

Государственный первичный эталон единицы температуры в диапазоне 0–3200 °С ГЭТ 34-2020: практическая реализация нового определения кельвина

Анатолий Иванович Походун^{1✉}, Виктор Маркович Фуксов², Юрий Альфредович Сильд³, Михаил Андреевич Мазанов⁴, Михаил Семенович Матвеев⁵

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

¹A.I.Pokhodun@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2296-0884>✉

²V.M.Fuksov@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9612-6262>

³Y.A.Sild@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1480-3264>

⁴M.A.Mazanov@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0340-4196>

⁵M.S.Matveyev@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4423-0161>

Аннотация. Рассмотрены необходимость и пути модернизации Государственного первичного эталона единицы температуры в диапазоне 0–3000 °С ГЭТ 34-2007. Освещена проблема перехода на новое определение кельвина. Показано, что новое определение кельвина не влияет непосредственно на статус действующих международных температурных шкал МТШ-90 и ВНТШ-2000, однако предоставляет значительные преимущества для измерения термодинамической температуры ниже 20 К и выше примерно 1300 К. В связи с этим основное направление модернизации ГЭТ 34-2007 в диапазоне 273,15–1235 К связано с совершенствованием методов и средств реализации МТШ-90. В рамках работ по модернизации эталона в диапазоне выше 1235 К создан комплекс аппаратуры, позволяющий воспроизводить кельвин в соответствии с его новым определением двумя методами: абсолютной первичной радиометрической термометрии и относительной первичной радиометрической термометрии. Методы рекомендованы Консультативным комитетом по термометрии Международного бюро мер и весов. Изложены основные принципы реализации этих методов, а также состав и метрологические характеристики утверждённого в 2020 г. ГЭТ 34-2020. Приведены результаты ключевых сличений ГЭТ 34-2020 в диапазоне 273,16–692,477 К, а также результаты измерений температуры ряда высокотемпературных реперных точек и их сопоставление с опубликованными результатами аналогичных измерений ведущих национальных метрологических институтов.

Ключевые слова: международная температурная шкала, термодинамическая температура, компаратор, энергетическая яркость, спектральная полоса, интегрирующая сфера, трэп-детектор, монохроматор

Для цитирования: Походун А. И., Фуксов В. М., Сильд Ю. А., Мазанов М. А., Матвеев М. С. Государственный первичный эталон единицы температуры в диапазоне 0–3000 °С ГЭТ 34-2020: практическая реализация нового определения кельвина // Измерительная техника. 2021. № 7. С. 13–21. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-7-13-21>

Primary state standard of the temperature in the range from 0 to 3200 °C, GET 34-2020: practical implementation of the new definition of kelvin

Anatolii I. Pokhodun^{1✉}, Viktor M. Fuksov², Iurii A. Sild³, Mikhail A. Mazanov⁴, Mikhail S. Matveyev⁵

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

¹A.I.Pokhodun@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2296-0884>✉

²V.M.Fuksov@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9612-6262>

³Y.A.Sild@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1480-3264>

⁴M.A.Mazanov@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0340-4196>

⁵M.S.Matveyev@vniim.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4423-0161>

Abstract. The article considers the necessity of ways of modernization the Primary standard of the temperature GET 34-2007. Special attention is paid to the transition to a new definition of kelvin. Taking into account that the new definition of kelvin does not directly affect the status of the current international temperature scales ITS-90 and PLTS-2000, but there are significant advantages for measuring thermodynamic temperatures below 20 K and above ~1300 K, the main focus of the modernization of the GET 34-2007 in the range from 273.15 K to 1235 K was focused on improving the methods and means of implementing the International Temperature Scale ITS-90. As part of the modernization of the Primary standard in the range above 1235 K, a set of equipment has been created that allows the reproduction of kelvin in accordance with its new definition by two methods recommended by the Consultative Committee: the method of absolute primary radiometric thermometry and the method of relative primary radiometric thermometry. The basic principles of the implementation of these methods, composition and metrological characteristics of the Primary standard are described. The results of key comparisons of the developed standard in the range from 273.16 K to 692.477 K and the results of temperature measurements of a number of high-temperature fixed points and a comparison of the results with the published results of leading national metrological institutes are presented.

Keywords: international temperature scale, thermodynamic temperature, comparator, radiance, spectral band, integrating sphere, trap detector, monochromator

Введение. На 26-й Генеральной конференции по мерам и весам, состоявшейся 13–16 ноября 2018 г. в Париже, была принята обновлённая Международная система единиц. В ней предусмотрены новые определения четырёх основных единиц (в том числе кельвина) физических величин на основе фундаментальных физических констант. Новое определение кельвина, введённое в практику решением Генеральной конференции по мерам и весам в мае 2019 г., имеет следующую формулировку [1]:

«Кельвин, символ K, является единицей термодинамической температуры. Он определяется путём принятия фиксированного числового значения постоянной Больцмана k , которое должно составлять $1,380649 \cdot 10^{-23}$ и которое выражено в единицах Дж·К⁻¹, что эквивалентно кг·м²·с⁻²·К⁻¹, где килограмм, метр и секунда определяются через h , c и $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ ».

Здесь h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме; $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ – частота цезия, соответствующая переходу между двумя сверхтонкими уровнями невозмущённого основного состояния атома ¹³³Cs. Это определение подразумевает точное значение постоянной Больцмана $k = 1,380649 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹.

В пользу нового определения единицы температуры были высказаны следующие аргументы [2]:

новое определение кельвина делает его независимым от какой-либо материальной субстанции, технической реализации, а также температуры или температурного диапазона. В частности, новое определение будет совершенствовать температурные измерения в диапазоне, далёком от тройной точки воды;

установление точного значения постоянной Больцмана k важно не только для метрологии, но и для науки в целом. При этом погрешность измерения термодинамической температуры не будет существенной;

новое определение кельвина через постоянную Больцмана не требует замены МТШ-90 более совершенной температурной шкалой, но и не препятствует такой замене;

в долгосрочной перспективе можно постепенно совершенствовать температурную шкалу с целью уменьшения неопределённости и расширения температурных диапазонов без дорогостоящих издержек и неудобств, которые возникали при сменах предшествующих шкал.

