

# СИСТЕМА МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ЕДИНИЦЫ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР ОТ 260 ДО 870 К. ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕРВИЧНЫЙ ЭТАЛОН И СРЕДСТВА ПЕРЕДАЧИ

© Компан Т. А., Кулагин В. И., Власова В. В., Кондратьев С. В., Пухов Н. Ф.

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»  
(ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»), г. Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: T.A. Kompan@vniim.ru

Поступила в редакцию – 15 апреля 2020 г., после доработки – 20 мая 2020 г.  
Принята к публикации – 01 июня 2020 г.

*В статье приведены результаты создания нового государственного первичного эталона единицы удельной теплоемкости и средств передачи единицы удельной теплоемкости, эталонных мер из различных материалов. Приведены основные конструктивные особенности созданного калориметра, его метрологические характеристики и результаты измерения удельной теплоемкости исследованных материалов, включенных в состав эталона в качестве эталонных мер удельной теплоемкости, а также сравнение полученных результатов с данными других авторов.*

## METROLOGICAL SUPPORT SYSTEM FOR MEASURING THE UNIT OF SPECIFIC HEAT CAPACITY IN THE TEMPERATURE RANGE FROM 260 TO 870 K. STATE PRIMARY STANDARD AND TRANSMISSION MEANS

© Tatiana A. Kompan, Valentin I. Kulagin, Viktoriya V. Vlasova, Sergey V. Kondratiev, Nikolay F. Pukhov

D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM), Saint Petersburg, Russia  
e-mail: T.A. Kompan@vniim.ru

Received – 15 April, 2020. Revised – 20 May, 2020.  
Accepted for publication – 01 June, 2020.

*The article presents the results of creating a new state primary standard for the specific heat capacity unit and means for transmission of the unit to other devices, namely, reference measures from various materials. The main structural*

### Ссылка при цитировании:

Система метрологического обеспечения измерений единицы удельной теплоемкости в диапазоне температур от 260 до 870 к. Государственный первичный эталон и средства передачи / Т. А. Компан [и др.] // Эталоны. Стандартные образцы. 2020. Т. 16. № 2. С. 21–29 DOI: 10.20915/2687-0886-2020-16-2-21-29.

### For citation:

Kompan T. A., Kulagin V. I., Vlasova V. V., Kondratiev S. V., Pukhov N. F. Metrological support system for measuring the unit of specific heat capacity in the temperature range from 260 to 870 k. State primary standard and transmission means. *Measurement standards. Reference materials*. 2020;16(2): 21–29. DOI: 10.20915/2687-0886-2020-16-2-21-29 (In Russ.).

features of the created calorimeter, its metrological characteristics are described. The data on the specific heat capacity of some materials, considered as the reference measures of specific heat, are shown. The experimental data are compared with data, published by other researchers.

## Введение

Установки, воспроизводящие единицу удельной теплоемкости, созданы, эксплуатируются и продолжают совершенствоваться в большинстве промышленно развитых стран, таких как США (NIST) [1, 2], Германия (PTB) [3], Великобритания (NPL) [4, 5], японский метрологический институт (NML) [6, 7]. Практически все эти установки функционируют в интервале температуры от 273 до 800 К. В качестве основного метода измерения используется периодический ввод тепла в адиабатических условиях. Этот метод обеспечивает максимальную точность и, по сути, является негласным стандартом для данного вида измерений.

В России эталон удельной теплоемкости был создан в 1974 г. (ГЭТ-60–74) [8]. Со времени создания эталон выработал свой ресурс. В то же время за прошедшие десятилетия вырос парк средств измерений удельной теплоемкости и взаимосвязанных теплофизических свойств, данные по которым необходимы в приоритетных областях промышленности. Для актуализации системы обеспечения единства измерений удельной

теплоемкости, отвечающей изменившимся требованиям, во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» в период с 2017 по 2019 г. была проведена работа по усовершенствованию эталонного комплекса, основанная на новых конструктивных решениях.

## Аппаратура

Усовершенствованный государственный первичный эталон единицы удельной теплоемкости ГЭТ 60–2019 представляет собой комплекс средств измерений, служащий для воспроизведения, хранения единицы удельной теплоемкости и передачи ее размера вторичным эталонам. Комплекс средств измерений первичного эталона включает: калориметр адиабатический КА-С4; набор эталонных мер удельной теплоемкости; калориметр-компаратор для передачи единицы вторичным эталонам – мерам удельной теплоемкости.

