

ЭТАЛОНЫ

Научная статья


УДК 536.5.081.3//535.241.34

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-4-7-15>



Обеспечение единства измерений в области радиационной термометрии на основе нового определения единицы температуры

Ю. А. Сильд  

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», Санкт-Петербург, Россия
 y. a.sild@vniim.ru

Аннотация: Обеспечение единства измерений (ОЕИ) в области температурных измерений, в частности – радиационной термометрии, – одна из основных задач метрологии, решаемых на государственном уровне. Система метрологического обеспечения (МО) средств радиационной термометрии нуждается в непрерывном поддержании на уровне, отвечающем современным требованиям науки, техники, промышленности. С целью развития и совершенствования системы ОЕИ в радиационной термометрии в последние годы проведен ряд мероприятий, а именно: разработана новая эталонная база, в том числе – создан государственный первичный эталон (ГПЭ) единицы температуры в диапазоне от 0 °С до 3200 °С, реализующий новое определение кельвина; разработана новая государственная поверочная схема (ГПС), регламентирующая передачу единицы температуры рабочим средствам от ГПЭ.

Для снижения нагрузки на ГПЭ, уменьшения потери точности при передаче единицы термодинамической температуры и удовлетворения возросших требований по МО средств измерений создан и исследован вторичный эталон (ВЭТ) единицы температуры в соответствии с новым определением кельвина. В его состав вошли высокотемпературные излучатели на основе реперных точек чистых металлов и эвтектик, излучатель АЧТ и компараторы, обеспечивающие передачу единицы температуры в диапазоне от 961,78 °С до 3200 °С.

По результатам исследований созданный Государственный вторичный эталон (эталон-копия) единицы температуры в диапазоне значений от 961,78 °С до 3200 °С утвержден приказом Росстандарта от 21.11.2022 № 2931 и полностью удовлетворяет требованиям в соответствии с ГПС для СИ температуры.

Ключевые слова: обеспечение единства измерений, термодинамическая температура, эталон, излучатели АЧТ, реперные точки, компаратор

Используемые сокращения: АЧТ – абсолютно черное тело; ВТРТ – излучатели на основе реперных точек; ВЭТ – вторичный эталон; ГПС – государственная поверочная схема; ГПЭ – государственный первичный эталон; ККТ – Консультативный комитет по термометрии; МКМВ – Международный комитет мер и весов; МО – метрологическое обеспечение; ОЕИ – обеспечение единства измерений; РЭ – рабочий эталон; СИ – средства измерений.



Ссылка при цитировании: Сильд Ю. А. Обеспечение единства измерений в области радиационной термометрии на основе нового определения единицы температуры // Эталоны. Стандартные образцы. 2023. Т. 19, № 4. С. 7–15. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-4-7-15>

Статья поступила в редакцию 01.08.2023; одобрена после рецензирования 25.08.2023; принята к публикации 25.09.2023.


MEASUREMENT STANDARDS

Research Article

Ensuring the Uniformity of Measurements in the Field of Radiation Thermometry on the Basis of a New Definition of the Unit of Temperature

Iurii A. Sild  

D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia

 y. a.sild@vniim.ru

Abstract: Ensuring the uniformity of measurements (EUM) in the field of temperature measurements, in particular radiation thermometry is one of the main tasks of metrology solved at the state level. The system of metrological support (MS) of radiation thermometry means requires continuous maintenance at the level that meets modern requirements of science, technology, and industry. In order to develop and improve the EUM system in radiation thermometry, a number of measures have been taken in recent years, namely: a new standard base has been developed, including the creation of the State primary standard (SPS) of a temperature unit in the range from 0 °C to 3200 °C, implementing a new definition of kelvin; a new State verification schedule (SVS) has been developed, which regulates the transfer of the temperature unit to working means from the SPS. To reduce the load on the SPS, decrease the loss of accuracy in the transfer of a unit of thermodynamic temperature and meet the increased requirements for metrological support of measuring instruments, a secondary standard (SS) of a temperature unit was created and studied in accordance with the new definition of kelvin. It included high-temperature blackbody based on fixed points of pure metals and eutectics, a blackbody and comparators that ensure the transfer of a temperature unit in the range from 961.78 °C to 3200 °C. Based on the results of the research, the created State secondary standard (reference standard) of the temperature unit in the range from 961.78 °C to 3200 °C was approved by the order of Rosstandart dated November 21, 2022 No. 2931 and fully meets the requirements in accordance with the SVS for temperature MI.

Keywords: ensuring the uniformity of measurements, thermodynamic temperature, standard, blackbody, fixed points, comparator

Abbreviations used in the article: ABB – absolute blackbody; HTFP – high temperature fixed point; SS – secondary standard; SVS – State verification schedule; SPS – State primary standard; CCT – Consultative Committee for Thermometry; CIPM – International Committee on Weights and Measures; MS – metrological support; EUM – ensuring the uniformity of measurements; WS – working standard; MI – measuring instruments.