Следствием переопределения кельвина является необходимость модернизации отечественных государственных эталонов единицы температуры с целью обеспечения воспроизведения кельвина в соответствии с его новым определением.

По оценкам рабочей группы TG-SI Консультативного комитета по термометрии МБМВ новое определение кельвина не влияет непосредственно на статус действующих международных температурных шкал МТШ-90 и ВНТШ-2000 и позволяет измерять термодинамические температуры менее 20 K и более примерно 1300 K – в областях, где первичные термометры могут обеспечить неопределённость, меньшую неопределённости МТШ-90 [2]. Учитывая эту оценку рабочей группы TG-SI, при модернизации Государственного первичного эталона единицы температуры в диапазоне 0–3000 °С ГЭТ 34-2007 основное внимание уделено измерению температур более 1235 K с использованием методов первичной термометрии. В диапазоне 273,15–1235 K не требуется каких-либо принципиальных изменений состава ГЭТ 34-2007, так как в обозримом будущем действующая МТШ-90 сохранит статус [2].

В настоящее время возрастают требования отечественной науки и промышленности к точности и расширению диапазона измерений температуры. Анализ метрологических характеристик наиболее точных рабочих средств измерений (СИ), производимых в Российской Федерации и за рубежом, показал, что в течение последних 15–20 лет точность СИ температуры, зарегистрированных в Госреестре СИ, увеличилась в 1,5–2 раза. Развитие критических технологий, в частности, технологий создания материалов для гиперзвуковых летательных аппаратов, подразумевает обеспечение возможности измерения температур значительно выше 3000 °С.

Таким образом, при модернизации ГЭТ 34-2007 особое внимание уделялось обеспечению возможности воспроизведения кельвина в соответствии с его новым определением в диапазоне 1235–3473 K, а также решалась задача повышения точности эталона в диапазоне 273,15–1235 K.

Состав и описание комплекса аппаратуры ГЭТ 34-2020, реализующей воспроизведение единицы температуры в диапазоне 273,15–1235 K. Состав эталона в диапазоне

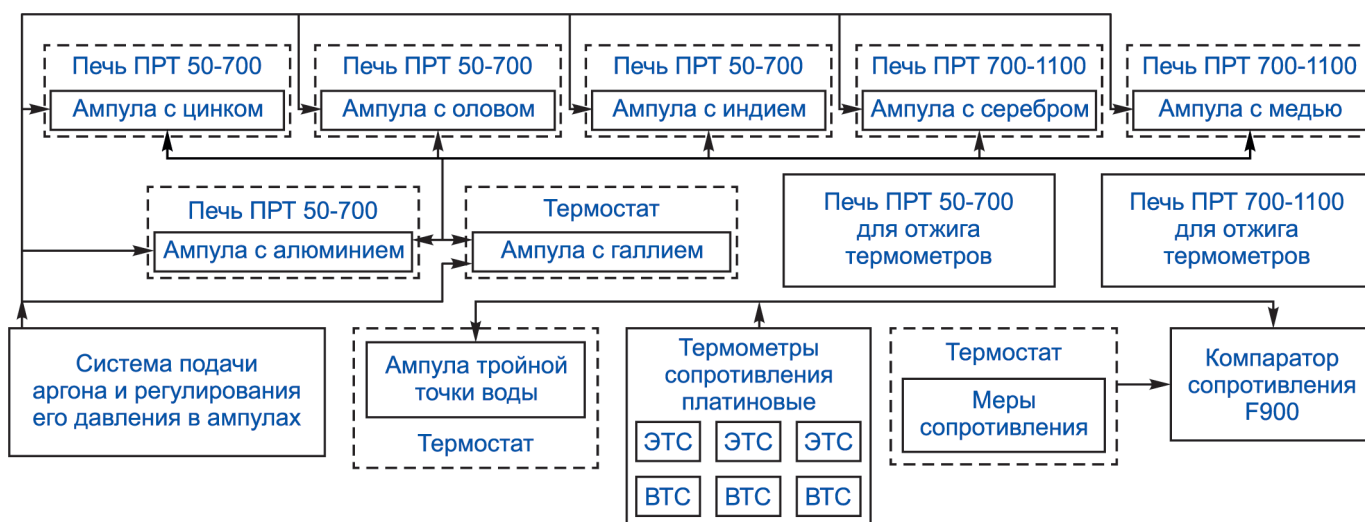


Рис. 1. Состав и структурная схема ГЭТ 34-2020, реализующего Международную температурную шкалу в диапазоне 273,16–961,78 К; ЭТС, ВТС – эталонные термометры сопротивления платиновые и высокотемпературный платиновый соответственно

Fig. 1. Structure and block diagram of the primary standard that realizes the International temperature scale in the range 273.16–961.78 K; SPRT, HTSPRT – standard platinum resistance thermometer and high-temperature standard platinum resistance thermometer respectively

273,15–961,78 К определяется положением о МТШ-90 [3]. Для воспроизведения МТШ-90 в диапазоне 273,15–1235 К в состав ГЭТ 34-2020 входят следующие основные устройства:

три эталонных платиновых термометра сопротивления ЭТС-25, для диапазона температуры 273,15–933,473 К;

три эталонных высокотемпературных платиновых термометра сопротивления (ВТС) для диапазона температуры 933,473–1234,93 К;

комплекс аппаратуры для воспроизведения реперных точек температурной шкалы МТШ-90 в диапазоне 933,473–1234,93 К, содержащий печи ПРТ 50-700, ПРТ 700-1100 и ампулы с чистыми веществами – водой, галлием, индием, оловом, цинком, алюминием и серебром;

комплекс аппаратуры для измерения сопротивления эталонных термометров: компаратор сопротивления F900 и набор термостатированных эталонных мер сопротивления МС3050Т.

