

5. Bronnikov K. A., Kononogov S. A., Melnikov V. N. // GRG. 2006. V. 38. P. 1215—1232.
6. Mills I. M. e. a. // Metrologia. 2006. V.43. P. 227—246.
7. Кононогов С. А. Метрология и фундаментальные физические константы. М: Стандартинформ, 2008.
8. Alexeev A. D. e. a. // Metrologia. 2001. V. 38. P. 397—408.
9. Melnikov V. N. Cosmology and Gravitation / Ed. M. Novello. Singapore Edition Frontiers. 1994. V. I. P. 147—244; V. II. 1996. P. 463—574.
10. Melnikov V. N. // Progr. Theor. Phys., Suppl. 2008. V. 172. P. 182—191.
11. Melnikov V. N. // Frontiers of Physics. 2009. V. 4. P. 75—93.
12. Ivashchuk V. D., Kononogov S. A., Melnikov V. N. // Grav. Cosmol. 2008. V. 14. P. 235—240.
13. Alimi J.-M. e. a. // Grav. Cosmol. 2006. V. 12. P. 173—178.
14. Kolosnitsyn N. I., Melnikov V. N. // GRG. 2004. V. 36. P. 1619—1624.
15. Rosenband T. e. a. // Science. 2008. V. 319. P. 1808—1812.
16. Shlyakhter A. I. // Nature. 1976. V. 264. P. 340.
17. Fujii J. e. a. // Nucl. Phys. B. 2000. V. 573. P. 377—401.
18. Bronnikov K. A., Kononogov S. A. // Metrologia. 2006. V. 43. P. R1—R9.
19. Webb J. K. e. a. // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. P. 884—887.
20. Murphy M. T. e. a. // Month. Not. R. Astron. Soc. 2001. V. 327. P. 1208—1222.
21. Bahcall J. e. a. // Astroph. J. 2004. V. 600. P. 520—543.
22. Webb J. K. e. a. // ArXiv: 1008.3907.
23. Ivanchik A. e. a. // Astron. Astrophys. 2005. V. 440. P. 45—52.
24. Бронников К. А. и др. // Измерительная техника. 2010. № 4. С. 27—34.
25. Kaestner B. e. a. // Phys. Rev. B. 2008. V. 77, 153301.
26. Maisi V. F. e. a. // New J. Phys. 2009. V. 1, 113057.
27. Wright S. J. e. a. // Phys. Rev. B. 2009. V. 80, 113303.
28. Lotkhov S. V. e. a. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 95, 112507.
29. Picard A. e. a. // Metrologia. 2009. V. 46. P. 1—10.
30. Becker P. e. a. // Meas. Sci. Technol. 2009. V. 20, 092002.
31. Mana G., Massa E., Valkiers S. // Int. J. Mass Spectrom. 2010. V. 289. P. 6—10.
32. Leonard B. P. // Metrologia. 2010. V. 47. P. L5—L8.
33. Milton M. J. T., Mills I. M. // Metrologia. 2009. V. 46. P. 332—338.
34. Cabiati F., Bich W. // Metrologia. 2009. V. 46. P. 457—466.
35. BIPM 2010 CCM Report of the 12th Meeting (2010) to the CIPM. Recommendation G1 (2010), <http://www.bipm.org>
36. Glaser M. e. a. // Metrologia. 2010. V. 47. P. 419—428.

Дата принятия 20.09.2010 г.

53.081:53.083

Современное состояние работ по переопределению единицы термодинамической температуры

М. И. КАЛИНИН

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы,
Москва, Россия, e-mail: kalinin@vniims.ru

Проанализировано современное состояние экспериментальных работ по переопределению единицы термодинамической температуры — кельвина. Рассмотрены данные об основных экспериментальных установках по определению постоянной Больцмана. Сделан вывод об отсутствии в настоящий момент предпосылок для перехода к новому определению кельвина на 24-й Генеральной Конференции по мерам и весам в 2011 г.

Ключевые слова: кельвин, постоянная Больцмана, тройная точка воды, газовая термометрия, относительная стандартная неопределенность.

