

Научная статья

УДК 536.413.2:536.631

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-7-58-62>

## Результаты исследования теплофизических свойств перспективных материалов

Татьяна Андреевна Компан<sup>1✉</sup>, Валентин Иванович Кулагин<sup>2</sup>, Виктория Владимировна Власова<sup>3</sup>,  
Сергей Валерьевич Кондратьев<sup>4</sup>, Николай Федорович Пухов<sup>5</sup>

1, 2, 3, 4, 5 Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>T.A.Kompan@vniim.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-2072-3997>

<sup>2</sup>V.I.Kulagin@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0530-7154>

<sup>3</sup>V.V.Vlasova@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9160-0826>

<sup>4</sup>S.V.Kondratiev@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7020-889X>

<sup>5</sup>N.F.Pukhov@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6618-6819>

**Аннотация.** Представлены результаты измерений температурного коэффициента линейного расширения и удельной теплоёмкости вольфрама, меди, серебра, молибдена, бериллия, лейкосапфира, углерод-углеродного композитного материала марки ТЕРМАР ДФ КО. Исследования всех материалов проведены на государственных первичных эталонах ВНИИМ им. Д. И. Менделеева в последние годы. Проанализирована стабильность свойств материалов и установлена целесообразность применения данных материалов для изготовления средств воспроизведения и передачи теплофизических единиц в целях обеспечения достоверности измерений.

**Ключевые слова:** теплофизические свойства, тепловое расширение, температурный коэффициент линейного расширения, теплоёмкость, вольфрам, молибден, медь, серебро, бериллий, лейкосапфир

**Для цитирования:** Компан Т. А., Кулагин В. И., Власова В. В., Кондратьев С. В., Пухов Н. Ф. Результаты исследований теплофизических свойств перспективных материалов // Измерительная техника. 2022. № 7. С. 58–62. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-7-58-62>

## Results of studies of thermophysical properties of promising materials

Tatiana A. Kompan<sup>1✉</sup>, Valentin I. Kulagin<sup>2</sup>, Viktoriya V. Vlasova<sup>3</sup>, Sergei V. Kondratiev<sup>4</sup>, Nikolay F. Pukhov<sup>5</sup>

1, 2, 3, 4, 5 D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM), St. Petersburg, Russia

<sup>1</sup>T.A.Kompan@vniim.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-2072-3997>

<sup>2</sup>V.I.Kulagin@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0530-7154>

<sup>3</sup>V.V.Vlasova@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9160-0826>

<sup>4</sup>S.V.Kondratiev@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7020-889X>

<sup>5</sup>N.F.Pukhov@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6618-6819>

**Abstract.** The article presents the results of measurements of the temperature coefficient of linear expansion and the proportion of heat capacity of tungsten, copper, silver, molybdenum, beryllium, sapphire, carbon-carbon composite material of the TERMAR DF KO brand. Studies of all materials were carried out on the state primary standards of D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM) in recent years. The authors analyzed the stability of the reproduction of properties by materials. The authors analyzed the stability of the properties of materials and established the feasibility of using these materials for the manufacture of means for reproducing and transmitting thermophysical units.

**Keywords:** thermophysical properties, thermal expansion, heat capacity, tungsten, molybdenum, copper, silver, beryllium, sapphire

**Введение.** Информация о теплофизических свойствах материалов позволяет инженерам и научным сотрудникам прогнозировать режимы и условия работы машин и механизмов, рассчитывать и проектировать конструкции сложных систем, приборов и узлов. В настоящее время не существует

однозначных теорий для расчёта или прогнозирования значений тех или иных свойств материалов, веществ и сложных смесей либо систем, поэтому исследователи, инженеры, специалисты лабораторий и технических институтов экспериментально определяют теплофизические свойства. Точность

определения значений теплофизических характеристик влияет на точность расчётов или конструкционных построений. Многообразие методов и аппаратуры для определения теплофизических свойств делает актуальным обеспечение единства измерений в данной области. Важным фактором достижения единства измерений является обеспечение средствами передачи единицы – в большинстве случаев – мерами сравнения (эталонными материалами).

