

Переопределение кельвина и перспективы совершенствования Государственного первичного эталона единицы температуры в диапазоне от 0 до 3000 °С ГЭТ 34–2007

А. И. ПОХОДУН

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: A.I.Pokhodun@vniim.ru

Рассмотрены состояние и перспективы дальнейшего совершенствования Государственного первичного эталона единицы температуры в диапазоне от 0 до 3000 °С ГЭТ 34–2007. Основными задачами, которые необходимо решить в процессе совершенствования ГЭТ 34–2007, являются обеспечение способности воспроизводить кельвин в соответствии с его новым определением (планируемое вступление в силу в 2019 г.) при температуре выше 961,78 °С, повышение точности воспроизведения кельвина в 1,5–2 раза, расширение диапазона воспроизведения единицы температуры до 3200 °С. Показаны пути совершенствования ГЭТ 34–2007 для реализации Международной температурной шкалы 1990 г. (МТШ-90) в диапазоне 273,15–1235 К.

Ключевые слова: единица температуры, кельвин, температурная шкала, прямой и относительный метод, прослеживаемость.

The article examines The state-of-art and prospects for further improvement of the State primary measurement standard of a unit of temperature in the range from 0 to 3000 °C the GET 34–2007. The main tasks that should be addressed in the process of improving that Measurement Standard are as follows: providing the ability to reproduce the kelvin in the range above 961,78 °C in accordance with its new definition, which may come into force in 2019; improvement the accuracy of Kelvin's reproduction in 1,5–2 times; extension the range of reproduction of the unit of temperature to 3200 °C. The ways of perfection of the GET 34–2007 for realization of the ITC-90 in a range from 273,15 to 1235 K are shown.

Key words: unit temperature measurement standard, temperature scale, direct and relative method, traceability.

В 2008 г. во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева выполнена научно-исследовательская работа (НИР) «Разработка концепции развития системы метрологического обеспечения температурных измерений» [1]. В рамках этой работы проанализированы состояние и перспективы развития термометрии, её метрологическое обеспечение, а также требования отраслей отечественной промышленности и науки к измерениям температуры в период 2008–2018 гг. Результаты данного анализа использовали для планирования основных направлений развития термометрии. Основным элементом планирования – формирование путей дальнейшего совершенствования государственных первичных эталонов (ГПЭ) единицы температуры, не уступающих по научно-техническому уровню и метрологическим характеристикам лучшим зарубежным аналогам.

В Российской Федерации единство измерений температуры обеспечивается двумя ГПЭ, воспроизводящими Международную температурную шкалу 1990 г. (МТШ-90) (рис. 1) [2]: Государственным первичным эталоном единицы температуры – кельвина в диапазоне 0,3–273,16 К ГЭТ 35–2010 (ВНИИФТРИ) и Государственным первичным эталоном единицы температуры в диапазоне от 0 до 3000 °С ГЭТ 34–2007 (ВНИИМ им. Д. И. Менделеева).

Основной задачей совершенствования ГПЭ является обеспечение возможности воспроизведения кельвина в соответствии с его новым определением, принятие которого ожидается в 2019 г. на Генеральной конференции по мерам и весам. Кроме этой главной задачи, были скорректи-

рованы требования к метрологическим характеристикам ГЭТ 34–2007 с учётом современных и перспективных требований науки и промышленности: расширение верхней границы диапазона воспроизведения единицы температуры до 3 473 К и повышение точности эталона в 1,5–2 раза.