The modern state of experimental investigations on redefinition of the thermodynamic temperature unit — kelvin is analyzed. The latest data on principal experimental devices for determination of the Boltzmann constant are considered. It is concluded that by now prerequisites for a transition to a new definition of the kelvin at the 24th General conference on weights and measures in 2011 have not yet been created.

Key words: kelvin, Boltzmann constant, triple point of water, gas thermometry, relative standard uncertainty.

На 94-м заседании Международного Комитета мер и весов (МКМВ) в октябре 2005 г. была принята Рекомендация 1 (CI-2005) о подготовительных мерах к введению новых определений килограмма, ампера, кельвина и моля в терминах фундаментальных констант. В этой рекомендации были одобрены в принципе предложения Консультативных комитетов по массе, электричеству и магнетизму, количеству вещества, термометрии, единицам о возможности новых определений четырех указанных основных единиц Международной систе-

мы (СИ) на основе фиксации точных значений некоторых фундаментальных физических констант. МКМВ рекомендовал национальным метрологическим лабораториям продолжить и активизировать работы по получению наиболее точных значений фундаментальных констант, необходимых для планируемых переопределений.

Достаточно быстро стали появляться публикации с предложениями возможных новых определений [1, 2]. Единицу термодинамической температуры СИ — кельвин (K) — пред-

лагалось переопределить на основе фиксации значения постоянной Больцмана k_B как точной величины, заданной без неопределенности [2, 3]. Принципиально такое предложение является естественным, поскольку соответствует физической сущности понятия температуры [3, 4] и может быть согласовано с нынешним определением кельвина: 1 К равен $1/273,16$ части температуры тройной точки воды [5] без неопределенности. В настоящее время значение постоянной Больцмана принято $k_B = 1,3806504 \cdot 10^{-23}$ Дж/К с относительной стандартной неопределенностью $1,7 \cdot 10^{-6}$. Считается [2], что для принятия нового определения кельвина необходимо измерить k_B с относительной стандартной неопределенностью $1 \cdot 10^{-6}$. Зафиксировав полученное с такой неопределенностью значение k_B в качестве точного, будем иметь температуру тройной точки воды, равную тем же 273,16 К, но уже с неопределенностью $1 \cdot 10^{-6}$. При этом температуры реперных точек Международной шкалы температур МТШ-90 и их неопределенности должны остаться неизменными.

В [6, 7] показано, что в рамках статистической механики принципиально возможно точно определить значение постоянной Больцмана на основе микроскопических характеристик молекулярной системы (воды). Теоретический расчет характеристик тройной точки воды методами статистической механики был бы прямым методом нахождения постоянной Больцмана в соответствии с ее определением. Однако методы расчета характеристик критических явлений с необходимой метрологической точностью пока не разработаны. Постоянную Больцмана в настоящее время определяют в основном экспериментально с помощью различных газовых термометров.

Основные принципы экспериментального определения постоянной Больцмана. Измерение постоянной Больцмана базируется на зависимости тех или иных макроскопических свойств различных физических систем от температуры, т. е. на известном из какой-либо надежной теории уравнении состояния. Измерив выбранные физические величины, можно по их уравнению состояния определить значение температуры в энергетических единицах $\theta = k_B T$. Именно таким образом термодинамическая температура T входит во все уравнения состояния [4]. Выполнив соответствующие измерения для системы, находящейся в равновесном состоянии, соответствующем тройной точке воды, можно определить $\theta_{\text{ТТВ}}$. Используя принятое в настоящее время значение термодинамической температуры $T_{\text{ТТВ}} = 273,16$ К, уже можно получить значение постоянной Больцмана из выражения $k_B = \theta_{\text{ТТВ}} / T_{\text{ТТВ}}$.

Существует несколько основных методик экспериментального определения постоянной Больцмана, обусловленных измеряемой физической величиной [8].