Практика показала, что часть факторов, влияющих на точность измерений, не входит в явном виде в уравнение измерений и не учитывается при расчёте погрешности. Поэтому чем ближе по теплофизическим свойствам будет выбран материал для калибровки, градуировки или отладки средства измерений (СИ), тем точнее будут измерены свойства исследуемого вещества. Для этого необходим широкий набор эталонных материалов.

Цель данной статьи – представить результаты исследований теплового расширения и удельной теплоёмкости материалов, наиболее перспективных по совокупности теплофизических свойств для применения в качестве мер удельной теплоёмкости и температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР).

**Результаты исследований удельной теплоёмкости материалов.** Исследования проведены на Государственном первичном эталоне единицы удельной теплоёмкости твёрдых тел ГЭТ 60-2019 [1, 2].

Для оценки возможности применения в качестве мер удельной теплоёмкости в целях обеспечения единства измерений выбраны вольфрам, медь, серебро, молибден, бериллий, лейкосапфир. Из указанных материалов были изготовлены образцы в форме цилиндра длиной  $(50,00 \pm 0,05)$  мм и диаметром  $(5,00 \pm 0,01)$  мм. Большинство образцов, используемых для определения ТКЛР, имели такие же форму и размер, за счёт чего мера могла передавать единицы нескольких физических величин.

Вольфрам выбран как представитель высокоплотных материалов с высокой

теплопроводностью, достаточно низкими температуропроводностью и теплоёмкостью. Образцы для измерения удельной теплоёмкости изготовлены из вольфрама чистотой 99,87 %. В табл. 1 представлены результаты измерений удельной теплоёмкости  $C_p$  вольфрама в диапазоне температуры  $T=260...870$  К на ГЭТ 60-2019 и значения удельной теплоёмкости вольфрама чистотой 99,9 % [3], используемые Американским институтом стандартов и технологий (NIST) для метрологического обеспечения данной области измерений. Расширенная неопределённость  $U_p$  измерений удельной теплоёмкости на ГЭТ 60-2019 не превысила 0,35 %. Максимальное отклонение обобщённых данных [3] от среднего значения, полученного по полиному, составило 1,1 %. Отклонение результатов измерений, полученных во ВНИИМ, от данных [3] не превышает 0,5 %.

В табл. 2 приведены данные по удельной теплоёмкости меди в диапазоне температуры  $T=260...500$  К, полученные во ВНИИМ и описанные в [3–6]. Медь выбрана как представитель материалов с высокой теплопроводностью, сравнительно низкой теплоёмкостью и относительно высокой температуропроводностью. Для изготовления мер использована медь чистотой 99,67 %. Расширенная неопределённость измерения удельной теплоёмкости указанных мер не превысила 0,35 %. Максимальное количество примесей образцов, исследованных в [3], не превышало 0,1 %. В статьях [4–6] представлены результаты измерений мер из меди чистотой не менее 98,5 %. Отклонение результатов, полученных во ВНИИМ на ГЭТ 60-2019, от значений, приведенных в [3–6], не превысило 0,8 %.

В качестве представителя хорошо проводящих материалов, имеющих низкую теплоёмкость и высокую температуропроводность, выбрано серебро марки Ag999,9. Результаты измерений удельной теплоёмкости мер из серебра и их сравнение с данными из [5, 7], приведены в табл. 3. Расширенная неопределённость измерений удельной теплоёмкости на ГЭТ 60-2019 не превысила 0,23 %. Максимальные отклонения от данных из [5, 7] не превышают 0,60 и 0,25 % соответственно.

Молибден выбран как наиболее стабильный тугоплавкий металл, обеспечивающий воспроизведение удельной

Таблица 1

Удельная теплоёмкость,  
Дж/(кг·К), вольфрама

| T, K | ГЭТ 60-2019 | Данные [3] |
|------|-------------|------------|
| 260  | 130,861     | 129,515    |
| 300  | 132,599     | 132,452    |
| 350  | 134,505     | 134,302    |
| 400  | 136,156     | 135,770    |
| 500  | 138,862     | 138,381    |
| 600  | 141,065     | 140,720    |
| 700  | 143,114     | 142,896    |
| 800  | 145,357     | 144,909    |
| 870  | 147,228     | –          |