В состав ГЭТ 34-2020 также входят следующие вспомогательные устройства:

печь ПРТ 50-700 для отжига термометров в диапазоне 50–700 °С;

печь ПРТ 700-1100 для отжига термометров в диапазоне 700–1100 °С;

калибратор мостов, используемых для измерения сопротивления.

На рис. 1 показана структурная схема модернизированного комплекса аппаратуры из состава ГЭТ 34-2020, предназначенной для воспроизведения МТШ-90 в диапазоне 273,15–1235 К.

В процессе совершенствования комплекса аппаратуры эталона ГЭТ 34-2007, воспроизводящего единицу температуры в диапазоне 0–961,78 °С, были решены следующие задачи:

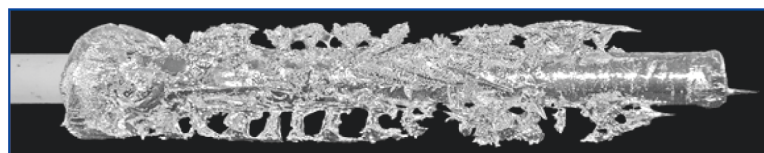


Рис. 2. Структура границы раздела твёрдой и жидкой фаз для индия после её инициирования

Fig. 2. Structure of the interface between the solid and liquid phases for Indium after its initiation

уменьшена случайная составляющая погрешности измерения сопротивления эталонных термометров путём использования оператора кумулятивного среднего, которое позволило существенно увеличить соотношение полезного сигнала к шуму;

исследован метод оценки влияния примесей на температуру фазовых переходов металлов, используемых для реализации реперных точек температурной шкалы МТШ-90 [4, 5]. Метод оценки влияния примесей на температуру фазовых переходов металлов (индия и цинка) предполагает равномерное образование слоя затвердевающего металла и перемещение фронта раздела твёрдой и жидкой фаз металла от наружной поверхности слитка к его центру. Результаты исследования процессов затвердевания индия и цинка показали [6], что реальный процесс кристаллизации может отличаться от модели, используемой для расчёта неопределённостей, обусловленных примесями в металле. Процесс кристаллизации зависит от скорости и метода инициирования начала кристаллизации, а также от ряда других факторов. Вследствие этого фронт раздела фаз может быть несплошным и равномерно перемещаться от наружной поверхности вдоль вертикали слитка к центру (рис. 2). По итогам исследований установлено, что изложенный

в документе [4] метод может быть успешно использован, если при кристаллизации металла добиться, чтобы образование раздела фаз было равномерным вдоль слитка и граница раздела фаз равномерно перемещалась от наружной поверхности слитка к его центру;

существенно уменьшена неоднородность температурного поля в рабочем объёме в результате применения разработанных конструкций печей. Неоднородность температурного поля в рабочем объёме печи является одним из основных факторов, определяющих погрешность реализации реперной точки температурной шкалы и результат градуировки термометра в реперных точках. Неоднородность поля зависит от конструкции печи, вспомогательных устройств, которые влияют на конфигурацию температурных полей вокруг ампулы с металлом и вдоль погружаемой части эталонного термометра.

На основе расчёта теплофизических моделей и экспериментальных исследований АО НПП «Эталон» (Омск) совместно с ВНИИМ им. Д. И. Менделеева созданы печи ПРТ 50-700, обеспечивающие возможность формирования в их рабочем пространстве температурных полей, необходимых для уменьшения неопределённости воспроизведения реперных точек МТШ-90 и неопределённости градуировки эталонных термометров.

На рис. 3 показаны возможности изменения конфигурации температурного поля в рабочем объёме печи с применением регуляторов температуры. Конфигурация температурного поля в ампуле оценивалась путём измерения температуры затвердевания цинка

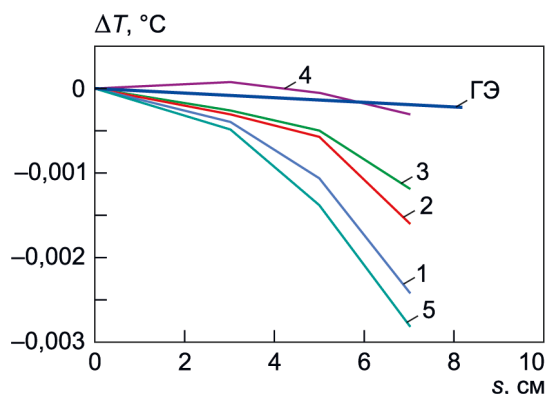


Рис. 3. Исследование возможностей регулирования температурного поля в рабочем объёме печи при пяти реализациях фазового перехода цинка: температурное поле по высоте канала ампулы при настройках перепада температуры на нижнем и верхнем охранных нагревателях $-2,0$ и $+4,0$ °C (1); $-2,2$ и $+4,4$ °C (2); $-2,4$ и $+5,2$ °C (3); $-2,6$ и $+5,5$ °C (4); $-2,6$ и $+6,2$ °C (5); ГЭ – гидростатический эффект; s – расстояние от чувствительного элемента термометра до дна ампулы

Fig. 3. Study of the possibilities of regulating the temperature field in a furnace working volume during realization of the zinc phase transition 1–5 – temperature field by height of thermometer well at different settings of the temperature drop of heaters

на различном расстоянии от чувствительного элемента термометра до дна ампулы. Пять реализаций фазовых переходов (затвердеваний) осуществлялись в печи ПРТ 50-700, имеющей три управляемых нагревателя, при пяти разных настройках верхнего и нижнего охранных нагревателей. Измерялось температурное поле по высоте канала ампулы при настройках перепада температуры на нижнем и верхнем нагревателях $-2,0$ и $+4,0$ °C; $-2,2$ и $+4,4$ °C; $-2,4$ и $+5,2$ °C; $-2,6$ и $+5,5$ °C; $-2,6$ и $+6,2$ °C соответственно. Для иллюстрации возможностей печи на рис. 3 показана теоретическая зависимость температуры затвердевания цинка от гидростатического давления столба металла – гидростатический эффект.