В основу работ по модернизации ГЭТ 35–2010 и ГЭТ 34–2007 положены результаты исследований, проведённых национальными метрологическими институтами (НМИ), и рекомендации, изложенные в материалах Консультативного комитета по термометрии (ККТ) [3]. В соответствии с рекомендацией ККТ кельвин будет определяться через фиксированное значение константы Больцмана. Ведущие НМИ, принимавшие участие в подготовке нового определения кельвина, выполнили большой объём работ по определению точного значения этой константы. Для этого был использован ряд термометров, реализующих различные методы первичной термометрии, в том числе газовый термометр постоянного объёма, акустический газовый термометр, газовый термометр по диэлектрической проницаемости, газовый термометр по показателю преломления, шумовой термометр, термометр по доплеровскому уширению спектральных линий. Результаты выполненных исследований, сформулированные в докладе Рабочей группы по переопределению кельвина, являются принципиально важными для модернизации эталонов [4]:

1. Новое определение кельвина не влияет непосредственно на статус МТШ-90 или Временной низкотемпературной шкалы 2000 года (ВНТШ-2000), однако имеет значи-

тельные преимущества при измерениях термодинамической температуры (с помощью акустического газового термометра) особенно ниже 20 К и выше 1300 К (с помощью радиационного термометра). В указанных диапазонах акустический и абсолютный радиационный термометры обеспечивают меньшую неопределённость, чем неопределённость МТШ-90.

2. Наиболее точные измерения температуры в основном диапазоне (приблизительно 13–1235 К) будут по-прежнему прослеживаться к Международной системе единиц (СИ) через платиновые термометры сопротивления, откалиброванные по МТШ-90.

3. Методы первичной термометрии, способствующие уменьшению неопределённости, будут использоваться все шире и смогут в некоторых диапазонах постепенно заменить международные температурные шкалы в качестве основы измерений температуры.

На основании полученных результатов сделаны выводы о том, что основное внимание должно быть сосредоточено на создании акустического газового термометра для работы при температурах ниже 20 К и эталонного радиационного термометра, работающего при температурах выше 1235 К.

В диапазоне 13–1235 К целесообразно модернизировать аппаратуру, воспроизводящую единицу температуры в соответствии с МТШ-90. При этом существует перспектива дальнейшего совершенствования акустического газового термометра с целью его использования при температурах до 273,16 К. В соответствии со специализацией НМИ Российской Федерации создание эталонного акустического термометра относится к компетенции ВНИИФТРИ, а создание эталонного радиационного термометра – ВНИИМ им. Д. И. Менделеева.

В период 2015–2016 гг. во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева в соответствии с ведомственной целевой программой «Проведение фундаментальных исследований в области метрологии, разработки государственных (в том числе, первичных) эталонов единиц величин» выполнена НИР «Кельвин». В рамках этой работы создан экспериментальный образец ГПЭ единицы температуры, исследования которого позволили определить основные научно-технические решения, обеспечивающие выполнение основных задач модернизации эталона ГЭТ 34–2007: воспроизведение единицы температуры методом первичной термометрии в соответствии с её новым определением в диапазоне температур выше 1235 К; повышение в 1,5–2 раза точности ГЭТ 34–2007; расширение диапазона воспроизведения и передачи единицы температуры до 3473 К.

Принимая во внимание факт, что в обозримом будущем в диапазоне 273,16–1235 К для воспроизведения единицы температуры альтернативы платиновому термометру сопротивления нет, представляется целесообразным усовершенствование аппаратуры из состава ГЭТ 34–2007, используемой для реализации МТШ-90 в указанном диапазоне. В част-

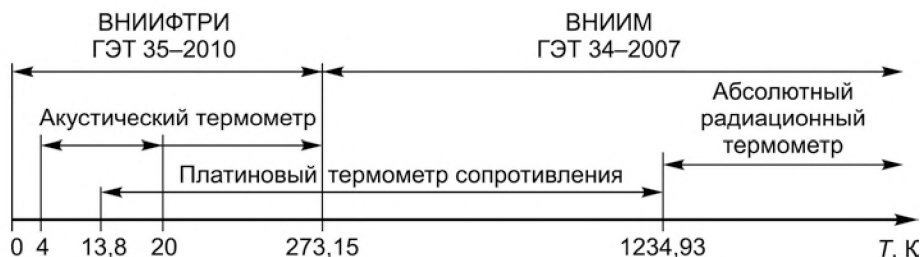


Рис. 1. Схема реализации нового определения кельвина с помощью ГПЭ Российской Федерации