Внешний вид комплекса средств измерений первичного эталона представлен на рис. 1а и 1б:

В ходе совершенствования ГПЭ были решены следующие задачи:

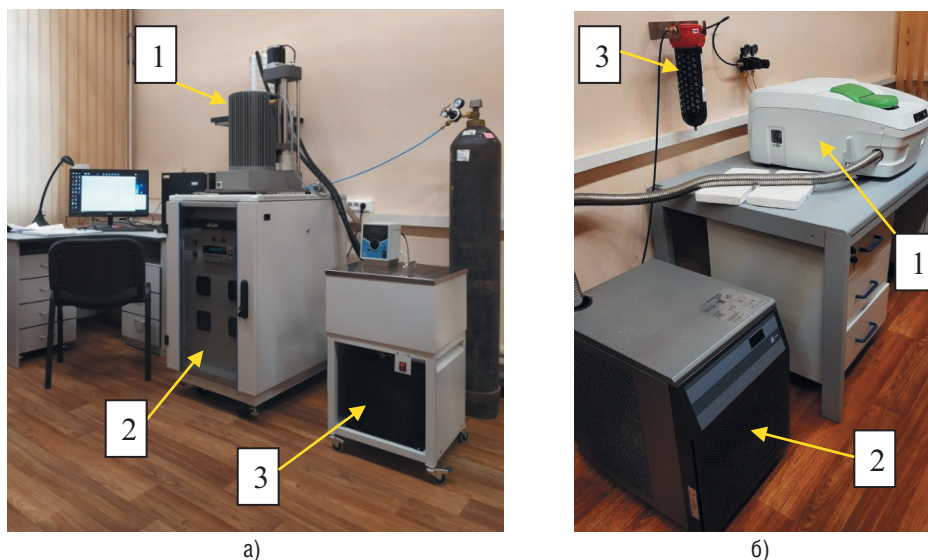


Рис. 1. Комплекс государственного первичного эталона единицы удельной теплоемкости ГЭТ 60–2019.

Рис. 1а. Адиабатический калориметр КА-С4: 1 – блок калориметра с измерительной ячейкой, 2 – блок измерительной аппаратуры, 3 – блок охлаждения.

Рис. 1б. Компаратор: 1 – дифференциальный сканирующий калориметр, 2 – блок охлаждения, 3 – фильтр-осушитель.

Fig. 1. The complex of the state primary standard for the specific heat capacity GET 60–2019.

Fig. 1a. Adiabatic calorimeter KA-C4: 1 – calorimeter unit with measuring cell, 2 – instrumentation unit, 3 – cooling unit;

Fig. 1b. Comparator: 1 – differential scanning calorimeter, 2 – cooling unit, 3 – filter-drier

– расширен диапазон воспроизведения единицы удельной теплоемкости – повышена верхняя граница диапазона воспроизведения единицы до 2900 Дж/(кг·К) для метрологического обеспечения единства измерений удельной теплоемкости средств измерений и материалов в соответствии с требованиями науки и техники;

– расширен диапазон рабочей температуры от 260 до 870 К, что позволит осуществлять сличения с государственными специальными эталонами единицы удельной теплоемкости твердых тел ГЭТ 67–2013 и ГЭТ 79–2019.

– созданы средства передачи единицы удельной теплоемкости.

**Калориметр адиабатический КА-С4  
из состава государственного первичного  
эталоны единицы удельной теплоемкости  
твердых тел**

Адиабатический калориметр, созданный в рамках совершенствования эталона единицы удельной теплоемкости, построен по классической схеме: образец (образцы) находятся в центральной ячейке (рис. 2).

Ячейка выполнена в форме цилиндра высотой 125 мм, и диаметром 42 мм с функциональными вертикальными каналами. Для упрощения технологии изготовления ячейка состоит из набора идентичных дисков.

Для уменьшения теплообмена ячейки с торцов она снабжена дополнительными крышкой и дном. Для той же цели (для уменьшения теплообмена с окружением) центральная ячейка калориметра окружена двумя концентрическими адиабатическими оболочками. Адиабатические оболочки выполнены из материала с высокой теплопроводностью, что создает условия в центральной части калориметра, близкие к изотермическим. Нагреватели оболочек размещены на наружных поверхностях оболочек, а термопреобразователи размещены на их внутренних поверхностях. С помощью нагревательного элемента внешней оболочки задается требуемая температура термостатирования. Управление работой калориметра осуществляется при помощи блока регулирования и измерения температуры и компьютера.