Воспроизведение единицы температуры в диапазоне 1235–3473 К. В диапазоне выше температуры затвердевания серебра (1235 К) Консультативным комитетом по термометрии рекомендованы два метода измерения термодинамической температуры, которые могут быть использованы для воспроизведения единицы температуры в соответствии с ее новым определением [1]: абсолютная

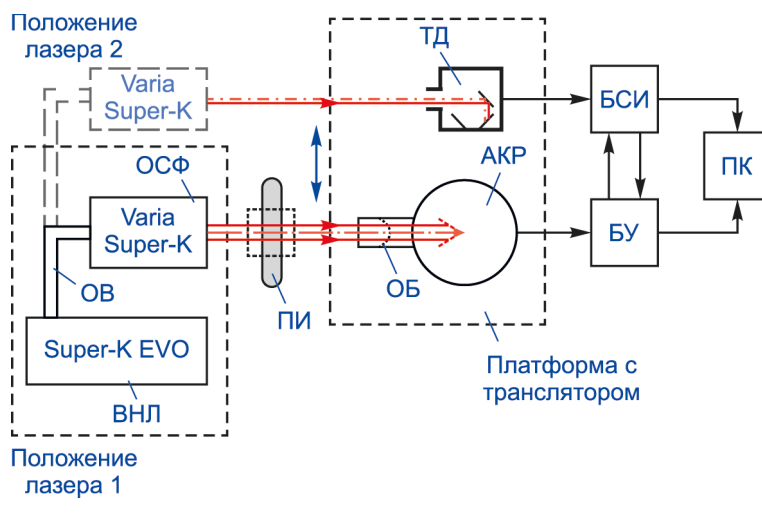


Рис. 4. Схема измерения спектральной чувствительности трэп-детектора при двух положениях лазера:

1 – измерение мощности излучения лазера Super-K EVO, применяемого с акустооптическим фильтром Varia Super-K; 2 – измерение спектральной чувствительности трэп-детектора к мощности падающего излучения; АКР – абсолютный криогенный радиометр; БСИ – блок средств измерений; БУ – блок управления; ВНЛ – высокостабильный непрерывный лазер; ОБ – окно Брюстера; ОВ – оптическое волокно; ОСФ – акустооптический спектральный фильтр; ПИ – поляризатор излучения; ПК – персональный компьютер; ТД – трэп-детектор

Fig. 4. Scheme for the spectral sensitivity measuring of trap-detector for laser position 1, 2:

1 – measurement of the radiation power of the Super-K EVO laser with using an acousto-optical filter; 2 – measuring the spectral sensitivity of trap-detector to the power of the incident radiation; CR – cryogenic radiometer; CMI – cluster of measuring instruments; CB – control block; HSCL – high stability continuous laser; BW – brewster window; OF – optical fiber; AOF – acousto-optical filter; P – polarizer; PC – personal computer; TD – trap-detector

первичная радиометрическая термометрия, основанная на измерении мощности теплового излучения; относительная первичная радиометрическая термометрия, на базе высокотемпературных реперных точек.

Реализации прямого метода измерения термодинамической температуры. В основе прямого метода лежит закон Планка, устанавливающий связь между термодинамической температурой T и спектральной плотностью энергетической яркости теплового излучения $L(\lambda, T)$ на длине волны λ :

$$L(\lambda, T) = \frac{c_1}{\pi \lambda^5 n^2} \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T n}\right) - 1 \right]^{-1},$$

где $c_1 = 2hc^2 = 1,91042972 \cdot 10^{-16} \text{ В} \cdot \text{м}^2$;

$c_2 = hc/k = 0,014387768 \text{ м} \cdot \text{К}$ – первая и вторая радиационные постоянные; n – показатель преломления воздуха.

Для измерения энергетической яркости используется трэп-детектор (ТД), функция преобразования которого имеет вид

$$I_{\text{ТД}} = K \int_0^\infty S(\lambda) L(\lambda, T) d\lambda,$$

где K – коэффициент, учитывающий все оптические, геометрические, электрические и другие влияющие на измеренный фототок факторы; $S(\lambda)$ – спектральная чувствительность ТД к мощности теплового потока.

Таким образом, энергетическая яркость может быть определена на основе результатов измерений тока ТД и его спектральной чувствительности к яркости. На рис. 4 представлена схема измерения спектральной чувствительности ТД, которая определяется по измеренным значениям тока, инициированного лазерным излучением. Мощность лазерного излучения измеряется абсолютным криогенным радиометром АКР Cryorad III (L-1 Standards and Technology, Inc., США) при положении лазера 1 (см. рис. 4).

В качестве источника лазерного излучения используется высокостабильный непрерывный лазер ВНЛ Supercontinuum SuperK EVO-04 (NKT Photonics Inc, США) совместно с акустооптическим спектральным фильтром АОСФ SuperK VARIA (NKT Photonics Inc, США) с регулируемой мощностью, а также с перестраиваемыми длиной волны и шириной спектральной полосы излучения. Излучение лазера проходит через поляризатор излучения ПИ и окно Брюстера ОБ на чувствительную площадку АКР, после чего измеряется значение мощности падающего лазерного излучения. Далее платформа с транслятором переводится в положение 2, после чего лазер ВНЛ визируется на центр входной диафрагмы ТД. Затем ТД калибруется по спектральной чувствительности к потоку излучения, выраженной в единицах измерения [А/Вт].