1. *Газовая термометрия при постоянном давлении или объеме* основана на уравнении состояния, связывающем давление, температуру и объем газа в равновесном состоянии. Используют вириальное разложение давления по степеням плотности газа, в котором оставляют только члены до второго порядка по плотности [8, 9]:

$$pV = NRT [1 + B(k_B T) N/V + C(k_B T) (N/V)^2 + \dots],$$

где p — давление газа; V — объем; N — количество газа в молях; $R = k_B N_A$ — универсальная газовая постоянная; N_A — число Авогадро; $B(k_B T)$, $C(k_B T)$ — вириальные коэффици-

енты, которые находят из теоретических расчетов методами статистической механики, они зависят от микроскопических молекулярных характеристик газа и температуры $\theta = k_B T$.

Измерив давление и объем, из уравнения состояния можно получить величину θ . Если эксперимент проводится при температуре тройной точки воды, то отсюда можно определить значение постоянной Больцмана. Применяют оба типа газовых термометров: постоянного давления и постоянного объема.

2. *Акустическая газовая термометрия.* Здесь используют уравнение состояния, связывающее скорость с распространения звука в газе с его температурой и давлением. Это уравнение состояния также представляет собой вириальное разложение скорости звука по степеням давления

$$c^2 = A_0(k_B T) + A_1(k_B T) p + A_2(k_B T) p^2 + \dots$$

Акустические вириальные коэффициенты $A_0(k_B T)$, $A_1(k_B T)$, $A_2(k_B T)$ вычисляют через вириальные коэффициенты $B(k_B T)$, $C(k_B T)$ [8, 9]. Измерив скорость распространения звука и давление, находят постоянную Больцмана.

3. *Газовая термометрия, основанная на измерении диэлектрической проницаемости.* Уравнением состояния в этом случае является уравнение Клаузиуса—Моссотти для диэлектрической проницаемости ϵ_r идеального газа

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{\alpha}{V_m},$$

где α — молярная поляризуемость газа; V_m — его молярный объем.

Для точных измерений естественно обобщают это уравнение на реальные газы с помощью того же вириального разложения по степеням плотности $1/V_m$:

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} = \frac{\alpha}{V_m} \left(1 + \frac{b}{V_m} + \frac{c}{V_m^2} + \dots \right),$$

в котором вириальные коэффициенты b , c опять выражаются через $B(k_B T)$, $C(k_B T)$ [8].

Существуют и другие методы первичной термометрии, которые, однако, не обладают необходимой для определения постоянной Больцмана точностью.

Самое точное значение постоянной Больцмана (с относительной стандартной неопределенностью $1,7 \cdot 10^{-6}$) было получено М. В. Молдовером на акустическом газовом термометре со сферическим резонатором еще в 1988 г. [10]. С тех пор многие научные центры работают над усовершенствованием и этого метода, и акустических термометров с цилиндрическим резонатором.

Состояние экспериментальных работ по измерению постоянной Больцмана в основных метрологических центрах мира. Работы по уточнению постоянной Больцмана выполняются непрерывно уже много лет и особенно активизировались с 2005 г., когда была начата подготовка к переопределению четырех основных единиц СИ. Наиболее интенсивно эта деятельность осуществляется такими метрологическими институтами, как NIST (США), NIM (Китай), INRiM (Италия), LNE-CNAM (Франция), PTB (Германия), NPL (Великобритания) и др. Многие организации из разных стран разра-

бывают совместные проекты. Почти ежегодно проводятся международные конференции, посвященные состоянию экспериментальных и теоретических работ в области термометрии и, в частности, определения постоянной Больцмана. Последняя такая конференция «Joint International Symposium on Temperature, Humidity, Moisture and Thermal Measurements in Industry and Science» (TEMPMEKO&ISHM-2010) проходила с 31 мая по 4 июня 2010 г. в Словении. Все основные научные центры, ведущие работы в этой области, представили результаты исследований характеристик экспериментальных установок и предварительных измерений на них.