Для повышения чувствительности и минимизации погрешностей масса ячейки сделана минимально воз-

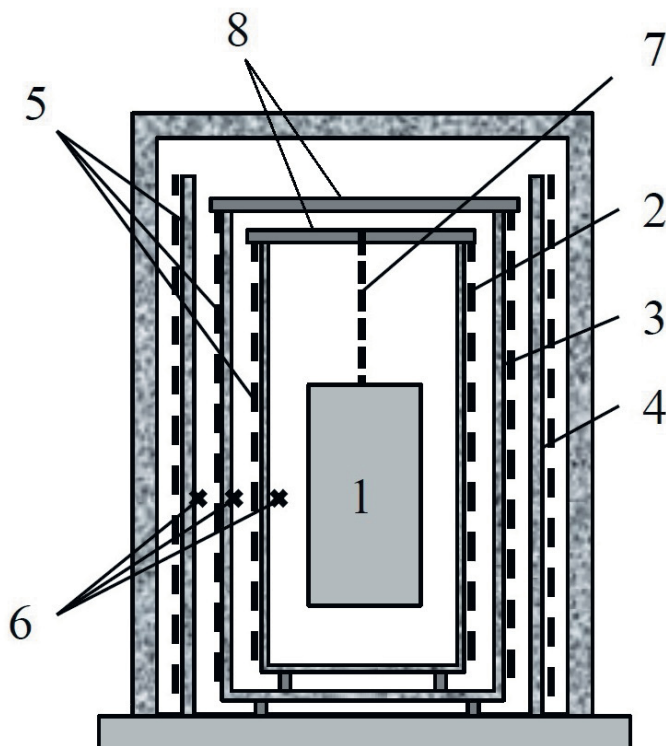


Рис. 2. Калориметр в разрезе: 1 – калориметрическая ячейка; 2, 3 – адиабатические оболочки; 4 – внешняя теплоизолирующая оболочка с фоновым нагревателем; 5 – нагреватели адиабатических оболочек и фоновый нагреватель; 6 – термопреобразователи; 7 – нить подвеса; 8 – крышки

Fig. 2. The section of calorimeter: 1 – calorimetric cell; 2, 3 – adiabatic shells; 4 – external insulating jacket with background heater; 5 – adiabatic shells heaters and background heater; 6 – thermal converters; 7 – suspension thread; 8 – covers

мальной. Образцы находятся в вертикальных цилиндрических каналах в центральной ячейке калориметра. В аналогичных каналах расположены термопреобразователи, отдельно – для системы формирования теплового режима и для измерения температуры. Нагреватель ячейки также расположен в каналах в теле ячейки. Для уменьшения перепадов температуры (неизотермичности) в центральной ячейке калориметра в конструкции реализована концепция распределенного нагревателя. Нагреватель разбит на 38 последовательно соединенных секций, также расположенных в каналах центральной ячейки так, что расстояние по материалу тела ячейки от нагревателя до ближайшего канала с образцом составляет всего 1–2 миллиметра.

В процессе измерения к ячейке периодически подается известное количество тепла, и измеряется вызванное этим повышение температуры ячейки с образцом. Теплоемкость ячейки без образцов определяется в аналогичном опыте. Разность между теплоемкостями (тепловыми эквивалентами) калориметра с образцом и пустого калориметра позволяет определить теплоемкость образца. Удельная теплоемкость находится делением полной теплоемкости на массу образцов, которая определяется в отдельном измерении.

Эксплуатация калориметра показала, что два контура системы автоматического регулирования обеспечивают качество адиабатичности (минимизацию теплообмена между калориметрической ячейкой и охранными оболочками), характеризующееся следующими показателями:

- значение поправки к измеренному подъему температуры на неадиабатичность в главном периоде опыта  $\delta_1 = K \cdot S \cdot (t_{06} - t_k) d\tau$  не превышает величины 0,001 К;
- значения температурных ходов в начальном и конечном периодах опыта не превышают величин  $(1-3) \cdot 10^{-6}$  К/с;

- среднее отклонение поддерживаемой разности температуры между контейнером и первой (внутренней) оболочкой от задания в начальном и конечном периодах опыта не превышает величины  $(1-5) \cdot 10^{-5}$  К.