Измерение термодинамической температуры абсолютно чёрного тела (АЧТ) прямым методом реализуется путём компарирования спектральных энергетических яркостей исследуемого АЧТ и специального источника излучения. Специальный источник представляет собой интегрирующую сферу,

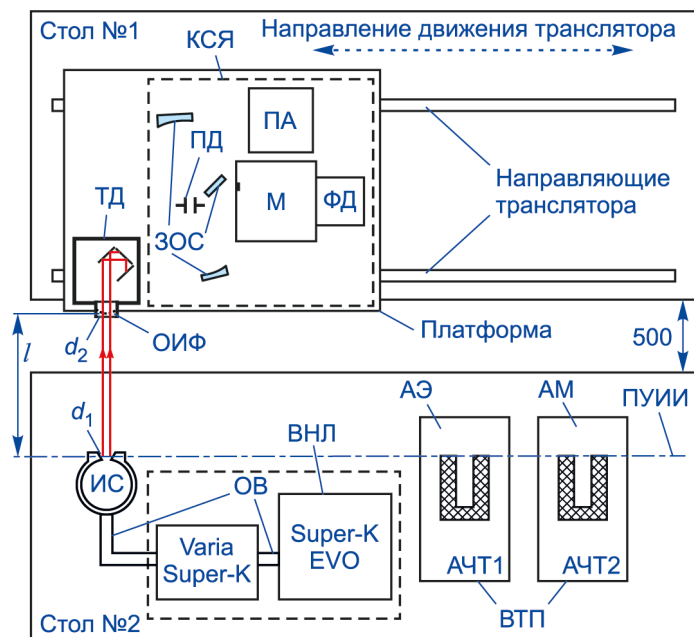


Рис. 5. Измерение фототока трэп-детектора, вызванного потоком излучения в телесном угле, который определяется диафрагмами на выходе интегрирующей сферы и на входе трэп-детектора:

АМ, АЭ – ампулы соответственно с металлом и эвтектикой; АЧТ1, АЧТ2 – абсолютно-чёрные тела; ВТП – высокотемпературная печь; ЗОС – зеркальная оптическая система; ИС – интегрирующая сфера; КСЯ – компаратор спектральных яркостей; М – монохроматор; ОИФ – оптический интерференционный фильтр; ПА – пико-амперметр; ПД – промежуточная диафрагма; ПУИИ – плоскость установки источников излучения; ФД – фотодиод; d_1 , d_2 – диафрагмы; остальные обозначения те же, что на рис. 4

Fig. 5. Measurement of the trap-detector photocurrent that is caused by the radiation flux limited by solid angle determined by diaphragms at exit of an integrating sphere and at entrance of trap-detector:

CWM – cell with metal; EC – eutectic cell; BB1, BB2 – black bodies; HTF – high temperature furnace; OMC – optical mirror system; IS – integrating sphere; SBC – spectral brightness comparator; M – monochromator; OIF – optical interference filter; PA – pico-ammeter; IA – intermediate aperture; IPRS – installation plane of radiation source; PD – photodiode; d_1 , d_2 – aperture; the other symbols are the same as in fig. 4

вход которой соединён с выходным отверстием акустооптического туннельного фильтра. Интегрирующая сфера формирует на выходе поток, близкий к ламбертову излучению.

Для определения энергетической яркости излучения сферы измеряют ток ТД, освещённого излучением интегрирующей сферы в определённом телесном угле. Для формирования известного телесного угла и дальнейшего определения геометрического фактора применяются прецизионные диафрагмы диаметрами 4 и 8 мм, которые устанавливаются на входную апертуру трэп-детектора и переднюю плоскость корпуса интегрирующей сферы соответственно. Для минимизации паразитной засветки между интегрирующей сферой и ТД устанавливается специальная бленда.

После юстировки системы «интегрирующая сфера – ТД» рассчитывается геометрический фактор g по формуле

$$g = 2\pi r_1 r_2 \left[r_1^2 + r_2^2 + d^2 + \sqrt{(r_1^2 + r_2^2 + d^2)^2 - 4r_1^2 r_2^2} \right]^{-1},$$

где r_1, r_2 – радиусы диафрагм, установленных соответственно на интегрирующей сфере и ТД; d – расстояние между диафрагмами.

Схема измерения фототока ТД показана на рис. 5. Фототок вызван световым потоком в телесном угле, определяемом двумя прецизионными диафрагмами d_1, d_2 на выходе интегрирующей сферы и на входе ТД соответственно. В свою очередь на ТД устанавливается оптический интерференционный фильтр ОИФ с известными спектральными характеристиками ($\lambda_0 = 650$ нм, полная ширина полумаксимума 20 нм). Для устранения влияния темнового тока измеряют фототок $I_{ТД}$ трэп-детектора, освещённого излучением интегрирующей сферы, а затем измеряют фототок при выключенном лазере $I_{в.л.}$. За полезный сигнал I принимают разность этих измеренных значений: $I = I_{ТД} - I_{в.л.}$.

Используя итерационный алгоритм Ньютона-Рафсона, вычисляют термодинамическую температуру, соответствующую яркости

$$T_{i+1} = T_i + \left\{ \left[I - K \int_0^\infty S(\lambda) L(\lambda, T) d\lambda \right] \left[\frac{c_2}{T_i^2} K \right]^{-1} \times \right. \\ \left. \times \int_0^\infty S(\lambda) L(\lambda, T) \left\{ n\lambda \left[1 - \exp\left(-\frac{c_2}{n\lambda T_i}\right) \right] \right\}^{-1} d\lambda \right\}.$$

По рассчитанному значению термодинамической температуры, соответствующему спектральной энергетической яркости интегрирующей сферы, измеряется термодинамическая температура излучателя АЧТ, схема измерения приведена на рис. 6. Измерения выполняют путём компарирования спектральных энергетических яркостей АЧТ и интегрирующей сферы [9]. Для этого зеркальная оптическая система ЗОС компаратора спектральных яркостей КСЯ, входящего в состав эталона, визируется на входную диафрагму интегрирующей сферы ИС, и в положении платформы 1 пикоамперметром ПА измеряется фототок, инициированный излучением ИС. Далее платформа переводится в положение 2, ЗОС визируется на входную диафрагму ампулы с эвтектическим сплавом металла АЭ или ампулы с чистым металлом АМ, расположенных в высокотемпературной печи ВТП моделей АЧТ1, АЧТ2. Излучение измеряемой ампулы фокусируется ЗОС на входную щель монохроматора М, затем попадает на чувствительную площадку фотодиода ФД, и с помощью ПА измеряется фототок.