For citation: Sild I. A. Ensuring the uniformity of measurements in the field of radiation thermometry on the basis of a new definition of the unit of temperature. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2023;19(4):7–15. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-4-7-15>

The article was submitted 01.08.2023; approved after reviewing 25.08.2023; accepted for publication 25.09.2023.

Введение

Обеспечение единства измерений в области температурных измерений, как и в любой другой области, является значимой государственной задачей, реализация которой в соответствии с Федеральным законом РФ от 26.06.2008 № 102-ФЗ обеспечивается государственной системой, включающей в себя [1]:

– комплекс законодательных актов и межотраслевых нормативных документов, регламентирующих общие правила и нормы в метрологии;

– организационно-функциональную структуру, обеспечивающую функции по оказанию государственных услуг;

– технические средства, обеспечивающие воспроизведение и передачу единицы от первичных эталонов рабочим средствам измерений.

Система, действующая в области температурных измерений на протяжении десятилетий, показала свою высокую эффективность. Однако растущие требования науки и промышленности к точности и диапазону измерений температуры, необходимость обеспечения

эквивалентности отечественных государственных первичных эталонов единицы температуры лучшим национальным эталонам зарубежных стран, развитие фундаментальных положений в основе определения физической единицы – температуры – как при воспроизведении единицы, так и при ее передаче требует ее постоянно совершенствования и развития [2, 3].

В последние три года область ОЕИ температуры претерпела значительные изменения в следствие совершенствования, а фактически – создания новых государственных первичных эталонов единицы температуры: ГЭТ 35-2021¹ [4–6] и ГЭТ 34-2020² [7, 8], реализующих новое определение кельвина [3, 9]. В конце 2022 года в результате длительных обсуждений специалистами ведущих организаций, занимающихся как производством СИ температуры, так их МО принята новая государственная поверочная схема для средств измерений температуры.

Перечисленные выше обстоятельства серьезно отразились на метрологическом обеспечении в области радиационной термометрии. Необходимо также принять во внимание события глобального масштаба, определившие современное состояние воспроизведения и передачи единицы температуры.

Консультативный комитет по термометрии (ККТ) Международного комитета мер и весов (МКМВ) в течение длительного времени вел работу, направленную на переопределение единицы кельвина через фундаментальную физическую константу – постоянную Больцмана с целью исключения зависимости воспроизведения единицы температуры от свойств каких-либо артефактов или материалов [10–13]. В документе «*Mise en Pratique*» ККТ МКМВ изложены два метода воспроизведения термодинамической температуры в высокотемпературной области, которые могут быть использованы для воспроизведения единицы температуры в соответствии с ее новым определением:

– прямой метод измерения с использованием абсолютного радиометра [14, 15]. Указанный метод

чрезвычайно трудоемок и требует больших финансовых и временных затрат для его создания. Он фактически реализован в первичных эталонах единиц температуры ведущих национальных метрологических институтов, включая Россию;

– относительно прямые методы, основанные на применении фиксированных значений температуры, приспанных ВТРТ, и интерполяции между точками [16–18]. Т. е. в основе относительно прямых методов лежит реализация фазовых переходов ВТРТ и применение между точками интерполяционного прибора [19–25]. Реализация этих методов, обладающих немного большей погрешностью, чем прямой метод, позволяет решать задачу по воспроизведению и хранению единицы как на уровне ГПЭ, так и ВЭТ и передавать ее нижестоящим рабочим эталонам (РЭ).

Два этих метода в полной мере реализованы в ГПЭ единицы температуры в диапазоне от 0 °C до 3200 °C, утвержденном приказом Росстандарта от 23.12.2020 № 2198.

ГПЭ единицы температуры в диапазоне от 0 °C до 3200 °C реализует единицу в соответствии с ее новым определением, возглавляет ГПС для средств измерений радиационной температуры и лежит в основе в системе ОЕИ в современном периоде.

В конце 2022 года была разработана ГПС на основе опыта работы в области ОЕИ. ГПС устанавливает основные метрологические характеристики и порядок передачи единиц температуры от ГПЭ при помощи ВЭТ и РЭ средствам измерений с указанием погрешности и основных методов передачи единицы. В ГПС определен состав вторичных эталонов единицы температуры, обеспечивающих передачу единицы температуры в соответствии с новым определением кельвина, также на перспективу определена структура передачи единицы новым средствам измерений температуры – первичные радиационные термометры.

На момент разработки ГПС в России отсутствовали вторичные эталоны единицы температуры в области радиационной термометрии, что сильно увеличивало нагрузку на ГПЭ и могло привести к снижению ресурса и преждевременному выходу его из строя. Кроме того, работы по МО РЭ и прецизионных СИ радиационной термометрии проводились за счет ресурсов, предназначенных для научных исследований по поддержанию самого высокого уровня измерений в области термометрии.