Изучением характеристик акустического газового термометра с цилиндрическим резонатором занимались NIST совместно с рядом организаций Китая (NIM, Пекинский университет и университет Хеbei). Одним из ключевых параметров является длина резонатора. Для ее измерения разработана специальная процедура, включающая лазерную интерферометрию с разрешением 1 нм [11]. По сравнению со сферическим резонатором добротность Q цилиндрического резонатора гораздо ниже (намного меньше 1000). Низкая добротность связана с тепловыми и вязкостными граничными эффектами в цилиндрах, что приводит к серьезным проблемам при проведении точных измерений акустических резонансных частот. Следствием асимметрии формы резонансной линии, вызванной низкой добротностью, является существенный дрейф резонансной частоты, пропорциональный $1/8Q^2$ [12]. Частотный сдвиг, определяемый данным выражением, приводит к отклонению, меньшему $2 \cdot 10^{-7}$ от подгоночных значений. При низкой добротности необходимо учитывать нелинейные волновые члены. В [12] указано, что после поправок и оптимизации выражений частотный отклик контролируется на уровне менее $1 \cdot 10^{-6}$. Утверждается, что этого вполне достаточно в резонансных частотных измерениях акустическим цилиндрическим резонатором. В [13] утверждается, что на установке с цилиндрическим резонатором фиксированной длины с низкой добротностью удалось достичь неопределенности измерений, сравнимой с неопределенностью, получаемой на установках со сферическим резонатором.

Акустические термометры содержат малые акустические датчики на стенках, ограничивающих заполненную газом камеру, для измерения резонансных частот. При умеренно высокой температуре датчики выделяют газовые примеси, загрязняющие чистый газ, — рабочее вещество в камере резонатора, и изоляторы теряют свои электрические свойства, что ухудшает отношение сигнал—шум. Одним из возможных решений этой технической проблемы могло бы стать удаление датчиков от стенок резонатора и соединение их с распространяющимися в резонаторе волнами с помощью акустических волноводов. При таком решении необходимо определить возмущения резонансных частот, вносимые указанными волноводами. В [14] теоретически и экспериментально исследуются возмущения продольных резонансных мод, порождаемые круглыми волноводами. Сдвиг резонансной частоты и увеличение полуширины резонансной линии были получены как функции радиуса волновода, его длины и расположения датчиков вдоль него. Для волновода диаметром 1,4 мм и длиной 2 м оценивали сдвиг резонансной частоты $\Delta f/f = 0,23 \cdot 10^{-6}$ и увеличение полуширины резонансной линии $\Delta g/f = 40 \cdot 10^{-6}$. Экспериментальные результаты согласуются с теоретическими расчетными данными.

Ряд европейских стран (Италия, Франция, Германия, Дания) также осуществляют совместные проекты в области определения постоянной Больцмана. Объединенный исследовательский проект ЕВРОМЕТ (T1.J1.4) по определению k_B начался в 2007 г. в качестве подготовки к предстоящему переопределению единицы термодинамической температуры. Проект включает три различных измерительных метода: акустической газовой термометрии; термометрии, основанной на измерении диэлектрической постоянной; термометрии на основе доплеровского уширения.

Исследование характеристик установки со сферическим (квазисферическим) акустическим резонатором проводится в INRiM (Италия) [15,16]. Усовершенствуются методы микроволнового определения объема резонатора. Изучается роль возмущающих факторов, вызванных отверстиями в стенках резонатора, волноводами, соединяющими резонатор с акустическими датчиками, взаимодействием газа и оболочки в процессе движения, геометрическими дефектами стенок резонатора. Разрабатываются методы получения и поддержания чистоты одноатомного газа, необходимой в эксперименте. Исследуется влияние возмущений оболочки квазисферического резонатора, применяемого для определения постоянной Больцмана. Предварительные измерения [17] дали значение постоянной Больцмана, согласующееся с современным, принятым в 2006 г. CODATA на уровне $(k_B - k_{2006}) / k_{2006} = (-7,5 \pm 7,5) \cdot 10^{-6}$, что существенно превышает принятую в настоящее время неопределенность k_B , равную $1,6 \cdot 10^{-6}$.