С учётом результатов измерений токов фотодиода компаратора рассчитывается термодинамическая температура исследуемого излучателя АЧТ:

$$T_{АЧТ} = c_2 \left\{ \lambda \ln \left(K_i^{\text{отн}} \frac{i_{\text{сф}}}{i_{\text{АЧТ}}} \right) \left[\exp \left(\frac{c_2}{\lambda T_{\text{сф}}} \right) - 1 \right] + 1 \right\}^{-1},$$

где $\lambda = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$, λ_1, λ_2 – соответственно верхняя и нижняя границы пропускания монохроматора компаратора спектральных яркостей; $K_i^{\text{отн}}$ – коэффициент, учитывающий отличие спектральных распределений мощности излучения интегрирующей сферы и АЧТ при заданном значении термодинамической температуры; $i_{\text{сф}}$, $i_{\text{АЧТ}}$ – токи фотодиода, инициируемые излучением интегрирующей сферы и модели АЧТ соответственно; $T_{\text{сф}}$ – температура, соответствующая яркости излучения интегрирующей сферы.

Реализация метода относительной первичной термометрии. В основе метода относительной первичной термометрии лежит использование высокотемпературных реперных точек, в качестве которых используют температуры фазовых переходов эвтектических сплавов

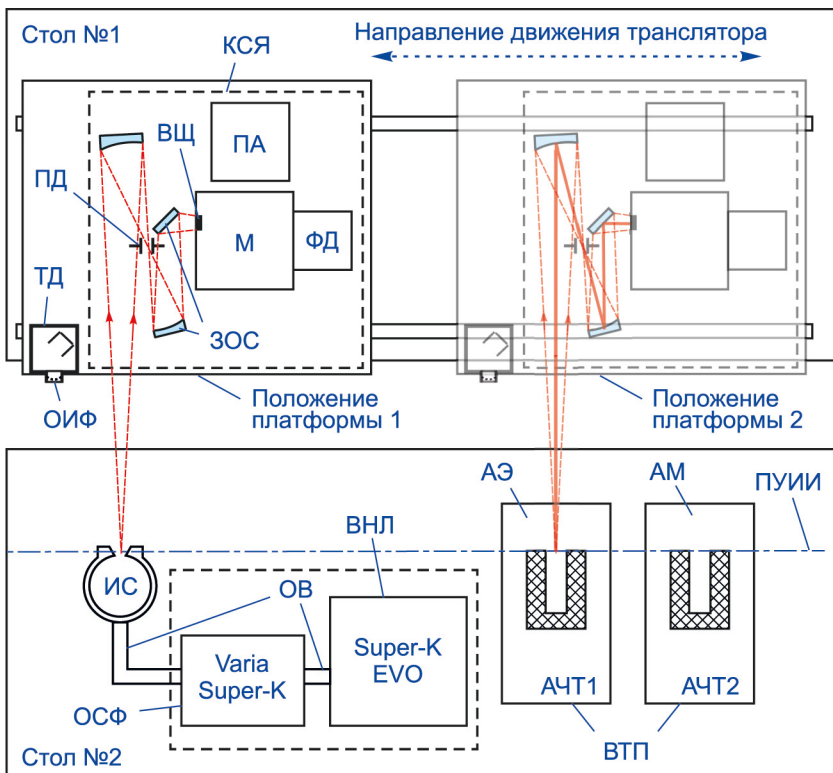


Рис. 6. Схема измерения токов фотодиода компаратора, инициированных излучениями сферы и абсолютно-чёрного тела: ВЩ – входная щель монохроматора; остальные обозначения те же, что на рис. 4, 5

Fig. 6. Circuit for measure the comparator photodiode current initiated by an integrating sphere radiation and by the blackbody radiation: EAM – entrance aperture of the monochromator; the other symbols are the same as in fig. 4, 5

металл-углерод (Me-C) [10, 11]. Значения термодинамической температуры фазовых переходов, т. е. реперных точек, и их неопределённости должны быть определены прямым методом. Исследования, выполненные в ведущих национальных метрологических институтах, в том числе во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, показали, что воспроизводимость высокотемпературных реперных точек может быть высокой, почти сравнимой с воспроизводимостью реперных точек на основе чистых металлов.

В состав эталона ГЭТ 34-2020 входит комплекс аппаратуры для реализации метода относительной первичной термометрии, состоящий из следующих устройств.

1. Два высокотемпературных излучателя, в полости которых помещаются ячейки в виде моделей АЧТ. Ячейки заполнены эвтектиками Me-C, в центре ячейки расположена излучающая полость с диафрагмой. В состав эталона входят ячейки с чистыми металлами (серебром и медью), а также ячейки с высокотемпературными эвтектическими сплавами кобальт-углерод (Co-C), рений-углерод (Re-C) и карбид вольфрама-углерод (WC-C).

2. Компаратор спектральных яркостей тепловых излучателей, содержащий двойной монохроматор, зеркальную фокусирующую оптическую систему, кремниевый фотоприёмник и систему позиционирования излучателей.