Целью данного исследования является совершенствование метрологических характеристик средств передачи единицы температуры, включая повышение точности ее передачи в области радиационной термометрии

¹ ГЭТ 35-2021 Государственный первичный эталон единицы температуры – кельвина в диапазоне от 0,3 К до 273,16 К жидкости / институт–хранитель ФГУП «ВНИИФТРИ» // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/1387036>

² ГЭТ 34-2020 Государственный первичный эталон единицы температуры в диапазоне от 0 до 3200 °C / институт–хранитель ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/1385580>

посредством создания Государственного вторичного эталона (эталона-копии) единицы температуры в диапазоне значений от 961,78 °C до 3200 °C.

В задачи исследования входит определение состава ВЭТ (эталона-копии) и установление порядка передачи единиц температуры от ГПЭ при помощи ВЭТ и РЭ средствам измерений с указанием погрешности и основных методов передачи единицы.

Состав ВЭТ (эталона-копии)

В состав эталона (рис. 1) входят излучатели ВТРТ на основе чистых металлов и эвтектических сплавов металл-углерод, реализующие в соответствии с рекомендациями ККТ ВТРТ температурной шкалы. Кроме излучателей ВТРТ, в состав эталона включен комплект температурных ламп (вакуумные и газонаполненные). А также компаратор (компаратор яркостей [26] и монохроматический пирометр [27]), обеспечивающий интерполяцию и экстраполяцию температуры и высокую точность передачи единицы температуры выше точки затвердевания серебра.

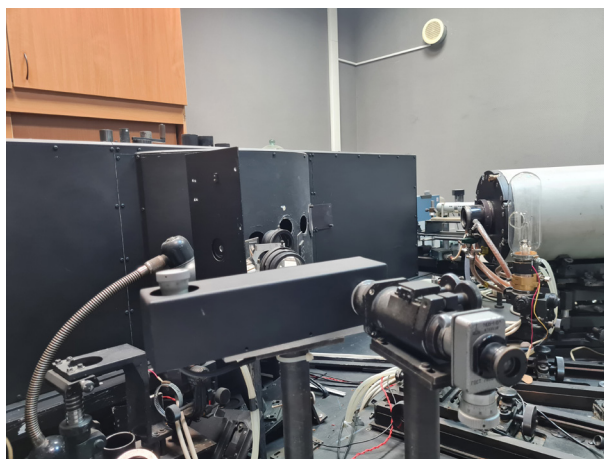


Рис. 1. Внешний вид вторичного эталона (эталон-копия) единицы температуры в диапазоне значений от 961,78 °C до 3200 °C

Fig. 1. Appearance of the secondary standard (reference standard) of the temperature unit in the range from 961.78 °C to 3200 °C

Материалы и методы

При изготовлении ампул ВТРТ использованы высокочистые металлы серебро, медь, рений, кобальт, молибден:

- серебро и медь имели чистоту не хуже 99,9999 %;
- рений по сведениям, представленным производителем, имел чистоту не хуже 99,995 %;
- заявляемые производителем примеси кобальта и молибдена находились на уровне менее чем 10 ppm.

Номинальная чистота используемого графитового порошка составила не менее 99,9999 %.

Для создания ВТРТ применялись ампулы, выполненные из графита и имеющие следующие параметры:

- диаметр ампулы не более 24 мм;
- длина ампулы не более 50 мм;
- диаметр выходной диафрагмы излучающей полости не менее 3 мм;
- излучательная способность ампулы не менее 0,9996.

Заполнение ампул ВТРТ серебра и меди осуществлялось в вертикально размещенном излучателе капельным методом [28, 29], эвтектик Co-C, Re-C и $\delta\text{MoC-C}$ с использованием метода финишной заправки [29, 30] с целью устранения появления возможных каверн, пустот в ампуле ВТРТ.

Исследования заполненных ампул ВТРТ на основе эвтектических сплавов (Co-C, Re-C и $\delta\text{MoC-C}$), а также ампул ВТРТ на основе высокочистых металлов серебра и меди проводились на аппаратуре высокотемпературного комплекса ГПЭ единицы температуры в диапазоне от 0 °C до 3200 °C.

Исследования излучателей ВТРТ включали определение температуры фазового перехода, соответствующей поправки к номинальному значению температуры, воспроизводимому излучателями на основе реперных точек, и определение их воспроизводимости, долговременной стабильности.

Метрологические характеристики для вакуумных температурных ламп определяли при следующих значениях воспроизводимой температуры ГПЭ: 961,78 °C и 1500 °C, для газонаполненных – 1400 °C и 2100 °C. Исследование метрологических характеристик компаратора проводилось с применением излучателя «черное тело» и высокотемпературного излучателя «черное тело» из состава ГЭТ 34–2020.

Все исследования метрологических характеристик и обработка результатов измерений проводили согласно документу «Правила содержания и применения государственного первичного эталона единицы температуры в диапазоне от 0 до 3200 °C ГЭТ 34–2020. Часть 2. Комплекс аппаратуры для воспроизведения и передачи единицы температуры в диапазоне от 961,78 до 3200 °C», а также с учетом международных рекомендаций [31, 32].