Таблица 2

Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К), меди

| T, K | ГЭТ 60-2019 | Данные [3] | Данные [4] | Данные [5] | Данные [6] |
|------|-------------|------------|------------|------------|------------|
| 260  | 379,012     | 376,735    | –          | 377,000    | 376,573    |
| 280  | 381,828     | 381,141    | –          | 381,349    | 380,759    |
| 300  | 385,150     | 384,761    | 385,390    | 385,104    | 384,672    |
| 350  | 391,637     | 391,527    | –          | –          | 393,356    |
| 400  | 397,867     | 397,350    | 397,979    | –          | 400,656    |
| 450  | 403,693     | 403,015    | –          | –          | 406,807    |
| 500  | 409,023     | 407,736    | 408,995    | –          | 412,039    |

Таблица 3

Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К), серебра

| T, K | ГЭТ 60-2019 | Данные [7] | Данные [5] |
|------|-------------|------------|------------|
| 260  | 231,268     | 230,856    | 231,672    |
| 280  | 232,548     | 232,636    | 233,526    |
| 300  | 233,823     | 234,175    | 235,194    |
| 350  | 236,990     | 237,243    | –          |
| 400  | 240,127     | 240,303    | –          |
| 450  | 243,234     | 243,362    | –          |
| 500  | 246,311     | 246,430    | –          |
| 550  | 249,358     | 249,490    | –          |
| 600  | 252,375     | 252,549    | –          |
| 650  | 255,362     | 255,618    | –          |
| 700  | 258,319     | 258,677    | –          |
| 800  | 264,142     | 264,805    | –          |
| 870  | 268,148     | 268,457    | –          |

Таблица 4

Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К), молибдена

| T, К | ГЭТ 60-2019 | Данные [4] | Данные [8] | Данные [9] |
|------|-------------|------------|------------|------------|
| 260  | 243,246     | —          | —          | —          |
| 280  | 246,578     | —          | —          | 246,613    |
| 300  | 249,625     | 249,719    | 249,302    | 249,635    |
| 400  | 261,434     | 261,413    | 261,393    | 261,413    |
| 500  | 269,449     | 269,439    | 269,690    | 269,439    |
| 600  | 275,627     | 275,797    | 275,902    | 275,797    |
| 700  | 281,107     | 281,217    | 281,009    | 281,217    |
| 800  | 286,211     | 286,012    | 285,929    | 286,012    |
| 870  | 289,330     | —          | —          | —          |

Таблица 5

Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К), бериллия

| T, К | ГЭТ 60-2019 | Данные [10] | Данные [11] | Данные [12] |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 260  | 1592,042    | 1594,508    | —           | —           |
| 270  | 1652,690    | 1661,085    | —           | —           |
| 280  | 1710,318    | 1722,113    | —           | —           |
| 290  | 1765,050    | 1778,704    | —           | —           |
| 300  | 1817,009    | 1835,294    | —           | —           |
| 400  | 2209,144    | 2200,355    | 2212,374    | —           |
| 500  | 2439,462    | 2415,619    | 2433,705    | —           |
| 600  | 2587,885    | 2577,622    | 2602,768    | 2601,030    |
| 700  | 2708,592    | 2710,775    | 2733,302    | 2693,101    |
| 800  | 2830,020    | 2823,955    | 2839,046    | 2809,672    |
| 870  | 2917,926    | —           | 2905,676    | 2911,673    |

теплоёмкости в интервале температуры  $T=260\ldots 870$  К в диапазоне удельной теплоёмкости  $C_p=243,2\ldots 289,3$  Дж/(кг·К). Результаты измерений удельной теплоёмкости мер из молибдена чистотой 99,985 % на ГЭТ 60-2019 приведены в табл. 4. По результатам сравнения с данными [4, 8, 9] отклонение не превышает 0,13 %, что меньше расширенной неопределённости измерений на ГЭТ 60-2019, составляющей 0,36 %.

Для расширения диапазона измерений удельной теплоёмкости в качестве материала мер для ГЭТ 60-2019 выбран бериллий, имеющий максимальное (из стабильных металлов) значение удельной теплоёмкости в диапазоне температуры  $T=260\ldots 870$  К. Результаты измерений удельной теплоёмкости мер из бериллия на ГЭТ 60-2019 приведены в табл. 5. Значения расширенной неопределённости измерений не превысили 0,3 %.

