| 500,001                             | 313,085                        | 313,0847                   | $2,34 \cdot 10^{-8}$                           | 450,4270                       | 450,231                    | $3,85 \cdot 10^{-2}$                           |
| 550,032                             | 317,085                        | 317,0844                   | $6,33 \cdot 10^{-8}$                           | 457,0540                       | 456,883                    | $2,91 \cdot 10^{-2}$                           |
| 599,998                             | 321,507                        | 321,5072                   | $7,88 \cdot 10^{-8}$                           | 463,9409                       | 464,169                    | $5,19 \cdot 10^{-2}$                           |
| $\Sigma(W_i - \bar{W}_i)^2$         | —                              | —                          | $5,82 \cdot 10^{-3}$                           | —                              | —                          | 7,70                                           |
| $n_i - \nu_i$                       | 77                             |                            |                                                |                                |                            |                                                |
| $S_{\text{вед}}^2$<br>(эксперимент) | $7,6 \cdot 10^{-5}$            |                            |                                                | 0,1                            |                            |                                                |
| $W_{\text{ср}}$ , Дж/кг             | 293,831                        |                            |                                                | 410,389                        |                            |                                                |
| СКО, $S_{\text{уд}}$ , %            | 0,3                            |                            |                                                |                                |                            |                                                |
| $u_A$ , %                           | 0,3                            |                            |                                                |                                |                            |                                                |
| $u_B$ , %                           | 0,004                          |                            |                                                |                                |                            |                                                |
| $u_C$ , %                           | 0,3                            |                            |                                                |                                |                            |                                                |
| $U_p$ , %                           | 0,6                            |                            |                                                |                                |                            |                                                |

**Г.2.3 Оценка достоверности данных по удельной теплоемкости**

Оценку достоверности полученных данных по удельной теплоемкости бериллия проводили многократным повторением измерений в выбранном температурном диапазоне с последующей совместной обработкой и сравнением полиномиальной зависимости и значений полинома с данными, полученными в 2017—2019 гг.

Отклонения значений полинома от ранее полученных не превышают погрешности калориметра КА-С4 в данном температурном интервале.

## Библиография

- [1] Компан Т.А., Кулагин В.И., Власова В.В., Кондратьев С.В., Лукин А.Я., Пухов Н.Ф. Государственный первичный эталон единицы удельной теплоемкости твердых тел ГЭТ 60-2019 // Измерительная техника. — 2020. — № 6, — С.3—8
- [2] Руководство по выражению неопределенности измерения/под ред. В.А. Слаева. — СПб.: ОНТИ ГП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» — 1999, 134 с.

---

УДК 536.413.2:661.666.2:006.354

ОКС 17.020

Ключевые слова: стандартные справочные данные, вещества, материалы, свойства, неопределенность

---

Редактор *Н.А. Аргунова*  
Технический редактор *И.Е. Черепкова*  
Корректор *О.В. Лазарева*  
Компьютерная верстка *А.Н. Золотаревой*

Сдано в набор 15.02.2024. Подписано в печать 11.03.2024. Формат 60×84%. Гарнитура Ариал.  
Усл. печ. л. 3,26. Уч.-изд. л. 2,77.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

---

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «Институт стандартизации» для комплектования Федерального информационного фонда стандартов, 117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.  
[www.gostinfo.ru](http://www.gostinfo.ru) [info@gostinfo.ru](mailto:info@gostinfo.ru)