Результаты и обсуждение

Результаты

Значения метрологических характеристик, полученные в рамках исследований составных частей ВЭТ (ВТРТ, температурных ламп, компаратора), приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты исследований метрологических характеристик составных частей вторичного эталона (эталон-копия) единицы температуры в диапазоне значений от 961,78 °C до 3200 °C
 Table 1. The results of studies of the metrological characteristics of the parts of the secondary standard (reference standard) of the temperature unit in the range from 961.78 °C to 3200 °C

Характеристика	Значение
Поправки к значению температуры, воспроизводимого излучателями на основе реперных точек, °C	
– излучатель на основе реперной точки Ag	-0,04
– излучатель на основе реперной точки Cu	+0,02
– излучатель на основе реперной точки эвтектики Co-C	+0,03
– излучатель на основе реперной точки эвтектики Re-C	+0,07
– излучатель на основе реперной точки эвтектики δMoC-C	-0,20
Суммарное СКО результата сличений излучателей на основе реперных точек с ГПЭ единицы температуры, °C	
– излучатель на основе реперной точки Ag	0,09
– излучатель на основе реперной точки Cu	0,13
– излучатель на основе реперной точки эвтектики Co-C	0,20
– излучатель на основе реперной точки эвтектики Re-C	0,55
– излучатель на основе реперной точки эвтектики δMoC-C	0,59
Суммарное СКО результата сличений с ГПЭ единицы температуры с температурными лампами, в диапазоне температур от 961,78 °C до 2100 °C, °C	от 0,13 до 0,49
Погрешность передачи единицы температуры при помощи компаратора, °C	от 0,1 до 0,19

Обсуждение

Проведенные исследования показали высокие метрологические характеристики ВТРП, температурных ламп, компаратора и возможность применения их в качестве вторичных эталонов единицы температуры в соответствии с требованиями ГПС.

В соответствии с требованиями постановления Правительства РФ от 21 октября 2019 г. № 1355 и во исполнении приказа Минпромторга России от 11.02.2020 № 456 разработан комплект документов для регистрации и включения в реестр эталонов со следующими характеристиками:

диапазон значений единицы температуры, в котором воспроизводится, хранится и передается единица, составляет от 961,78 °C до 3200 °C;

суммарное среднее квадратическое отклонение результатов сличений эталона с государственным первичным эталоном единицы температуры в диапазоне от 961,78 °C до 3200 °C составляет 0,12 °C до 2,0 °C;

номинальные значения температуры, воспроизводимые излучателями на основе реперных точек, °C:

- излучатель на основе реперной точки Ag 961,78
- излучатель на основе реперной точки Cu 1084,62
- излучатель на основе реперной точки эвтектики Co-C 1324,24

– излучатель на основе реперной точки эвтектики Re-C 2474,69

– излучатель на основе реперной точки эвтектики δMoC-C 2583,00;

поправки к номинальному значению температуры, воспроизводимого излучателями на основе реперных точек, °C, не более:

- излучатель на основе реперной точки Ag $\pm 0,05$
- излучатель на основе реперной точки Cu $\pm 0,06$
- излучатель на основе реперной точки эвтектики Co-C $\pm 0,11$
- излучатель на основе реперной точки эвтектики Re-C $\pm 0,34$
- излучатель на основе реперной точки эвтектики δMoC-C $\pm 0,43$;

суммарное СКО передачи единицы температуры при помощи компаратора: от 0,1 °C до 0,4 °C.

Заключение

В рамках совершенствования системы ОЕИ в области радиационной термометрии проведено совершенствование и создание ГПЭ единицы температуры от 961,78 °C до 3200 °C, реализующего новое определение кельвина.

Выполнена разработка ГПС для средств измерений температуры, которая в соответствии с приказом

Росстандарта от 23.12.2022 № 3253 введена в действие с 1 февраля 2023 г.

Новая ГПС установила порядок передачи единицы температуры от ГПЭ СИ с помощью ВЭТ и РЭ, с указанием основных методов аттестации/поверки и погрешности, а также определила возможный состав эталонов. Указанная ГПС решает задачу по ОЕИ температуры в соответствии с современными требованиями науки и производства, перспектив развития СИ термометрии, а также с учетом переопределения кельвина.

В ходе исследования разработан и изучен ВЭТ – Государственный вторичный эталон (эталон-копия) единицы температуры в диапазоне значений от 961,78 °C до 3 200 °C, который позволяет устранить пробел в МО СИ радиационной термометрии. Созданный государственный вторичный эталон обеспечивает передачу единицы температуры от Государственного первичного эталона единицы температуры в диапазоне от 961,78 °C до 3 200 °C в соответствии с ее новым определением и полностью удовлетворяет требованиям ГПС для СИ температуры.

Применение эталона-копии позволяет снизить погрешность передачи единицы, снизить нагрузку на ГПЭ, а также заложить основы для обеспечения единства

измерений в области радиационной термометрии на основе нового определения кельвина выше 961,78 °C и удовлетворить перспективные требования науки и промышленности в метрологическом обеспечении средств измерений радиационной термометрии.