ности, необходима модернизация аппаратуры, используемой для реализации реперных точек МТШ-90. Это обусловлено невозможностью обеспечения требуемой точности, стабильности поддержания температуры и однородности температурного поля в рабочем пространстве печей с помощью морально и физически устаревших установок. Кроме этого, в течение многих лет в Российской Федерации отсутствовала возможность оценки нелинейности мостов, используемых для измерений сопротивления эталонных платиновых термометров при их градуировке. Обе эти проблемы являются актуальными не только при воспроизведении единицы температуры, но и при её передаче. В настоящее время поверочные лаборатории территориальных органов Росстандарта оснащены импортным оборудованием, ремонт которого чрезвычайно дорог и требует больших затрат времени. Нерешённой проблемой также является оценка нелинейности мостов, входящих в состав вторичных и рабочих эталонов, используемых при передаче единицы температуры.

Проблема модернизации установок, используемых для реализации реперных точек в ГЭТ 34–2007, а также во вторичных и рабочих эталонах отечественных поверочных и калибровочных лабораторий была решена совместными усилиями специалистов ВНИИМ им. Д. И. Менделеева и ОАО «НПП «Эталон» (г. Омск). На ОАО «НПП «Эталон» созданы печи: ПРТ 50–700 (для реализации основных и вторичных реперных точек в диапазоне 50–700 °С); ПРТ 700–1100 (для реализации основных и вторичных реперных точек в диапазоне 700–1100 °С). Результаты исследований указанных печей в рамках НИР «Кельвин» показали их высокие метрологические и эксплуатационные характеристики, приведённые в табл. 1.

При температуре выше температуры затвердевания серебра (1235 К) для определения термодинамической температуры предполагается использовать методы радиационной термометрии. Данные методы изложены в документе «*Mise en Pratique*» [5], разработанном ККТ и содержащем рекомендации по практической реализации как МТШ-90, так и основных методов первичной термометрии, рекомендованных для использования после введения нового определения кельвина.

В [6–8] описаны два метода измерения термодинамической температуры, которые можно применять при воспроизведении единицы температуры выше 1235 К в соответствии с её новым определением: прямой метод измерения с ис-

Т а б л и ц а 1

Метрологические и эксплуатационные характеристики
печей ПРТ 50-700 и ПРТ 700-1100

Характеристика	ПРТ 50-700	ПРТ 700-1100
Диапазон температур, °С	50–680	700–1100
Нестабильность поддержания температуры, К	± 0,02	± 0,04
Перепад температуры между дном термометрического канала и уровнем на высоте 15 см от дна, К	± 0,01	± 0,2
Разрешающая способность дисплея, К	0,01	0,01
Наибольшая потребляемая мощность, Вт	3500	3500
Диаметр жаровой трубы, мм	52	52

пользованием абсолютного радиометра; относительная первичная термометрия, основанная на использовании высокотемпературных реперных точек.

В основе прямого метода лежит измерение спектральной мощности излучения абсолютно чёрного тела (АЧТ), прослеживаемое к единицам СИ. Спектральная плотность яркости $L_{b\lambda}$, представляющая мощность теплового потока, излучаемую АЧТ в единицу телесного угла в интервале длины волны $d\lambda$, описывается законом Планка:

$$L_{b\lambda}(\lambda, T)d\lambda = \varepsilon(\lambda, T) \left(\frac{2hc^2}{n^2\lambda^5} \right) \frac{d\lambda}{\exp(hc/(n\lambda kT)) - 1},$$

где k – постоянная Больцмана; h – постоянная Планка; c – скорость света; n – показатель преломления газа в оптической оси; λ – длина волны в газе; $\varepsilon(\lambda, T)$ – излучательная способность (коэффициент черноты); T – термодинамическая температура.