Параллельно с этими работами в рамках совместной деятельности INRiM и PTB изучаются возможности газовой термометрии с использованием измерений диэлектрической проницаемости [18]. Газовый термометр, основанный на измерении диэлектрической постоянной для определения постоянной Больцмана, функционирует в PTB. Главной особенностью данного термометра является обеспечение минимальных нестабильности и неоднородности температуры в ванне термостата меньше 1 мК в большой центральной рабочей зоне диаметром 500 мм и высотой 750 мм для диапазона температур от тройной точки ртути (234,3156 К) до точки плавления галлия (302,9146 К). Для выполнения таких требований необходима большая ванна объемом около 800 л. В центральной области термостата установки удалось обеспечить нестабильность и неоднородность температурного поля, не превышающие 5 мК в течение нескольких дней. При этом внутри термостата отсутствовала измерительная камера. Влияние камеры на указанные выше параметры контролировалось с помощью 12 термометров сопротивления. Утверждается, что в области, где располагается измерительная камера, необходимое качество температурного поля может быть достигнуто.

Специалистами LNE-CNAM, CNRS University (Франция), UniNA2, PoliMI, INRiM (Италия) и DFM (Дания) совместно разрабатывается установка по определению постоянной Больцмана методом доплеровского уширения [19]. Из-за теплового движения молекул газа происходит уширение резонансных молекулярных линий поглощения вследствие эффекта Доплера. Измерение доплеровского уширения молекулярных линий поглощения позволяет определить постоянную Больцмана. Распределение Максвелла—Больцмана молекул по скоростям приводит к уширению линий поглощения, пропорциональному $(k_B T)^{1/2}$. Измерения необходимо выполнять в равновесном газе при температуре тройной точки воды, в

которой и определена современная единица термодинамической температуры. Установка находится в стадии исследования ее характеристик.

В LNE-INM/CNAM занимаются модификацией и усовершенствованием акустического термометра со сферическим резонатором [20], работающим на принципе, который использовал М. В. Молдовер (NIST) в 1988 г. для наиболее точного определения постоянной Больцмана [10]. Исследуют влияние движений оболочки резонатора на параметры акустических резонансов в газообразном гелии, находящемся в сферическом резонаторе [21]. Поскольку стенки резонатора не являются абсолютно жесткими, возникают возмущения области частот акустических резонансов. Эти возмущения детектируются по увеличению полуширины акустической резонансной моды в окрестности частоты «пульсаций». Их необходимо учитывать при измерении постоянной Больцмана. Значение постоянной Больцмана предполагается находить из отношения скорости звука в гелии, измеренной акустическими резонансными методами, к скорости света в нем, полученной с помощью микроволновых резонансных измерений [22].

Эксперименты по измерениям постоянной Больцмана с предполагаемой неопределенностью менее $1 \cdot 10^{-6}$ проводятся в NPL (Великобритания). Установка находится в стадии усовершенствования и определения ее характеристик. Особое внимание уделяется конструированию резонатора и производству необходимой экспериментальной техники, которая позволила бы проводить точные измерения формы и размеров резонатора; определению размеров резонатора тремя методами — с помощью координатно-измерительной машины, пикнометрии на основе воды и микроволновой техники — и обеспечению их согласования; обеспечению необходимых значений чистоты и изотопного состава используемого газа [23].

Заключение. В настоящее время в мире активно выполняются экспериментальные и теоретические исследования с целью подготовки к предполагаемому переопределению кельвина. Анализ последних результатов работ показывает, что наиболее точным экспериментальным методом сейчас является акустическая газовая термометрия. Газовые термометры постоянного давления и постоянного объема для определения константы Больцмана сейчас практически не используются, так как их точность оказывается меньше, чем у акустических газовых термометров.

Из представленного обзора экспериментальных работ ведущих мировых метрологических лабораторий следует, что исследования находятся в стадии отработки и совершенствования установок и проведения первичных измерений постоянной Больцмана, о чем докладывалось на конференции TEMPMEKO&ISHM-2010. Вероятно, до конца 2010 г. или в 2011 г. могут появиться подробные публикации результатов, полученных на этих установках. Один из предварительных результатов уже опубликован [17]. Пока не удалось довести относительную стандартную неопределенность измерения постоянной Больцмана до необходимого значения.