3. Температурные лампы, используемые для передачи единицы температуры, и высокостабильные источники тока для питания ламп.

Термодинамическую температуру $T_{\text{АЧТ}}$ излучателя АЧТ в методе условной первичной термометрии рассчитывают по формуле

$$T_{\text{АЧТ}} = c_2 \left\{ \lambda \ln \left(\frac{I_{\text{РТ}}}{I_{\text{ИЗМ}}} \right) \left[\exp \left(\frac{c_2}{\lambda T_{\text{РТ}}} \right) - 1 \right] + 1 \right\}^{-1},$$

где $I_{\text{РТ}}$ – значение фототока компаратора, инициированного излучением ячейки высокотемпературной реперной точки; $I_{\text{ИЗМ}}$ – значение фототока, инициированного излучением исследуемого излучателя АЧТ, температура которого измеряется; $T_{\text{РТ}}$ – температура фазового перехода реперной точки.

Метрологические характеристики ГЭТ 34-2020. Диапазон воспроизведения единицы температуры 0–3200 °C. Эталон обеспечивает воспроизведение и передачу единицы со средним квадратическим отклонением (СКО) результата измерений при пяти независимых измерениях. В табл. 1 приведены диапазоны следующих метрологических характеристик ГЭТ 34-2020: СКО; неисключённой систематической погрешности $\delta_{\text{н.с.}}$; суммарной стандартной неопределённости u_{Σ} ; расширенной неопределённости U_p при коэффициенте охвата $k=2$.

Результаты сличений ГЭТ 34-2020 с национальными эталонами других стран. Объективная оценка эквивалентности ГЭТ 34-2020 национальным эталонам ведущих метрологических институтов других стран может быть получена на основе результатов их сличений. В период 2017–2018 гг.

Таблица 1

Метрологические характеристики ГЭТ 34-2020

Диапазон, °C	СКО, °C	$\delta_{\text{н.с.}}$, °C	u_{Σ} , °C	U_p , °C
0–961,78	$(0,03 \dots 1,20) \cdot 10^{-3}$	$(0,04 \dots 1,70) \cdot 10^{-3}$	$(0,04 \dots 1,70) \cdot 10^{-3}$	$(0,08 \dots 3,40) \cdot 10^{-3}$
961,78–3200	0,08...0,80	0,12...1,04	0,094...1,000	0,19...2,00

Таблица 2

Результаты сличений эталонов ВНИИМ и РТВ в реперных точках МТШ-90 в диапазоне 0,010–419,527 °C

Реперная точка	$U_{\Sigma}(\text{FP})$, мК		ΔT , мК, К9-1
	РТВ	ВНИИМ	
Ga	0,27	0,134	–0,02
In	0,86	0,52	0,55
Sn	0,90	0,60	0,55
Zn	1,30	0,92	0,44

Таблица 3

Сравнение результатов измерения термодинамических температур фазовых переходов меди и эвтектик

Металл	$T_{\text{ВНИИМ}}$, К	T , К, ссылка	ΔT , К
Cu	1357,79	1357,77 [3]	0,020
Co-C	1597,23	1597,36 [13]	0,126
Re-C	2746,82	2747,00 [13]	0,184
WC-C	3020,93	3021,00 [14]	0,070

выполнены ключевые сличения Консультативного комитета по термометрии К-9.1, целью которых была оценка эквивалентности эталона единицы температуры ГЭТ 34-2020 ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Сличения подтвердили близость метрологических характеристик национальных эталонов Германии (РТВ) и России. Результаты сличений эталонов в диапазоне 0,010–419,527 °C приведены в табл. 2, где $U_{\Sigma}(\text{FP})$ – расширенная неопределённости реперных точек; ΔT – разность температур, определённых на эталонах РТВ и ВНИИМ [12].

При температурах выше 961,78 °C отсутствовала возможность выполнить сличение модернизированного эталона с другими национальными эталонами, воспроизводящими единицу температуры в соответствии с её новым определением. Поэтому результаты измерений температуры высокотемпературных реперных точек, измеренных модернизированным эталоном ГЭТ 34-2020, сравнили с опубликованными ранее результатами, полученными другими национальными метрологическими институтами.

В табл. 3 представлены значения термодинамической температуры $T_{\text{ВНИИМ}}$ фазовых переходов меди и эвтектик, измеренные прямым методом во ВНИИМ, и опубликованные результаты измерений T , выполненных во ВНИИОФИ (Россия), LNE-CNAM (Франция) и NPL (Великобритания).

Заключение. В результате совершенствования ГЭТ 34-2007 создан и утверждён Приказом Росстандарта от 23.12.2020 г. № 2198 Государственный первичный эталон единицы температуры в диапазоне 0–3200 °С ГЭТ 34-2020, который содержит комплексы аппаратуры для реализации МТШ-90 в диапазоне 273,15–1235 К и воспроизведения кельвина выше точки затвердевания серебра в соответствии с новым определением кельвина.

Достиженные значения исследованных метрологических характеристик ГЭТ 34-2020, а также результаты международных сличений позволяют утверждать, что созданный в рамках совершенствования ГЭТ 34-2020 обеспечивает потребности науки и промышленности, а его эквивалентность находится на уровне лучших национальных эталонов других стран.