При использовании прямого метода воспроизведение и передача единицы температуры по тепловому излучению осуществляется в четыре этапа: измерение мощности стабилизированного лазера абсолютным криогенным калориметром; калибровка специального приёмника излучения (трап-детектора) лазером по мощности; калибровка специального источника излучения (лазера с интегрирующей сферой) трап-детектором по мощности; передача единицы

температуры, рассчитанной по мощности специального источника излучения (лазера с интегрирующей сферой), эталонному радиационному термометру.

Применение первичной радиометрии требует, чтобы используемые величины прослеживались к единицам СИ. Таким образом, измерение мощности должно прослеживаться к ватту и метру (длина волны, расстояние и площадь).

Воспроизведение единицы температуры методом относительной первичной термометрии основано на применении высокотемпературных реперных точек. В качестве высокотемпературных реперных точек используются

температуры фазовых переходов (плавления, затвердевания) эвтектических сплавов металл-углерод [9–11], а также эвтектических и перитектических сплавов (карбид металла) – углерод (МС-С). Реперным точкам, используемым для реализации метода относительной первичной термометрии, должны быть присвоены значения термодинамической температуры и неопределённость, имеющая место при реализации косвенных методов.

Термодинамическая температура фазовых переходов эвтектик определяется прямым методом. Предполагается, что неопределённость воспроизведения кельвина методом относительной первичной термометрии близка (или немного больше) к значению неопределённости при использовании прямого метода, однако метод относительной первичной термометрии значительно легче реализуем практически. Возможны три варианта реализации метода относительной первичной термометрии: экстраполяция, основанная на одной реперной точке; интерполяция между двумя или тремя реперными точками; подбор методом наименьших квадратов, если используются больше трёх реперных точек.

Функция преобразования радиационного термометра, градуированного в реперных точках, может быть описана соотношением, которое является планковской формой уравнения Sakuma–Hattori [12, 13]:

$$S(T) = C / [\exp(c'_2 / (AT + B)) - 1],$$

где $c'_2 = c_2 / n = hc / (kn)$; A, B, C – коэффициенты.

Коэффициенты A, B, C связаны со спектральной чувствительностью радиометра $s(\lambda)$. Измеренные пары (T, S) формируют ряды данных для экстраполяции, интерполяции и метода наименьших квадратов.

В настоящее время рассматривается возможность и целесообразность использования следующих высокотемпературных реперных точек (табл. 2) [14]. Эта таблица периодически будет пересматриваться по мере появления новых результатов измерений термодинамической тем-

Т а б л и ц а 2

Высокотемпературные реперные точки
на основе эвтектик металл-углерод

Состав эвтектики	Температура фазового перехода, К	Стандартная неопределённость, К	Расширенная неопределённость ($k=2$), К
Re-C	2747,84	0,177	0,35
Pt-C	2011,43	0,089	0,18
Co-C	1597,39	0,063	0,13
Cu	1357,802	0,0405	0,081