Благодарности: Часть исследований выполнена в ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» в рамках опытно-конструкторской работы «Совершенствование эталонов единицы температуры в соответствии с новым определением кельвина в диапазоне от 4,2 К до 3473 К» (2017–2019 гг.). Измерения были выполнены на оборудовании ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

Acknowledgments: Part of the research was carried out at VNIIM as part of the development work «Improvement of temperature unit standards in accordance with the new definition of kelvin in the range from 4.2 K to 3473 K» (2017–2019). The measurements were performed on the equipment of VNIIM.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Походун А. И. О стратегии развития метрологического обеспечения измерений температуры и теплофизических величин в России // Приборы. 2015. № 8 (182). С. 1–6.
2. State and direction of development of the secondary standard of the unit of radiance and unit of infrared radiation temperature / K. A. Sharganov [et al.] // Measurement Techniques. 2015. Vol. 57. P. 1273–1275. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0618-1>
3. Походун А. И. Переопределение кельвина и перспективы совершенствования государственного первичного эталона единицы температуры в диапазоне от 0 до 3000 °C ГЭТ 34–2007 // Измерительная техника. 2017. № 12. С. 32–36.
4. Deviation of temperature determined by ITS-90 temperature scale from thermodynamic temperature measured by acoustic gas thermometry at 79.0000 K and at 83.8058 K / V. G. Kytin [et al.] // International Journal of Thermophysics. 2020. Vol. 41, Is. 6. P. 88. <https://doi.org/10.1007/s10765-020-02663-2>
5. Installation of relative acoustic gas thermometry in the low temperature range from 4.2 to 80 K / V. G. Kytin [et al.] // Measurement Techniques. 2020. Vol. 63, Is. 1. P. 45–52. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01748-6>
6. Realization of a new definition of kelvin on state primary standard of temperature unit GET 35–2021 in the temperature range from 0.3 to 273.16 K / V. G. Kytin [et al.] // Measurement Techniques. 2021. Vol. 64. P. 613–621. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01980-8>
7. Methods for the realization of ITS-90 fixed points: necessity of improvement / A. G. Ivanova [et al.] // Measurement Techniques. 2021. Vol. 64. P. 573–579. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01973-7>
8. State primary standard of temperature unit in the range 0–3200 °C GET 34–2020: Practical implementation of the new definition of kelvin / A. I. Pokhodun [et al.] // Measurement Techniques. 2021. Vol. 64. P. 541–549. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01970-w>
9. Походун А. И., Осадчий С. М. Переопределение кельвина и его последствия в практике измерений температуры // Законодательная и прикладная метрология. 2019. № 3 (160). С. 3–7.
10. Preparative steps towards the new definition of the kelvin in terms of the boltzmann constant / J. Fischer [et al.] // International Journal of Thermophysics. 2007. Vol. 28. P. 1753–1765. <https://doi.org/10.1007/s10765-007-0253-4>
11. The roles of the Mise en pratique for the definition of the kelvin / D. C. Ripple [et al.] // International Journal of Thermophysics. 2010. Vol. 31. P. 1975–1808. <https://doi.org/10.1007/s10765-010-0837-2>
12. Practical implementation of the mise en pratique for the definition of the kelvin above the silver point / G. Machin [et al.] // International Journal of Thermophysics. 2010. Vol. 31. P. 1779–1788. <https://doi.org/10.1007/s10765-010-0834-5>
13. Primary radiometry for the mise-en-pratique for the definition of the kelvin: the hybrid method / E. R. Woolliams [et al.] // International Journal of Thermophysics. 2011. Vol. 32. P. 1–11. <https://doi.org/10.1007/s10765-011-0924-z>