Приведенные выше характеристики работы адиабатического калориметра позволили обеспечить воспроизводимость результатов измерения теплового эквивалента калориметра, т.е. среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек от сглаженной кривой, не превышающее 0,05 % в интервале температур 260–870 К.

В совокупности инновационные технические решения – распределенный нагреватель, минимизация массы центральной ячейки обеспечивают наилучшую равномерность температурного поля в калориметре

с образцами, что выгодно отличает данный калориметр от аналогов, существенно повышает точность измерений и обеспечивает более высокую достоверность значений измеряемой температуры.

Еще одним преимуществом созданного калориметра является возможность измерения теплоемкости цилиндрических образцов длиной от 10 до 50 мм. Образцы аналогичной формы и размеров применяются в эталонной единицы температурного коэффициента линейного расширения твердых тел ГЭТ 24–2018. Т.е. эталонный калориметр может быть применен для многофакторного исследования широкой номенклатуры материалов.

Таким образом, предлагаемый адиабатический калориметр позволяет исследовать широкую номенклатуру материалов и изделий с одновременным повышением точности измерений и расширением температурного диапазона.

Основные метрологические характеристики созданного эталонного комплекса приведены в табл. 1.

Для косвенной проверки корректности нашей оценки метрологических характеристик комплекса ГПЭ единицы удельной теплоемкости было выполнено сравнение результатов, полученных во ВНИИМ, с обобщением результатов измерения теплоемкости сапфира исследователями ряда ведущих стран, выполненным в NIST [9]. Это сравнение отображено на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что полученные расхождения результатов единичных измерений теплоемкости лейко-сапфира не превышают нашей оценки расширенной неопределенности усовершенствованного эталона и не содержат значимых систематических ошибок.

### Меры удельной теплоемкости и система передачи

Одной из задач совершенствования государственного первичного эталона единицы удельной теплоемкости было создание комплекта эталонных мер для воспроизведения и передачи единицы от первичного эталона ГЭТ 60–2019 средствами измерения, функционирующим в данной области температуры.

При создании средств передачи – мер удельной теплоемкости наиболее важным фактором выбора того или иного материала является его стабильность во времени и при многократных термоциклированиях во всем рабочем диапазоне температуры. Подтверждение стабильности материалов для применения их в качестве эталонных мер удельной теплоемкости потребовало проведения многократных длительных исследований ряда материалов, выбранных на основании предварительно проведенного анализа, для определения

Таблица 1. Метрологические характеристики комплекса ГПЭ единицы удельной теплоемкости  
Table 1. Metrological characteristics of the complex of the state primary standard for the specific heat capacity

Характеристика	Значение величины
Диапазон температуры, К	260–870
Диапазон воспроизведения, Дж/кг·К	50–2900
СКО результата измерений при $N$ независимых измерениях, %	от 0,136 до 0,179 $N=50$
НСП не превышает, %	0,008
Стандартная неопределенность, оцененная по типу А, %	от 0,136 до 0,179
Стандартная неопределенность, оцененная по типу В, %, не более	0,004
Суммарная стандартная неопределенность, %	от 0,136 до 0,179
Расширенная неопределенность при коэффициенте охвата $k=2$ , %	от 0,272 до 0,358

межповерочного интервала, количества допустимых нагревов, значения максимально допустимой температуры нагрева.

В качестве основного материала для целей передачи был выбран монокристаллический оксид алю-

миния (лейкосапфир). Образцы из данного материала в течение многих лет применяются в международной практике в качестве стандартного референтного материала (Standard Reference Material 720) [10]. Использование данного материала позволяет сличать