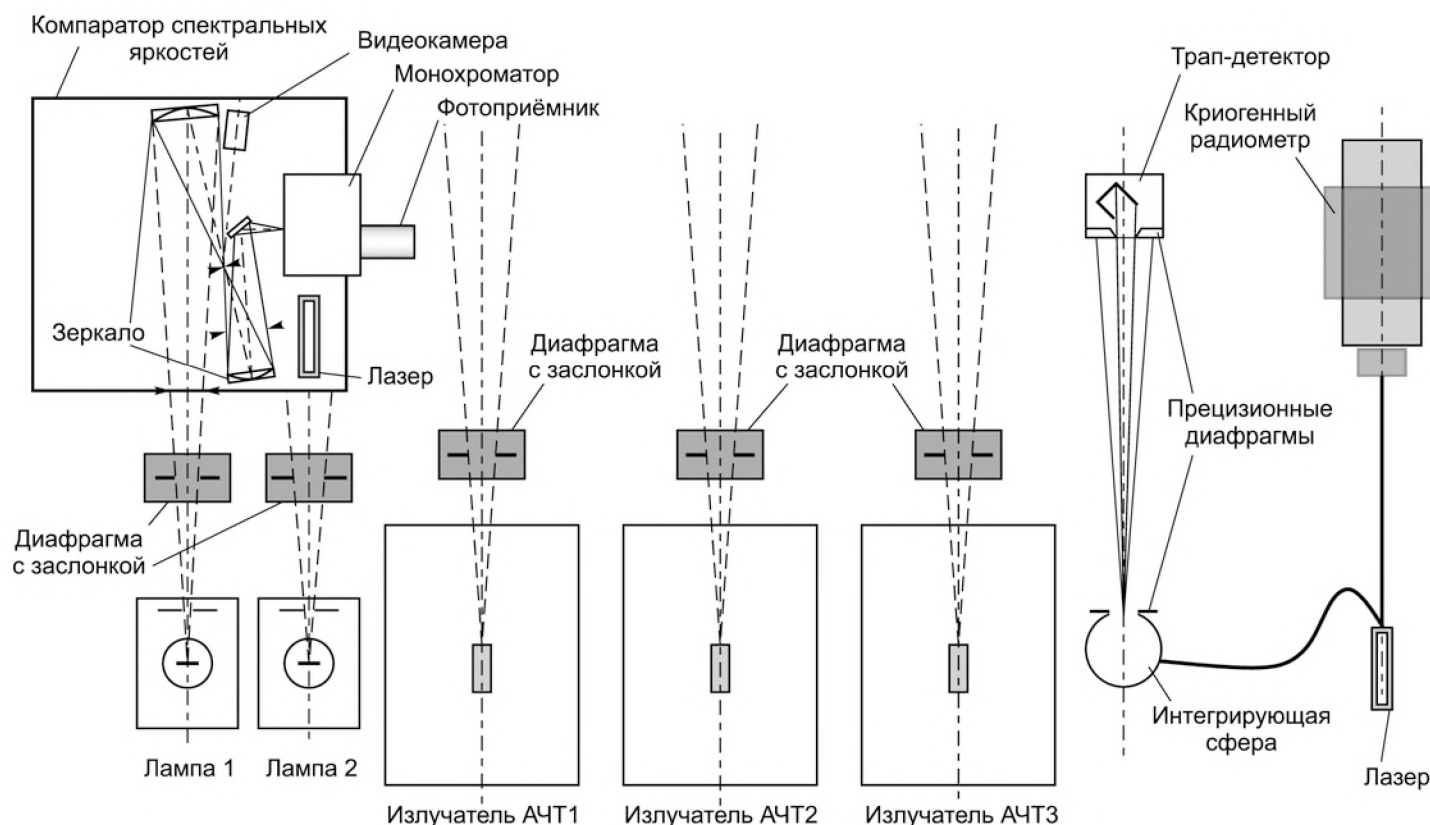


Рис. 2. Структурная схема экспериментального образца первичного эталона единицы температуры в диапазоне 1234,94–3473,15 К

пературы и исследований высокотемпературных реперных точек на основе других сплавов и металлов.

В рамках НИР «Кельвин» был создан экспериментальный образец модернизированного первичного эталона единицы температуры ГЭТ 34–2007, который обеспечил возможность воспроизведения кельвина методом относительной первичной термометрии.

Следующим шагом на пути совершенствования ГЭТ 34–2007 является реализация прямого метода воспроизведения единицы температуры в соответствии с её новым определением. Эта работа уже ведётся во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. На рис. 2 показана структурная схема экспериментального образца эталона, обеспечивающего возможность воспроизведения кельвина прямым методом, а также методом относительной первичной термометрии.