14. Absolute radiometry for the MeP-K: the irradiance measurement method / J. Hartmann [et al.] // International Journal of Thermophysics. 2011. Vol. 32. P. 1707–1718. <https://doi.org/10.1007/s10765-011-1018-7>
15. Thermodynamic radiation thermometry using radiometers calibrated for radiance responsivity / H. W. Yoon [et al.] // International Journal of Thermophysics. 2011. Vol. 32. P. 2217–2229. <https://doi.org/10.1007/s10765-011-1056-1>
16. Radiometric observation of melting and freezing plateaus for a series of metal-carbon eutectic points in the range 1330 °C to 1950 °C / Y. Yamada [et al.] // Metrologia. 1999. Vol. 36, Is. 3. P. 207–209. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/36/3/6>
17. High-temperature fixed points in the range 1150 °C to 2500 °C using metal-carbon eutectics / Y. Yamada [et al.] // Metrologia. 2001. Vol. 38, Is. 3. P. 213–221. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/38/3/3>
18. Realizing fixed points above the copper point up to 2500 °C using metal-graphite eutectics / Y. Yamada [et al.] // AIST Bulletin of Metrology. 2002. Vol. 1, Is. 3. P. 533–540.
19. Yamada Y., Bloembergen P. On the properties of hyper-eutectic metal-carbon fixed points // AIST Bulletin of Metrology. 2006. Vol. 5. P. 157–162.
20. Experience of construction and study of Pt-C eutectic in VNIIM and cooperation with LNE-INM / M. S. Matveyev [et al.] // International Journal of Thermophysics. 2009. Vol. 30, Is. 1. P. 47–58. <https://doi.org/10.1007/s10765-008-0431-z>
21. Comparison of pyrometric Co-C and Re-C eutectic-point cells between VNIIM and LNE-CNAM / M. Sadli [et al.] // International Journal of Thermophysics. 2011. Vol. 32, Is. 11–12. P. 2657–2670. <https://doi.org/10.1007/s10765-011-1079-7>
22. Comparative investigations of cobalt-carbon eutectic high-temperature fixed point cells constructed at the VNIIM and VNIIOFI / B. B. Khlevnoy [et al.] // Measurement Techniques. 2013. Vol. 56. P. 72–78. <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0161-x>
23. Thermodynamic temperature assignment to the point of inflection of the melting curve of high temperature fixed points / E. Woolliams [et al.] // Philosophical Transactions of the Royal Society A. 2016. Vol. 374. P. 20150044. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2015.0044>
24. Saunders P., White D. R. Saunders P. Interpolation errors for radiation thermometry // Metrologia. 2004. Vol. 41. P. 41–46. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/41/1/006>
25. Saunders P., White D. R. Physical basis of interpolation equations for radiation thermometry // Metrologia. 2003. Vol. 40, Is. 4. P. 195–203. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/40/4/309>
26. Фотоэлектрический спектрокомпаратор нового поколения для прецизионных измерений в области радиационной термометрии / М. С. Матвеев [и др.] // Приборы. 2008. № 10. С. 30–38.
27. The Reference monochromatic thermometer for the HTFPs investigation / Yu. A. Sild [et al.] // TEMPMEKO 2016: abstracts XIII international symposium on temperature and thermal measurements in industry and science, Zakopane, Poland, 26.06.–1.07.2016. 2016. P. 116–117.
28. Khlevnoy B., Grigoryeva I., Ibragimov N. New method of filling of HTFP cells // High Temperature Fixed Points Solutions for Research and Industry (HTFP 2008): Int. Workshop, KRISS, Daejeon, Korea. 2008. P. 16.
29. Sild Y. A. Methods of filling high-temperature fixed-point cells based on eutectic alloys // Measurement Techniques. 2012. Vol. 55. P. 936–940. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-0064-2>
30. Khlevnoy B. B., Grigoryeva I. A., Ibragimov N. A. New method of filling of high-temperature fixed-point cells based on metal-carbon eutectics / Peritectics // International Journal of Thermophysics. 2011. Vol. 32. P. 1763–1772. <https://doi.org/10.1007/s10765-011-0998-7>
31. CCT-WG5 on radiation thermometry, uncertainty budgets for realisation of scales by radiation thermometry / J. Fischer [et al.] // CCT Working document CCT/03–03. BIPM, Sèvres Cedex. 2003.
32. Uncertainty budgets for realization of ITS-90 by radiation thermometry / J. Fischer [et al.] // Temperature Its Measurement and Control in Science and Industry: AIP Conference Proceedings, Chicago. 2003. Vol. 7. P. 631–638.

REFERENCES

1. Pokhodun A. I. On the strategy for the development of metrological support for measuring temperature and thermophysical quantities in Russia. *Pribory*. 2015;(8):1–6. (In Russ.).
2. Sharganov K. A., Shkurkin A. P., Sil'd Yu. A., Vizulainen E. V. State and direction of development of the secondary standard of the unit of radiance and unit of infrared radiation temperature. *Measurement Techniques*. 2015;57:1273–1275. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0618-1>
3. Pokhodun A. I. Redefinition of the kelvin and future improvements in state primary standard of the unit of temperature in the range from 0 to 3000 °C GET 34–2007. *Measurement Techniques*. 2018;60(12):1205–1210. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1340-6>
4. Kytin V. G., Kytin G. A., Ghavalyan M. Yu., Potapov B. G., Aslanyan E. G., Schipunov A. N. Deviation of temperature determined by ITS-90 temperature scale from thermodynamic temperature measured by acoustic gas thermometry at 79.0000 K and at 83.8058 K. *International Journal of Thermophysics*. 2020;41(6):88. <https://doi.org/10.1007/s10765-020-02663-2>
5. Kytin V. G., Ghavalyan M. Yu., Potapov B. G., Aslanyan E. G., Shchipunov A. N. Installation of relative acoustic gas thermometry in the low temperature range from 4.2 to 80 K. *Measurement Techniques*. 2020;63(1):45–52. <https://doi.org/10.1007/s11018-020-01748-6>
6. Kytin V. G., Ghavalyan M. Yu., Petukhov A. A., Potapov B. G., Razhba Ya. E., Aslanyan E. G. et al. Realization of a new definition of kelvin on state primary standard of temperature unit GET 35–2021 in the temperature range from 0.3 to 273.16 K. *Measurement Techniques*. 2021;64:613–621. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01980-8>