Список литературы

1. *The International System of Units (SI)*, 9th ed., Paris, Bureau International des Poids et Mesures, 2019.
2. Fischer J., Gerasimov S., Hill K. D., Machin G., Moldover M. R., Pitre L., Steur P., Stock M., Tamura O., Ugur H., White D. R., Yang I., Zhang J., Preparative steps towards the new definition of the Kelvin in terms of the Boltzmann constant, *Int. J. Thermophys.*, 2007, vol. 28, no. 6, pp. 1753–1765.
3. Preston-Thomas H., The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), *Metrologia*, 1990, vol. 27, no. 1, pp. 3–10.
4. *Guide to the Realization of the ITS-90. Metal Fixed Points for Contact Thermometry*, Consultative Committee for Thermometry under the auspices of the International Committee for Weights and Measures, Paris, Bureau International des Poids et Mesures, Last updated 1 January 2018.
5. Fellmuth B., Hill K. D., Pearce J. V., Peruzzi A., Steur P. P. M., Zhang J., *Guide to the realization of the ITS-90. Fixed points: influence of impurities*, Paris, BIPM, Consultative Committee for Thermometry, 2018, available at: https://www.bipm.org/utils/common/pdf/ITS-90/Guide ITS-90_2_1_Impurities_2018.pdf (accessed: 20/05/2021).
6. Ivanova A. G., Fuksov V. M., Gerasimov S. F., Pokhodun A. I., *International Journal of Thermophysics*, 2017, vol. 38, no. 31. <https://doi.org/10.1007/s10765-016-2168-4>
7. Hartmann J., Anhalt K., Taubert D. R., Hollandt J., Absolute radiometry for the MeP: the irradiance measurement method, *Joint International Symposium on Temperature, Humidity, Moisture and Thermal Measurements in Industry and Science. TEMPMEKO & ISHM 2010*, Book of Abstracts, 2010, vol. B, p. 357.
8. Woolliams E., Dury M., Burnitt T., Alexander P. E. R., Winkler R., Hartree W., Salim S., Machin G., Primary radiometry for the mise-en-pratique for the definition of the kelvin: the hybrid method, *Joint International Symposium on Temperature, Humidity, Moisture and Thermal Measurements in Industry and Science. TEMPMEKO & ISHM 2010*, Book of Abstracts, 2010, vol. B, p. 354.
9. 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, *Int. J. Thermophys.*, 2011, vol. 32, no. 11–12, pp. 2217–2229.

10. 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, vol. 36, no. 3, pp. 207–209.

11. 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, vol. 38, pp. 213–219.

12. Pokhodun A. I., Rudtsch S., Ivanova A. G., Beketov N. A., *Metrologia*, 2020, vol. 57, Tech. Suppl.03005. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/57/1A/03005>

13. Woolliams E. R. et al., *Phil. Trans. R.*, 2016, vol. 374, iss. 2064. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0044>.

14. Sadli M., Khlevnoy B., et al., Comparison and determination of the melting temperature of WC-C cells developed at VNIIOFI and LNE-CNAM, *Tempmeko 16*, 2016. 26 June – 1 July 2016, Belvedere Congress Centre, Zakopane, Poland.

References

1. *The International System of Units (SI)*, 9th edition, Paris, Bureau International des Poids et Mesures, 2019.
2. Fischer J., Gerasimov S., Hill K. D., Machin G., Moldover M. R., Pitre L., Steur P., Stock M., Tamura O., Ugur H., White D. R., Yang I., Zhang J., Preparative steps towards the new definition of the Kelvin in terms of the Boltzmann constant, *Int. J. Thermophys.*, 2007, vol. 28, no. 6, pp. 1753–1765.
3. Preston-Thomas H., The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), *Metrologia*, 1990, vol. 27, no. 1, pp. 3–10.
4. *Guide to the Realization of the ITS-90. Metal Fixed Points for Contact Thermometry*, Consultative Committee for Thermometry under the auspices of the International Committee for Weights and Measures, Paris, Bureau International des Poids et Mesures, Last updated 1 January 2018.
5. Fellmuth B., Hill K. D., Pearce J. V., Peruzzi A., Steur P. P. M., Zhang J., *Guide to the realization of the ITS-90. Fixed points: influence of impurities*, Paris, BIPM, Consultative Committee for Thermometry, 2018, available at: https://www.bipm.org/utils/common/pdf/ITS-90/Guide ITS-90_2_1_Impurities_2018.pdf (accessed: 20.05.2021).
6. Ivanova A. G., Fuksov V. M., Gerasimov S. F., Pokhodun A. I., *International Journal of Thermophysics*, 2017, vol. 38, no. 31. <https://doi.org/10.1007/s10765-016-2168-4>
7. Hartmann J., Anhalt K., Taubert D. R., Hollandt J., Absolute radiometry for the MeP: the irradiance measurement method, *Joint International Symposium on Temperature, Humidity, Moisture and Thermal Measurements in Industry and Science. TEMPMEKO & ISHM 2010*, Book of Abstracts, 2010, vol. B, p. 357.
8. Woolliams E., Dury M., Burnitt T., Alexander P. E. R., Winkler R., Hartree W., Salim S., Machin G., Primary radiometry for the mise-en-pratique for the definition of the kelvin: the hybrid method, *Joint International Symposium on Temperature, Humidity, Moisture and Thermal Measurements in Industry and Science. TEMPMEKO & ISHM 2010*, Book of Abstracts, 2010, vol. B, p. 354.

9. 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, *Int. J. Thermophys.*, 2011, vol. 32, no. 11–12, pp. 2217–2229.
10. 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, vol. 36, no. 3, pp. 207–209.
11. 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, vol. 38, pp. 213–219.
12. Pokhodun A. I., Rudtsch S., Ivanova A. G., Beketov N. A., *Metrologia*, 2020, vol. 57, Tech. Suppl.03005. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/57/1A/03005>
13. Woolliams E.R. et al., Thermodynamic temperature assignment to the point of inflection of the melting curve of high-temperature fixed points, *Phil. Trans. R.*, 2016, vol. 374, iss. 2064. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0044>
14. Sadli M., Khlevnoy B., et al., Comparison and determination of the melting temperature of WC-C cells developed at VNIIOFI and LNE-CNAM, *Tempmeko 16*, 2016, 26 June – 1 July 2016, Belvedere Congress Centre, Zakopane, Poland.

Статья поступила в редакцию 19.04.2021; принята к публикации 01.06.2021.