Комплекс аппаратуры для реализации метода относительной первичной термометрии состоит из трёх излучателей, являющихся высокотемпературными печами со встроенными ячейками, конструктивно представляющими модели АЧТ и содержащими высокотемпературные эвтектические сплавы металл-углерод. Эти излучатели обеспечивают воспроизведение высокотемпературных реперных точек температурной шкалы. Еще два излучателя – это температурные лампы, которые можно использовать для передачи единицы температуры. Для регистрации и сравнения спектральной мощности теплового излучения источников используется компаратор спектральных яркостей,

который состоит из зеркального объектива, монохроматора и кремниевых фотоприёмника. Для юстировки оптической системы компаратора используются лазер и видеокамера.

Компаратор яркостей смонтирован на подвижной платформе, которая может перемещаться перпендикулярно оптическим осям тепловых излучателей, и обеспечивает высокую точность позиционирования.

Реализация прямого метода воспроизведения кельвина осуществляется с помощью криогенного радиометра, который используется для измерения мощности излучения лазера, а также трап-детектора, градуируемого с помощью лазера и лазера с интегрирующей сферой.

Л и т е р а т у р а

1. Походун А. И., Дедиков Ю. А., Герасимов С. Ф., Матвеев М. С., Ражба Я. Е. Разработка концепции развития системы метрологического обеспечения температурных измерений. Единая государственная информационная система учета научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ гражданского назначения (ЕГИСУ НИОКТР). Отчёт по НИР инв. № 02200900744, 2008 [Электрон. версия]. <http://www.rosid.ru> (дата обращения: 03.08.2017).
2. The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) // Metrologia. 1990. No. 27. P. 3–10.

3. **RECOMMENDATION 2 (CI-2005):** Clarification of the definition of the kelvin, unit of thermodynamic temperature [Электрон. версия]. <https://www.bipm.org/jsp/en/CIPMRecommendations.jsp> (дата обращения: 03.08.2017).
4. **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. V. 28. No. 6. P. 1753–1765.
5. **Consultative Committee for Thermometry,** Recommendation T 3 (2005) to the CIPM: Creation of a mise en pratique of the definition of the kelvin. Working Documents of the 23rd Meeting of the Consultative Committee for Thermometry. BIPM Document CCT/05-32, BIPM, Sèvres, 2005.
6. **Machin G., Bloembergen P., Anhalt K., Hartmann J., Sadli M., Saunders P., Woolliams E., Yamada Y., Yoon H.** Practical implementation of the mise-en pratique for the definition of the kelvin above the silver point // *Joint International Symposium on Temperature, Humidity, Moisture and Thermal Measurements in Industry and Science. TEMPMEKO & ISHM 2010: Book of Abstracts.* 2010. V. A. P. 160.
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. V. 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. V. B. P. 354.
9. **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. V. 36. No. 3. P. 207–209.
10. **Yamada Y., Sakuma F., Ono A.** Thermocouple observations of melting and freezing plateaus for metal-carbon eutectics between the copper and palladium points // *Metrologia.* 2000. V. 37. P. 71–73.
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. V. 38. P. 213–219.
12. **Sakuma F., Kobayashi M.** Interpolation equations of scales of radiation thermometers // *Proc. 6th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science.* Torino: Levrotto & Bella, 1997. P. 305–310.
13. **Saunders P.** Uncertainties in the realisation of thermodynamic temperature above the silver point // *Joint International Symposium on Temperature, Humidity, Moisture and Thermal Measurements in Industry and Science. TEMPMEKO & ISHM 2010: Book of Abstracts.* 2010. V. B. P. 355.
14. **Sadli M., Fischer J., Yamada Y., Sapritsky V., Lowe D., Machin G.** Review of metal-carbon eutectic temperatures proposal for new ITS-90 secondary points // *Proc. 9th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science.* Zagreb, Croatia: LPM/FSB, 2005. V. 1. P. 341–348.

Дата принятия: 03.10.2017.