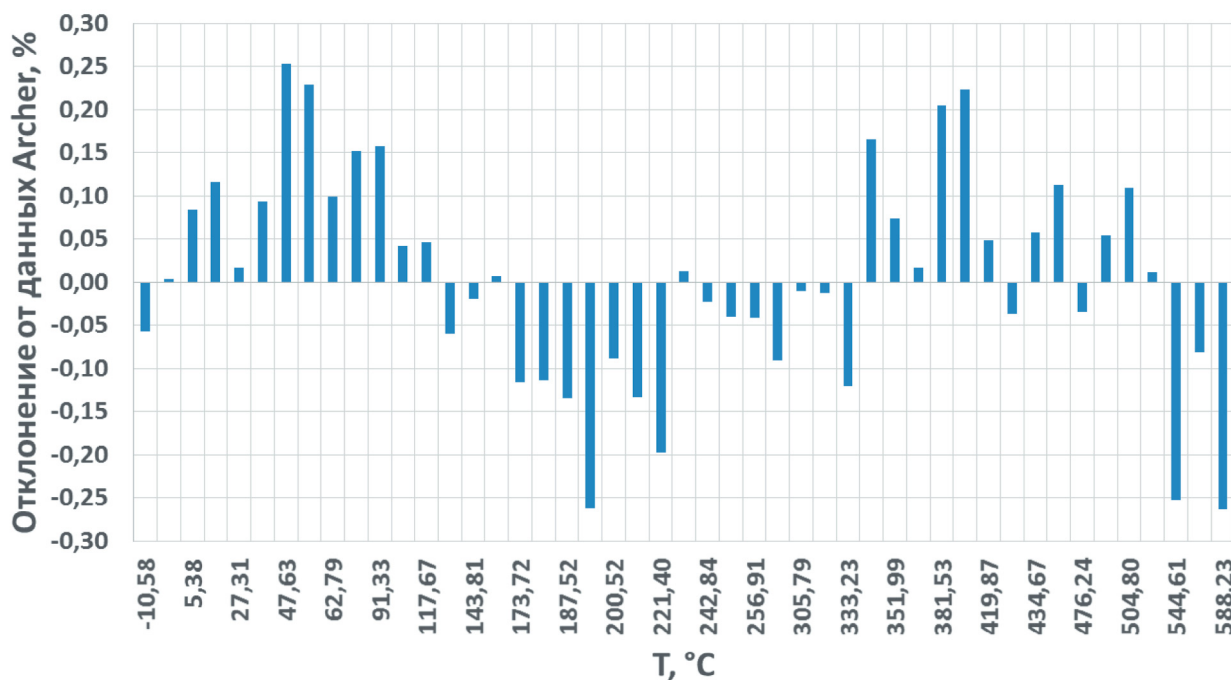


Рис. 3. Отклонение результатов, полученных авторами статьи, от выполненных исследователями ряда ведущих стран и обобщенных Арчером (NIST) в работе [9]

Fig. 3. Deviation of the results obtained by the authors of the article from those carried out by researchers of a number of leading countries and generalized by Archer (NIST) [9]

результаты, получаемые на ГПЭ 60–2019 и эталонных калориметрах ведущих метрологических институтов других стран.

С учетом вышеперечисленных требований, предъявляемых к материалам, для дальнейшего исследования и аттестации их в качестве эталонных мер удельной теплоемкости, дополнительно были выбраны следующие материалы: молибден и медь (для области низких значений удельной теплоемкости), бериллий, как единственный материал, достаточно стабильный, позволяющий обеспечить передачу единицы удельной теплоемкости до 2900 Дж/(кг·К).

Диапазоны удельной теплоемкости для данных материалов для интервала температуры 260–870 К приведены в табл. 2.

### Результаты исследования удельной теплоемкости материалов для эталонных мер

Многократные измерения удельной теплоемкости выбранных материалов проводились в течение двух лет. Ниже приведены результаты исследований каждого материала.

На рис. 4 приведены графики температурной зависимости удельной теплоемкости исследованных материалов. Разброс экспериментальных данных обусловлен случайной составляющей погрешности и не превышает 0,136–0,179 % в данном температурном интервале.

Таблица 2. Диапазон удельной теплоемкости, Дж/(кг·К), в интервале (260–870) К

Table 2. Range of specific heat capacity in the (260–870) K interval

Материал	Диапазон удельной теплоемкости, Дж/(кг·К), в интервале 260–870К
Сапфир	685–1197
Молибден	250–300
Медь	385–451
Бериллий	1800–2900

Таблица 3. Метрологические характеристики исследованных материалов

Table 3. Metrological characteristics of the examined materials

$c_{уд}$	$u_A$ , %	$u_B$ , %	$u_C$ , %	$U_{0,95}(k=2)$ , %
Лейкосапфир	0,140	0,004	0,140	0,280
Молибден	0,179	0,004	0,179	0,358
Медь	0,174	0,004	0,174	0,348
Бериллий	0,136	0,004	0,136	0,272

В табл. 3 приведены основные метрологические характеристики исследованных материалов.