7. Ivanova A. G., Gerasimov S. F., Pokhodun A. I., Fuksov V. M. Methods for the realization of ITS-90 fixed points: necessity of improvement. *Measurement Techniques*. 2021;64:573–579. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01973-7>
8. Pokhodun A. I., Fuksov V. M., Sild Y. A., Mazanov M. A., Matveev M. S. State primary standard of temperature unit in the range 0–3200 °C GET 34–2020: Practical implementation of the new definition of kelvin. *Measurement Techniques*. 2021;64:541–549. <https://doi.org/10.1007/s11018-021-01970-w>
9. Pokhodun A. I., Osadchii S. M. Redefinition of the kelvin and its practical consequences for temperature measurements. *Legislative and applied metrology*. 2019;3(160):3–7. (In Russ.).
10. Fischer J., Gerasimov S., Hill K. D., Machin G., Moldover M. R., Pitre L. et al. Preparative steps towards the new definition of the kelvin in terms of the boltzmann constant International Journal of Thermophysics. 2007;28:1753–1765. <https://doi.org/10.1007/s10765-007-0253-4>
11. Ripple D. C., Davis R., Fellmuth B., Fischer J., Machin G., Quinn T. et al. The roles of the mise en pratique for the definition of the kelvin. *International Journal of Thermophysics*. 2010;31:1975–1808. <https://doi.org/10.1007/s10765-010-0837-2>
12. Machin G., Bloembergen P., Anhalt K., Hartmann J., Sadli M., Saunders P., Woolliams E., Yamada Y., Yoon H. et al. Practical implementation of the mise en pratique for the definition of the kelvin above the silver point. *International Journal of Thermophysics*. 2010;31:1779–1788. <https://doi.org/10.1007/s10765-010-0834-5>
13. Woolliams E. R., Dury M. R., Burnitt T. A., Alexander P. E. R., Winkler R., Hartree W. S., Salim S. G. R. et al. Primary radiometry for the mise-en-pratique for the definition of the kelvin: the hybrid method. *International Journal of Thermophysics*. 2011;32:1–11. <https://doi.org/10.1007/s10765-011-0924-z>
14. Hartmann J., Anhalt K., Taubert D. R., Hollandt J. Absolute radiometry for the MeP-K: the irradiance measurement method. *International Journal of Thermophysics*. 2011;32:1707–1718. <https://doi.org/10.1007/s10765-011-1018-7>
15. Yoon H. W., Gibson C. E., Eppeldauer G. P., Smith A. W., Brown S. W., Lykke K. R. Thermodynamic radiation thermometry using radiometers calibrated for radiance responsivity. *International Journal of Thermophysics*. 2011;32:2217–2229. <https://doi.org/10.1007/s10765-011-1056-1>
16. Yamada Y., Sakate H., Sakuma F., Ono A. Radiometric observation of melting and freezing plateaus for a series of metal-carbon eutectic points in the range 1330 °C to 1950 °C. *Metrologia*. 1999;36:207–209. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/36/3/6>
17. Yamada Y., Sakate H., Sakuma F., Ono A. High-temperature fixed points in the range 1150 °C to 2500 °C using metal-carbon eutectics. *Metrologia*. 2001;38:213–221. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/38/3/3>
18. Yamada Y., Sakate H., Sakuma F., Ono A. Realizing fixed points above the copper point up to 2500 °C using metal-graphite eutectics. *AIST Bulletin of Metrology*. 2002;1(3):533–540.
19. Yamada Y., Bloembergen P. On the properties of hyper-eutectic metal-carbon fixed points. *AIST Bulletin of Metrology*. 2006;5:157–162.
20. Matveyev M. S., Sild Yu. A., Pokhodun A. I., Sadli M., Bourson F. Experience of construction and study of Pt-C eutectic in VNIIM and cooperation with LNE-INM. *International Journal of Thermophysics*. 2009;30(1):47–58. <https://doi.org/10.1007/s10765-008-0431-z>
21. Sadli M., Bourson F., Matveyev M., Fuksov V., Sild Y. A., Pokhodun A. I. Comparison of pyrometric Co-C and Re-C eutectic-point cells between VNIIM and LNE-CNAM. *International Journal of Thermophysics*. 2011;32(11–12):2657–2670. <https://doi.org/10.1007/s10765-011-1079-7>
22. Khlevnoy B. B., Sil'd Yu. A., Matveev M. S., Grigorieva I. A., Fuksov V. M. Comparative investigations of cobalt-carbon eutectic high-temperature fixed point cells constructed at the VNIIM and VNIIOFI. *Measurement Techniques*. 2013;56:72–78. <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0161-x>
23. Woolliams E. R., Anhalt K., Ballico M., Bloembergen P., Bourson F., Briaudeau S. et al. Thermodynamic temperature assignment to the point of inflection of the melting curve of high temperature fixed points. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2016;374:20150044. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2015.0044>
24. Saunders P., White D. R. Interpolation errors for radiation thermometry. *Metrologia*. 2004;41:41–46. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/41/1/006>
25. Saunders P., White D. R. Physical basis of interpolation equations for radiation thermometry. *Metrologia*. 2003;40:95–203. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/40/4/309>
26. Matveev M. S., Pokhodun A. I., Sild Yu. A., Fuksov V. M., Tsorin V. G., Nikitin Yu. V. Photoelectric spectrocomparator of a new generation for precision measurements in the field of radiation thermometry. *Pribory*. 2008;10:30–38. (In Russ.).
27. Sild Yu. A., Pokhodun A. I., Matveyev M. S., Vizulainen E. V., Verhovskaya O. V., Fuksov V. M. et al. The Reference monochromatic thermometer for the HTFPs investigation. In: *TEMPMEKO 2016: abstracts XIII international symposium on temperature and thermal measurements in industry and science*, Zakopane, Poland, 26.06.–1.07.2016. 2016. p. 116–117.
28. Khlevnoy B., Grigoryeva I., Ibragimov N. New method of filling of HTFP cells/ In: *High Temperature Fixed Points Solutions for Research and Industry* (HTFP 2008): Int. Workshop, KRISS, Daejeon, Korea. 2008. p. 16.
29. Sild Y. A. Methods of filling high-temperature fixed-point cells based on eutectic alloys. *Measurement Techniques*. 2012;55:936–940. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-0064-2>
30. Khlevnoy B. B., Grigoryeva I. A., Ibragimov N. A. New method of filling of high-temperature fixed-point cells based on metal-carbon eutectics / peritectics. *International Journal of Thermophysics*. 2011;32:1763–1772. <https://doi.org/10.1007/s10765-011-0998-7>
31. Fischer J., Battuello M., Sadli M., Ballico M., Park S. N., Saunders P. CCT-WG5 on radiation thermometry, uncertainty budgets for realisation of scales by radiation thermometry. In: *CCT Working document CCT/03–03.BIPM*, Sèvres Cedex. 2003.