Для принятия нового определения кельвина в 2011 г. требуется до конца 2010 г. получить значение постоянной Больцмана со стандартной относительной неопределенностью не больше $1 \cdot 10^{-6}$. По-видимому, этого сделать уже не удастся, поскольку после обнародования результатов необходимо еще некоторое время на их обсуждение и одобрение международными физическим и метрологическим со-

обществами. Это означает, что к 2011 г. не созданы необходимые предпосылки для переопределения единицы термодинамической температуры на основе фиксации точного значения постоянной Больцмана на 24-й Генеральной Конференции по мерам и весам и следует продолжать теоретические и экспериментальные работы по уточнению значения данной константы.

Экспериментальная установка для уточнения k_B представляет собой первичный (в основном газовый какого-либо типа) термометр высокой точности. После введения нового определения кельвина она должна стать одним из основных элементов нового эталона единицы термодинамической температуры. Поэтому создание такой установки и проведение на ней измерений — необходимое условие для последующей реализации новой единицы термодинамической температуры с требуемой точностью и разработки первичного эталона единицы температуры, соответствующего международным нормам.

Л и т е р а т у р а

1. **Mills I. M. e. a.** Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come // *Metrologia*. 2005. V. 42. P. 71—80.
2. **Mills I. M. e. a.** Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005) // *Metrologia*. 2006. V. 43. P. 227—246.
3. **Fischer J. e. a.** Preparative steps towards the new definition of the Kelvin in terms of the Boltzmann constant // *Int. J. Thermophys.* 2007. V. 28. P. 1753—1765.
4. **Калинин М. И., Кононогов С. А.** Постоянная Больцмана, энергетический смысл температуры и термодинамическая необратимость // *Измерительная техника*. 2005. № 7. С. 5—8; **Kalinin M. I., Kononogov S. A.** Boltzmann's constant, the energy meaning of temperature, and thermodynamic irreversibility fundamental problems in metrology // *Measurement Techniques*. 2005. V. 48. N 7. P. 632—635.
5. **The International System of Units (SI).** SI Brochure. 8th ed. — BIPM, 2006 [Электрон. ресурс]. <http://www.bipm.org> (дата обращения: 25.08.2010).
6. **Кононогов С. А.** Метрология и фундаментальные физические константы. М: Стандартинформ, 2008.
7. **Калинин М. И., Кононогов С. А.** Переопределение единицы термодинамической температуры в Международной системе единиц (СИ) // *Теплофизика высоких температур*. 2010. Т. 48. С. 26—31; **Kalinin M. I., Kononogov S. A.** Redefinition of the Unit of Thermodynamic Temperature in the SI System // *High Temperature*. 2010. V. 48. P. 23—28.
8. **Куинн Т.** Температура. М.: Мир, 1985.
9. **Мейсон Э., Сперлинг Т.** Виримальное уравнение состояния. М.: Мир, 1972.
10. **Moldover M. R. e. a.** Measurement of the universal gas constant R using a spherical acoustic resonator // *Phys. Rev. Lett.* 1988. V. 60. P. 249—252.
11. **Sun J. P. e. a.** The length determination of a fixed pasth cylindrical resonator with the Dual Wavelength laser interference method // *Abstr. ConfTEMPMEKO&ISHM-2010* [Электрон. ресурс]. <http://www.tempmeko-ishm.org/program.html> (дата обращения: 25.08.2010).
12. **Feng X. J. e. a.** Asymmetry and background contributions in frequency response of acoustic modes with low quality factors // *Ibid.*

13. Zhang J. T. e. a. Redefinition of the Boltzmann Constant with fixed-length cylinder // Ibid.

14. Lin H. e. a. Perturbation Measurement of Waveguide for the acoustic Thermometry // Ibid.

15. Gaviolo R. M. e. a. Acoustic determination of Boltzmann constant with quasispherical resonator. // Ibid.

16. Gaviolo R. M. e. a. Shell perturbations of an acoustic thermometer determined from speed of sound in gas mixtures. // Ibid.