Здесь  $u_A$  – неопределенность, оцененная по типу А,  $u_B$  – неопределенность, оцененная по типу В,  $u_C$  – суммарная неопределенность результатов измерений,  $U_{0,95}(k=2)$  расширенная неопределенность, рассчитанная для вероятности 0,95 при коэффициенте охвата  $k=2$

Таким образом, все выбранные для исследования материалы сохраняют стабильность удельной теплоемкости с расширенной неопределенностью, не превышающей 0,272–0,358 % в заданном диапазоне температуры.

По результатам исследования четыре меры удельной теплоемкости были внесены в состав ГПЭ единицы удельной теплоемкости: мера из лейкосапфира, мера из молибдена, мера из меди и мера из бериллия.

### Выводы

Создан новый адиабатический калориметр для диапазона температуры от 260 до 870 К, вошедший в состав Государственного первичного эталона единицы удельной теплоемкости. Созданы меры удельной теплоемкости для передачи единицы удельной теплоемкости всем средствам измерений, работающим в промышленности. Уровень точности совершенствованного эталона единицы удельной теплоемкости превышает или соответствует уровню, имеющемуся в национальных метрологических институтах других стран.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

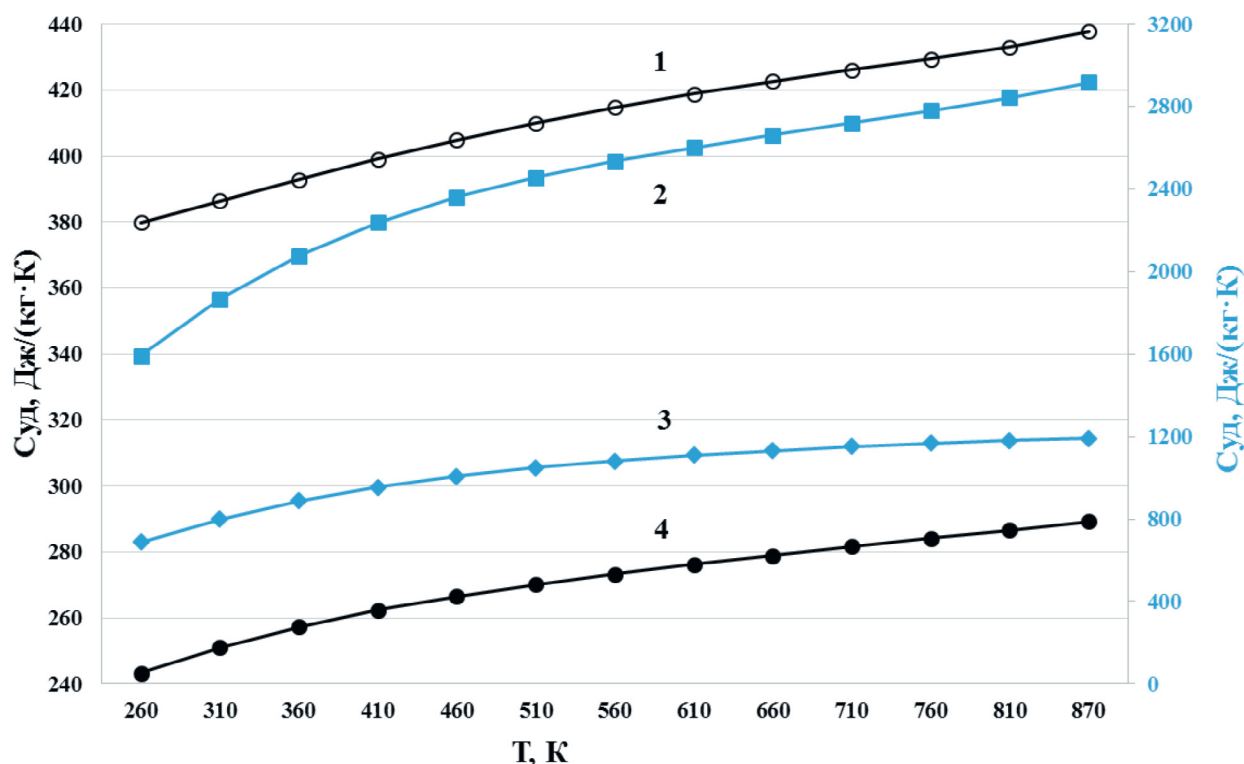


Рис. 4. Температурная зависимость удельной теплоемкости материалов.