32. Fischer J., Sadli M., Ballico M., Battuello M., Park S. N., Saunders P. Uncertainty budgets for realization of ITS-90 by radiation thermometry. *Temperature Its Measurement and Control in Science and Industry: AIP Conference Proceedings*, Chicago. 2003;7:631–638.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Mise en pratique for the definition of the kelvin (2019) / Practical realization of the definition of some important units // BIPM [website]. URL: <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique> (дата обращения: 17.04.2020).

Государственная поверочная схема для средств измерения температуры: Приказ Росстандарта от 23 декабря 2022 г. № 3253 // Росстандарт : официальный сайт. URL: <https://www.gost.ru/portal/gost/home/activity/documents/orders#/order/394724> (дата обращения: 09.01.2023).

О внесении изменений в положение об эталонах единиц величин, используемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений: Постановление правительства РФ от 21 октября 2019 г. № 1355 // КонсультантПлюс: справ. правовая система [сайт]. URL: <https://rulaws.ru/government/Postanovlenie-Pravitelstva-RF-ot-21.10.2019-N-1355/> (дата обращения: 17.10.2021).

Об обеспечении единства измерений: Федер. закон Рос. Федерации от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ: принят Гос. Думой Федер. Собрания Рос. Федерации 11 июня 2008 г.: одобрен Советом Федерации Федер. Собр. Рос. Федерации 18 июня 2008 г. (в редакции от 11 июня 2021 г. № 170-ФЗ) // Официальный интернет-портал правовой информации [сайт]. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102122832> (дата обращения: 25.07.2023).

Об утверждении Государственного первичного эталона единицы температуры – кельвина в диапазоне от 0,3 до 273,16 К: Приказ Росстандарта от 02 февраля 2021 г. № 65 // Кодекс: справ. система [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573560306> (дата обращения: 25.07.2023).

Об утверждении Государственного первичного эталона единицы температуры в диапазоне от 0 до 3200 °С: Приказ Росстандарта от 23 декабря 2020 г. № 2198 // Кодекс: справ. система [сайт]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573354712> (дата обращения: 25.07.2023).

Об утверждении требований к содержанию и построению государственных поверочных схем и локальных поверочных схем, в том числе к их разработке, утверждению и изменению, требований к оформлению материалов первичной аттестации и периодической аттестации эталонов единиц величин, используемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, формы свидетельства об аттестации эталона единицы величины, требований к оформлению правил содержания и применения эталона единицы величины, формы извещения о непригодности эталона единицы величины к его применению: Приказ Минпромторга России от 11 февраля 2020 г. № 456 // Официальный интернет-портал правовой информации : официальный сайт. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202008250060> (дата обращения: 17.10.2021).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Сильд Юрий Альфредович – руководитель лаборатории эталонов и научных исследований в области инфракрасной радиометрии и прикладной пирометрии ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19

e-mail: y. a.sild@vniim.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1480-3264>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Iurii A. Sild – Head of Radiometric and Applied Pyrometry Laboratory, Thermodynamics Department, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology

19, Moskovsky pr., St. Petersburg, 190005, Russia

e-mail: y. a.sild@vniim.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1480-3264>