По результатам исследования удельной теплоёмкости бериллия построен полином, который можно использовать для оценки значений удельной теплоёмкости для промежуточных температур, и установлена возможность применения меры из бериллия в качестве эталонной меры [13]. Для сравнения в табл. 5 представлены данные для бериллия различной чистоты. Наиболее близкий по чистоте материал описан в [11], для которого отклонение от значений удельной теплоёмкости, полученных во ВНИИМ, не превышает 1 %.

В табл. 6 приведены уточнённые значения удельной теплоёмкости монокристаллического оксида алюминия (лейкосапфира), измеренные на ГЭТ 60-2019. Лейкосапфир является

Таблица 6

Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К), лейкосапфира

| T, К | ГЭТ 60-2019 | Данные [14] |
|------|-------------|-------------|
| 260  | 686,966     | 684,778     |
| 310  | 799,702     | 799,431     |
| 360  | 887,394     | 887,113     |
| 410  | 955,272     | 954,492     |
| 460  | 1007,864    | 1007,062    |
| 510  | 1049,001    | 1048,450    |
| 560  | 1081,812    | 1081,699    |
| 610  | 1108,728    | 1108,866    |
| 660  | 1131,481    | 1131,326    |
| 760  | 1167,919    | 1166,732    |
| 870  | 1192,213    | 1196,106    |

наиболее стабильным по теплофизическим свойствам материалом.

Отклонение результатов измерений удельной теплоёмкости лейкосапфира, полученных на ГЭТ 60-2019, от данных [14] имеет наибольшие значения в крайних точках диапазона и не превышает 0,3 %. Расширенная неопределённость результатов измерений на ГЭТ 60-2019 не превышает 0,27 %.

Выбранные материалы показали стабильность значений удельной теплоёмкости при многократных циклах нагревания и во времени, хорошую сходимости результатов измерений образцов материалов из одной партии, а также с учётом литературных данных достаточную воспроизводимость результатов измерений. Таким образом, исследованные материалы можно использовать в качестве средств передачи единицы удельной теплоёмкости от ГЭТ 60-2019 подчинённым СИ согласной поверочной схеме.

**Результаты исследований температурного коэффициента линейного расширения.** Не менее важной теплофизической характеристикой материалов является ТКЛР, описывающий явление теплового расширения тел – способность изменять линейные размеры тела с изменением его температуры. В общем случае определяют объёмный коэффициент линейного расширения  $\beta = \Delta V / (V_0 \Delta T)$ , где  $\Delta V$  – относительное изменение объёма исследуемого образца при изменении температуры на  $\Delta T$ ;  $V_0$  – начальный объём образца.

Однако в случае изотропного материала ТКЛР определяют как  $\alpha = \Delta L / (L_0 \Delta T)$ , где  $\Delta L$  – относительное удлинение образца исследуемого образца при изменении температуры на  $\Delta T$ ;  $L_0$  – начальная длина образца.

Во ВНИИМ функционирует Государственный первичный эталон единицы температурного коэффициента линейного расширения твёрдых тел ГЭТ 24-2018 [15]. Для обеспечения единства измерений в области измерений ТКЛР созданы и исследованы меры ТКЛР из различных материалов. Прослеживаемость должна обеспечиваться вплоть до рабочих СИ – дилатометров.

Одним из наиболее стабильных и хорошо изученных материалов для мер ТКЛР является лейкосапфир. Высокая точность аппаратуры из состава ГЭТ 24-2018 позволяет использовать лейкосапфир с различной ориентацией кристаллической оси «С» и измерять его ТКЛР. Результаты измерений ТКЛР (средние значения) образцов лейкосапфира с ориентацией 59; 90; 180° приведены в табл. 7.