- – 1. удельная теплоемкость меры из поликристаллической меди;
- – 2. удельная теплоемкость меры из поликристаллического бериллия;
- ◆ – 3. удельная теплоемкость меры из монокристаллического лейкосапфира;
- – 4. удельная теплоемкость меры из поликристаллического молибдена

Fig. 4. The temperature dependency of the materials specific heat capacity.

- – 1. specific heat capacity of the measure from polycrystalline copper
- – 2. specific heat capacity of the measure from polycrystalline beryllium;
- ◆ – 3. specific heat capacity of the measure from monocrystalline leucosapphire;
- – 4. specific heat capacity of the measure from polycrystalline molybdenum.

## ЛИТЕРАТУРА

- West E. D., Ginnings D. C. An adiabatic calorimeter for the range 30° to 500 °C // Journal of Research of the National Bureau of Standards. 1958. Vol. 60, No. 4, pp. 309–316. <http://dx.doi.org/10.6028/jres.060.034>.
- Archer D. G., Rudtsch S. Enthalpy of fusion of indium: a certified reference material for differential scanning calorimetry // Journal of Chemical & Engineering Data. 2003. Vol. 48, № 5, pp. 1157–1163. <http://dx.doi.org/10.1021/je030112g>.
- Pramann A., Krupke H.-W., Moriya Y., Rudtsch S., Sarge S. M. Phase transitions of gallium and indium, determined by adiabatic calorimetry // Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, 1–3 Mai 2008, Saarbrücken. URL: [https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung\\_1/1.4\\_gase/1.44/Adiabatische\\_Kalorimetrie.pdf](https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_1/1.4_gase/1.44/Adiabatische_Kalorimetrie.pdf).
- Advanced materials characterization. Thermal performance // NPL. <https://www.npl.co.uk/products-services/advanced-materials/thermal-performance>.
- Some practical considerations for High Temperature DSC. Chapman L. department Innivation, Universitetes and Skills, NPL.
- Matsumoto T., Barreiro G., Ono A. Measurements of specific heat capacity and hemispherical total emissivity at high temperatures using a feedback-controlled pulse-heating technique // Symposium on Thermophysical Properties: Proc. 20th Japan Symposium. 1999. pp. 479–482. URL: [https://www.researchgate.net/publication/242369588\\_Measurements\\_Of\\_Specific\\_Heat\\_Capacity\\_And\\_Hemispherical\\_Total\\_Emissivity\\_At\\_High\\_Temperatures\\_Using\\_A\\_Feedback-c](https://www.researchgate.net/publication/242369588_Measurements_Of_Specific_Heat_Capacity_And_Hemispherical_Total_Emissivity_At_High_Temperatures_Using_A_Feedback-c).
- A survey on specific heat capacity standard and calorimetric energy standards // Haruka ABE. URL: <https://unit.aist.go.jp/nmij/public/report/bulletin/Vol7/2/V7N2P101.pdf>.
- Frenkel' I. M., Sergeev O. A. State primary standard of the solid bodies' specific heat in the range of 273.15 to 700 °K Measurement Techniques 18(4): 545–551 April 1975 DOI:10.1007/BF00817507.

9. Френкель И. М., Сергеев О. А. Государственный первичный эталон единицы удельной теплоемкости твердых тел // Измерительная техника. 1975. № 4 <https://doi.org/10.1063/1.555931>.
10. National Bureau of Standards Certificate Standard Reference Material 720 Synthetic Sapphire ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) // Publications NBS, U. C. Department of commerce, Washington D. C. 20234, April 1982, 3 p.