17. Gaviolo R. M. e. a. A determination of the Boltzmann constant from speed of sound measurements in helium at a single thermodynamic state // Metrologia. 2010. V. 47. P. 387—409.

18. Zandt T. e. a. Capabilities for dielectric-constant gas thermometry in a special large-volume liquid-bath thermostat // Abstr. conf. TEMPMEKO&ISHM-2010 [Электрон. ресурс]. <http://www.tempmeko-ishm.org/program.html> (дата обращения: 25.08.2010).

19. Briadeau S. e. a. The European experiments on the Doppler broadening method for the Boltzmann constant determination // Ibid.

20. Pitre L. e. a. Acoustic determination of the Boltzmann constant: progress with a diamond turned quasispherical resonator in helium // Ibid.

21. Truong D. e. a. Measuring shell resonances of spherical acoustic resonators // Ibid.

22. Pitre L. e. a. An acoustic/microwave determination of the Boltzmann constant at LNE-INM/CNAM with a quasi triaxial ellipsoid of 0,5 litre // Ibid.

23. Podesta de M. e. a. Assessment of uncertainty in the determination of the Boltzmann constant by an acoustic technique // Ibid.

Дата принятия 20.09.2010 г.

620.1.08(017)

Прослеживаемость результатов измерений в нанометровом диапазоне к единицам Международной системы единиц физических величин

С. С. ГОЛУБЕВ, С. Н. ГОЛУБЕВ

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы,
Москва, Россия, e-mail: sergolubev@mail.ru

Рассмотрены вопросы обеспечения прослеживаемости результатов измерений в нанометровом диапазоне к эталонам, включенным в базу СМС МБМВ: измерения геометрических размеров, для которых предложен набор калибровочных (поверочных) мер, и цепочка прослеживаемости к эталону — метрологическому атомно-силовому микроскопу; два метода калибровки сканирующих зондовых микроскопов — прямой и с использованием фурье-образа топограммы меры; методика калибровки растровых электронных микроскопов; бюджет неопределенности и формулы для расчета его составляющих при калибровке по рельефной мере нанометрового диапазона TGQ1.

Ключевые слова: сканирующая микроскопия, меры, нанометровый диапазон, прослеживаемость, калибровка, поверка.

The problem of measurement traceability to standards included in BIPM CMC base assurance in nanometer range is considered with other important topics: geometric measurements with the measures for calibration (verification) and the traceability chain to etalon — metrological AFM; two methods for calibration of SPM — direct calibration and calibration with the Fourier transform of measure topogram; guideline for SEM calibration; uncertainty budget and formulas for its components calculation at calibrating by relief measure of nanometer range TGQ1.

Key words: scanning microscopy, measures, nanometer range, traceability, calibration, verification.

Измерения в нанометровом диапазоне подразделяются на несколько видов. В первую очередь, к ним относятся измерения геометрических размеров [1—3]. Основными средствами измерений (СИ) геометрических размеров объектов в нанометровом диапазоне принято считать электронные и зондовые микроскопы. Под электронными микроскопами в контексте измерений обычно подразумевают сканирующие (СЭМ), или растровые (РЭМ) электронные микроскопы. Эти два понятия используют как синонимы [4]. Просвечивающие электронные микроскопы как СИ в настоящее время не применяют, так как в высшей степени дискуссионным является вопрос о прослеживаемости количественных результатов, полученных с их помощью, к единицам Международной системы единиц физических величин.

Другой вид измерений в нанометровом диапазоне — измерения структуры и свойств образцов. Причем ключевыми отличительными особенностями этих измерений являются очень жесткие требования по их локальности. Другими словами, измерительная задача — количественное определение состава и структуры на выбранном очень небольшом участке образца (линейным размером менее 1 мкм). Только такие локальные измерения позволяют перейти к специфическим свойствам образцов, определяющимся их особенностями в нанометровом масштабе.

На практике, как показано в [5], такие измерения могут быть реализованы при помощи дополнительного оснащения современных электронных микроскопов (в частности, приставками EDX). В данной работе предложены объекты,