Приведённые данные получены на установках из состава ГЭТ 24-2018 – интерференционных дилатометрах ДИС-7 (для температурного диапазона  $-180\ldots +300$  °С) и ДИВ-6

Таблица 7

ТКЛР  $\alpha \cdot 10^{-6}, \text{K}^{-1}$ , лейкосапфира с различной ориентацией оси «С»

| $\Delta T, ^\circ\text{C}$ | $59^\circ$ | $90^\circ$ | $180^\circ$ |
|----------------------------|------------|------------|-------------|
| –180...+20                 | 3,11       | 2,80       | 3,35        |
| –100...+20                 | 4,07       | 3,93       | 4,42        |
| 20...100                   | 5,86       | 5,62       | 6,42        |
| 20...200                   | 6,39       | 6,14       | 6,99        |
| 20...300                   | 6,81       | 6,56       | 7,39        |
| 20...400                   | 7,13       | 6,87       | 7,72        |
| 20...500                   | 7,38       | 7,12       | 7,98        |
| 20...800                   | 7,94       | 7,71       | 8,58        |
| 20...1000                  | 8,25       | 8,06       | 8,91        |
| 20...1200                  | 8,5        | 8,39       | 9,24        |
| 20...1500                  | 8,95       | 8,87       | 9,65        |

Таблица 8

Средний ТКЛР и расширенная неопределённость высокотемпературных материалов

| $\Delta T, ^\circ\text{C}$ | Вольфрам                              |                                    | Молибден                              |                                    | УУКМ                                  |                                    |
|----------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|
|                            | $\alpha \cdot 10^{-6}, \text{K}^{-1}$ | $U_p \cdot 10^{-6}, \text{K}^{-1}$ | $\alpha \cdot 10^{-6}, \text{K}^{-1}$ | $U_p \cdot 10^{-6}, \text{K}^{-1}$ | $\alpha \cdot 10^{-6}, \text{K}^{-1}$ | $U_p \cdot 10^{-6}, \text{K}^{-1}$ |
| 20–800                     | 7,36                                  | 0,077                              | 6,05                                  | 0,075                              | 0,297                                 | 0,091                              |
| 20–1000                    | 7,64                                  | 0,077                              | 6,23                                  | 0,074                              | 0,472                                 | 0,073                              |
| 20–1200                    | 7,91                                  | 0,080                              | 6,41                                  | 0,077                              | 0,637                                 | 0,093                              |
| 20–1400                    | 8,17                                  | 0,080                              | 6,60                                  | 0,078                              | 0,810                                 | 0,059                              |
| 20–1600                    | 8,43                                  | 0,079                              | 6,80                                  | 0,079                              | 0,930                                 | 0,051                              |
| 20–1800                    | 8,68                                  | 0,082                              | 7,02                                  | 0,078                              | 1,016                                 | 0,044                              |
| 20–2000                    | 8,93                                  | 0,083                              | 7,27                                  | 0,082                              | 1,104                                 | 0,060                              |
| 20–2200                    | 9,18                                  | 0,084                              | 7,54                                  | 0,081                              | 1,136                                 | 0,058                              |
| 20–2400                    | 9,43                                  | 0,080                              | –                                     | –                                  | 1,236                                 | 0,092                              |
| 20–2600                    | 9,69                                  | 0,086                              | –                                     | –                                  | –                                     | –                                  |

(для температурного диапазона 20–1500  $^\circ\text{C}$ ) [15]. Расширенная неопределённость измерений (при коэффициенте охвата  $k=2$ ) составила  $(0,02–0,84) \cdot 10^{-8} \text{ K}^{-1}$  в зависимости от температурного диапазона.

В последние десятилетия возникла потребность в обеспечении единства измерений ТКЛР в высокотемпературной области вплоть до 3000 К. Для решения этого вопроса разработан и изготовлен высокотемпературный оптический dilatометр ДОВ-1 [16], вошедший в состав ГЭТ 24-2018. Для промышленности в высокотемпературном диапазоне представляют интерес тугоплавкие и композиционные материалы, в частности углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) – новый класс конструкционных материалов, предназначенных для создания теплонагруженных деталей планера воздушно-космических и гиперзвуковых самолётов, оснастки для металлургической промышленности и др. Они обладают уникальной способностью сохранять высокую прочность и жёсткость при температурах не выше 2700  $^\circ\text{C}$ .

В связи с этим в качестве мер ТКЛР выбраны стабильные тугоплавкие материалы с высокой температурой плавления – поликристаллические вольфрам и молибден, а также УУКМ марки ТЕРМАР ДФ КО.