## REFERENCE

1. West E. D., Ginnings D. C. An adiabatic calorimeter for the range 30° to 500 °C. Journal of Research of the National Bureau of Standards. 1958;60(4):309–316. <http://dx.doi.org/10.6028/jres.060.034>.
2. Archer D. G., Rudtsch S. Enthalpy of fusion of indium: a certified reference material for differential scanning calorimetry. Journal of Chemical & Engineering Data. 2003;48(5):1157–1163. <http://dx.doi.org/10.1021/je030112g>.
3. Pramann A., Krupke H.-W., Moriya Y., Rudtsch S., Sarge S. M. Phase transitions of gallium and indium, determined by adiabatic calorimetry. Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig, 1–3 Mai 2008, Saarbrücken. Available at: [https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung\\_1/1.4\\_gase/1.44/Adiabatische\\_Kalorimetrie.pdf](https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/fachabteilungen/abteilung_1/1.4_gase/1.44/Adiabatische_Kalorimetrie.pdf).
4. Advanced materials characterization. Thermal performance. In NPL. Available at: <https://www.npl.co.uk/products-services/advanced-materials/thermal-performance>.
5. Some practical considerations for High Temperature DSC. Chapman L. department Innivation, Universitetes and Skills, NPL.
6. Matsumoto T., Barreiro G., Ono A. Measurements of specific heat capacity and hemispherical total emissivity at high temperatures using a feedback-controlled pulse-heating technique; Symposium on Thermophysical Properties: Proc. 20th Japan Symposium. 1999. pp. 479–482. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/242369588\\_Measurements\\_Of\\_Specific\\_Heat\\_Capacity\\_And\\_Hemispherical\\_Total\\_Emissivity\\_At\\_High\\_Temperatures\\_Using\\_A\\_Feedback-controlled\\_Pulse-Heating\\_Technique](https://www.researchgate.net/publication/242369588_Measurements_Of_Specific_Heat_Capacity_And_Hemispherical_Total_Emissivity_At_High_Temperatures_Using_A_Feedback-controlled_Pulse-Heating_Technique).
7. A survey on specific heat capacity standard and calorimetric energy standards. Haruka ABE. Available at: <https://unit.aist.go.jp/nmij/public/report/bulletin/Vol7/2/V7N2P101.pdf>.
8. Frenkel I. M., Sergeev O. A. State primary standard unit of specific heat of solids. Measurement Techniques. 1975;(4): 545–551 April 1975 DOI: 10.1007/BF00817507.
9. Frenkel' I. M., Sergeev O. A. Gosudarstvennyj pervichnyj jetalon edinicy udel'noj teploemkosti tverdyh tel [State primary standard of the unit of specific heat capacity of solids. Measurement Techniques. 1975;(4). <https://doi.org/10.1063/1.555931>.
10. National Bureau of Standards Certificate Standard Reference Material 720 Synthetic Sapphire ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Publications NBS, U. C. Department of commerce, Washington D. C. 20234, April 1982, 3 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Компан Татьяна Андреевна** – д. т. н., руководитель лаборатории государственных эталонов и научных исследований в области измерений теплофизических величин, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский пр. д. 19  
e-mail: T. A. Kompan@vniim.ru

**Кулагин Валентин Иванович** – к. т. н., старший научный сотрудник, лаборатории государственных эталонов и научных исследований в области измерений теплофизических величин, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский пр. д. 19

**Власова Виктория Владимировна** – младший научный сотрудник, лаборатории государственных эталонов и научных исследований в области измерений теплофизических величин, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Московский пр. д. 19

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Dr. Tatiana A. Kompan** – Doctor of Sciences in Technology, Head of the Laboratory of State Standards and Scientific Research in the Field of Measurements of Thermophysical Quantities, V. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM), Russia, St. Petersburg, Moskovsky pr., 19

**Valentin I. Kulagin** – Candidate of Sciences in Technology, senior Researcher of the Laboratory of State Standards and Scientific Research in the Field of Measurements of Thermophysical Quantities, V. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM), Russia, St. Petersburg, Moskovsky pr., 19

**Viktoriya V. Vlasova** – junior researcher of the Laboratory of State Standards and Scientific Research in the Field of Measurements of Thermophysical Quantities, V. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM), Russia, St. Petersburg, Moskovsky pr., 19

**Кондратьев Сергей Валерьевич** – научный сотрудник, лаборатории государственных эталонов и научных исследований в области измерений теплофизических величин, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,  
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
Московский пр. д. 19

**Пухов Николай Федорович** – старший научный сотрудник, лаборатории государственных эталонов и научных исследований в области измерений теплофизических величин, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»,  
Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,  
Московский пр. д. 19

**Sergey V. Kondratiev** – researcher of the Laboratory of State Standards and Scientific Research in the Field of Measurements of Thermophysical Quantities, V.I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM),  
Russia, St. Petersburg, Moskovsky pr., 19

**Nikolay F. Pukhov** – senior Researcher of the Laboratory of State Standards and Scientific Research in the Field of Measurements of Thermophysical Quantities, V.I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM),  
Russia, St. Petersburg, Moskovsky pr., 19