Меры из этих материалов исследованы на ДОВ-1 во всём возможном температурном диапазоне 1000–3000 К. Приведённые в табл. 8 данные рассчитаны на основе серии из 10 измерений. Расширенная неопределённость измерений ТКЛР на dilatометре ДОВ-1 существенно превышает значения неопределённости, полученные на интерференционных dilatометрах, ввиду различия методов измерений как температуры, так и удлинения исследуемых образцов.

Данный набор мер перекрывает потребности передачи единицы ТКЛР в высокотемпературном диапазоне.

**Заключение.** Полученные результаты позволяют обеспечить единство измерений теплофизических свойств в области теплового расширения и теплоёмкости. Особенностью данного комплекса работ является multifunctionality предложенных мер – одна мера может передавать единицы нескольких физических величин: ТКЛР и теплоёмкости.

#### Список источников

1. Компан Т. А., Кулагин В. И., Власова В. В., Кондратьев С. В., Лукин А. Я., Пухов Н. Ф. Государственный первичный эталон единицы удельной теплоёмкости твёрдых тел ГЭТ 60-2019 // Измерительная техника. 2020. № 6. С. 3–8. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2020-6-3-8>
2. Андреева Т. А., Быков Н. Ю., Власова В. В., Компан Т. А., Кулагин В. И., Лукин А. Я. Эталонный адиабатический калориметр: аппаратная реализация и алгоритмы управления // Измерительная техника. 2021. № 11. С. 38–45. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-11-38-45>
3. White G. K., Collocott S. J., *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1994, vol. 13, no. 4, pp. 1251–1257. <https://doi.org/10.1063/1.555728>
4. Chase M. W. J., NIST-JANAF, Thermochemical Tables, 4th Edition, Monograph No. 9, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1998, 1951 p.
5. Furukawa G. T., Saba W. G., Reilly M. L., *Critical analysis of the heat-capacity data of the literature and evaluation of thermodynamic properties of copper, silver, and gold, from 0 to 300 °K*, Washington, USA, NIST, 1968, 64 p. <https://doi.org/10.6028/NBS.NSRDS.18>
6. Pawel R. E., Stansbury E., *J. Phys. Chem. Sol.*, 1965, vol. 26, no. 3, pp. 607–613. [https://doi.org/10.1016/0022-3697\(65\)90136-8](https://doi.org/10.1016/0022-3697(65)90136-8)
7. Arblaster J. W., *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 2015, vol. 36, pp. 573–591. <https://doi.org/10.1007/s11669-015-0411-5>
8. Desai P. D., *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1987, vol. 16, no. 1, pp. 91–108. <https://doi.org/10.1063/1.555794>
9. Dimitras D. A., Cezarliyan A., Ishihara S., *SRM 781 Enthalpy and heat capacity standard reference material: molybdenum, from 273 to 2800 K*, National Bureau of Standard, NBS special publication, Washington, USA, 1977, pp. 260–355.
10. Bodryakov V. Yu., *High Temperature*, 2018, vol. 56(2), pp. 177–183. <https://doi.org/10.1134/S0018151X18020049>
11. Ginnings D. C., Douglas T. B., Ball A. F., *Journal of the American Chemical Society*, 1951, vol. 73, no. 3, pp. 1236–1240. <https://doi.org/10.1021/ja01147a107>

12. Кантор П. Б., Красовицкая Р. М., Кисель А. Н. Определение энтальпии и удельной теплоёмкости бериллия в интервале 600–2200 К // Физика металлов и металловедение. 1960. Т. 10. № 6. С. 835–837.

13. Компан Т. А., Кулагин В. И., Власова В. В., Кондратьев С. В., Пухов Н. Ф. Измерение удельной теплоёмкости бериллия в диапазоне температур 260–870 К // Измерительная техника. 2021. № 3. С. 29–32.

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-3-29-32>

14. Donald G. Archer, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1993, vol. 22, no. 8, pp. 1441–1453.

<https://doi.org/10.1063/1.555931>

15. Компан Т. А., Кондратьев С. В., Коренев А. С., Пухов Н. Ф., Иночкин Ф. М., Круглов С. К., Бронштейн И. Г. Расширение температурного диапазона государственного первичного эталона единицы температурного коэффициента линейного расширения твёрдых тел // Измерительная техника. 2015. № 12. С. 34–38.

16. Kompan T. A., Kondratiev S. V., Korenev A. S., Pukhov N. F., Inochkin F. M., Kruglov S. K., Bronshtein I. G., *Int. Journal of Thermophysics*, 2018, vol. 39, no. 3 (40), pp. 1–9.

<https://doi.org/10.1007/s10765-017-2353-0>

#### References

1. Kompan T. A., Kulagin V. I., Vlasova V. V., Kondratiev S. V., Lukin A. Ya., Pukhov N. F., *Measurement Techniques*, 2020, vol. 63, no. 6, pp. 407–413. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01802-3>

2. Andreeva T. A., Bykov N. Y., Vlasova V. V., Kompan T. A., Kulagin V. I., Lukin A. Ya., *Measurement Techniques*, 2022, vol. 64, no. 11, pp. 903–911. <https://doi.org/10.1007/s11018-022-02023-6>

3. White G. K., Collocott S. J., *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1994, vol. 13, no. 4, pp. 1251–1257. <https://doi.org/10.1063/1.555728>

4. Chase M. W. J., NIST-JANAF, Thermochemical Tables, 4th Edition, Monograph No. 9, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1998, 1951 p.

5. Furukawa G. T., Saba W. G., Reilly M. L., *Critical analysis of the heat-capacity data of the literature and evaluation of*

*thermodynamic properties of copper, silver, and gold, from 0 to 300 °K*, Washington, USA, NIST, 1968, 64 p.

<https://doi.org/10.6028/NBS.NSRDS.18>

6. Pawel R. E., Stansbury E., *J. Phys. Chem. Sol.*, 1965, vol. 26, no. 3, pp. 607–613.

[https://doi.org/10.1016/0022-3697\(65\)90136-8](https://doi.org/10.1016/0022-3697(65)90136-8)

7. Arblaster J. W., *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 2015, vol. 36, pp. 573–591. <https://doi.org/10.1007/s11669-015-0411-5>

8. Desai P. D., *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1987, vol. 16, no. 1, pp. 91–108.

<https://doi.org/10.1063/1.555794>

9. Dimitras D. A., Cezarliyan A., Ishihara S., *SRM 781 Enthalpy and heat capacity standard reference material: molybdenum, from 273 to 2800 K*, National Bureau of Standard, NBS special publication, Washington, USA, 1977, pp. 260–355.

10. Bodryakov V. Yu., *High Temperature*, 2018, vol. 56(2), pp. 177–183. <https://doi.org/10.1134/S0018151X18020049>

11. Ginnings D. C., Douglas T. B., Ball A. F., *Journal of the American Chemical Society*, 1951, vol. 73, no. 3, pp. 1236–1240. <https://doi.org/10.1021/ja01147a107>

12. Kantor P. B., Krasovitskaya R. M., Kisel A. N., Determining the enthalpy and specific heat capacity of beryllium in the interval 600–2200 degrees K, *Physics of Metals and Metallography*, 1961, vol. 10, pp. 42–44.

13. Kompan T. A., Kulagin V. I., Vlasova V. V., Kondratiev S. V., Pukhov N. F., *Measurement Techniques*, 2021, vol. 64, no. 3, pp. 205–209. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01919-z>

14. Donald G. Archer, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1993, vol. 22, no. 8, pp. 1441–1453. <https://doi.org/10.1063/1.555931>

15. Kompan T. A., Kondratiev S. V., Korenev A. S., Pukhov N. F., Inochkin F. M., Kruglov S. K., Bronshtein I. G., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 58, no. 12, pp. 1341–1346. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-0896-2>

16. Kompan T. A., Kondratiev S. V., Korenev A. S., Pukhov N. F., Inochkin F. M., Kruglov S. K., Bronshtein I. G., *Int. Journal of Thermophysics*, 2018, vol. 39, no. 3 (40), pp. 1–9.

<https://doi.org/10.1007/s10765-017-2353-0>

Статья поступила в редакцию 02.06.2022; одобрена после рецензирования 15.06.2022; принята к публикации 16.06.2022. The article was submitted 02.06.2022; approved after reviewing 15.06.2022; accepted for publication 16.06.2022.