

***Mise en pratique* for the definition of the kelvin in the SI**

Consultative Committee for Thermometry

Практическая реализация определения кельвина в системе СИ

Консультативный комитет по термометрии

(перевод на русский язык Temperatures.ru)

1. Введение

Целью данного документа «*mise en pratique*», разработанного Консультативным комитетом по термометрии (ККТ) Международного комитета мер и весов (МБМВ), является описание способов практической реализации определения основной единицы СИ, кельвина, символ К.

Как правило, термин «реализация единицы» означает установление значения физической величины и связанной с ней неопределенности в той размерности, которая согласуется с определением единицы. Определение кельвина 2018 года не требует какого-либо конкретного эксперимента для своей практической реализации. В принципе, можно использовать любой метод, позволяющий получить значение температуры, используя набор из семи фундаментальных констант. Таким образом, приведенный ниже список методов не является исчерпывающим, а скорее является перечислением тех методов, которые легче всего реализовать и/или которые обеспечивают наименьшие неопределенности и которые официально признаны основными методами Консультативным комитетом.

Первичный метод – это метод, имеющий наивысшие метрологические характеристики, полностью описанный и изученный, для которого можно провести полный расчет неопределенности в единицах СИ и для реализации которого не требуется стандартный образец той же физической величины.

До недавнего времени справочное руководство по реализации кельвина составляли следующие документы: текст Международной температурной шкалы и Дополнительная информация по шкале. Однако недавние исследования в области термометрии и переход на новое определение кельвина привели к созданию более обширного и гибкого документа, который описывает температурные шкалы, используемые в настоящее время, и методы первичной термометрии – *Mise en Pratique* для реализации кельвина (*MeP-K*).

Как предусмотрено ККТ [Рекомендация ТЗ (2005)] и в соответствии с решением 97-го заседания МКМВ в 2008 г., документ *МеР-К* должен содержать информацию (или ссылаться на информацию), необходимую для выполнения практических измерений температуры, в соответствии с Международной системой единиц (СИ) на высочайшем уровне точности. Документ *МеР-К* был впервые принят ККТ в апреле 2006 г. (см. отчет 24-го заседания ККТ). Представленная здесь версия *Mise en Pratique* от 2019 г. (*МеР-К-19*) включает новое определение кельвина, принятое на 26-м заседании Генеральной конференции по мерам и весам (ГКМВ) и описывает практическую реализацию этого нового определения, вступившего в силу 20 мая 2019 г.

2. Определение кельвина

Определение кельвина, основной единицы температуры в системе СИ, звучит следующим образом [1]:

Кельвин, символ К, является единицей термодинамической температуры в системе СИ. Он определяется путем установления фиксированного числового значения постоянной Больцмана k равным $1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ в единицах Дж К⁻¹, что равно кг м² с⁻² К⁻¹, где килограмм, метр и секунда определяются через h , c и $\Delta\nu_{Cs}$.

(h - постоянная Планка, c - скорость света в вакууме, $\Delta\nu_{Cs}$ - частота, соответствующая переходу между двумя сверхтонкими уровнями невозмущенного основного состояния атома цезия ¹³³Cs.) Из этого определения следует, что постоянная Больцмана k имеет точное значение $k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ Дж/К. Физический смысл определения состоит в том, что один кельвин равен изменению термодинамической температуры T , которое приводит к изменению тепловой энергии kT на $1,380\,649 \cdot 10^{-23}$ Дж.

До 2018 года кельвин определялся как 1/273,16 часть термодинамической температуры тройной точки воды T_{TPW} [13-е заседание ГКМВ в 1967 году, Резолюции 3 и 4]. В настоящее время кельвин фактически определяется через производную единицу системы СИ – джоуль путем фиксации значения постоянной Больцмана k , которая представляет собой коэффициент пропорциональности между термодинамической температурой и связанной с ней тепловой энергией kT . Новое определение берет свое начало из статистической механики, где термодинамическая температура – это мера средней тепловой энергии, приходящейся на степень свободы в системе. В принципе, естественной единицей термодинамической температуры является джоуль, и отдельная единица для температуры не требуется. Однако по историческим и, в большей степени, практическим причинам кельвин остается основной единицей СИ.

На практике также используется температура по шкале Цельсия, обозначаемая символом t и равная разности $T - 273,15$ К. Единицей измерения температуры Цельсия является градус Цельсия, символ °С, который по определению равен кельвину.

Значение постоянной k , принятое для нового определения, является значением из сборника констант CODATA 2017 года [2]. Это гарантирует, что значение температуры тройной точки воды T_{TPW} остается прежним - 273,16 К. Одним из следствий определения кельвина 2018 года является то, что ранее существовавшая относительная неопределенность определения постоянной Больцмана k , равная $3,7 \times 10^{-7}$, теперь переносится на температуру тройной точки воды T_{TPW} . Стандартная неопределенность температуры T_{TPW} теперь равна $u(T_{TPW}) = 0,1$ мК.

ККТ в настоящее время не известен какой-либо метод термометрии, который обеспечивает значительное уменьшение значения $u(T_{\text{TPW}})$. Следовательно, маловероятно, что значение температуры T_{TPW} будет изменено в обозримом будущем. С другой стороны, воспроизводимость температуры тройной точки воды T_{TPW} , реализованной в ячейках тройной точки воды с применением изотопных поправок, сейчас лучше 50 мкК. Эксперименты, требующие максимальной точности вблизи T_{TPW} , будут по-прежнему основаны на высокой воспроизводимости тройной точки воды. Не смотря на то, что значение температуры T_{TPW} не является фундаментальной константой, тройная точка воды по-прежнему является природным инвариантом с присущей долговременной стабильностью фундаментальных констант.

Для прямых измерений термодинамической температуры требуется первичный термометр, основанный на хорошо изученной физической системе, температура которой может быть получена из измерений других величин, как это описано в следующих разделах. К сожалению, первичная термометрия обычно сложный и трудоемкий процесс, поэтому редко используется в качестве практического средства измерения кельвина. В качестве альтернативы используются Международные температурные шкалы, которые устанавливают международно-признанные процедуры для определения и передачи единицы температуры простым и хорошо воспроизводимым способом (см. Раздел 5).

3. Определения (систематизация методов)

Цель этого раздела - объяснить термины, которые будут использоваться в следующих разделах, посвященных 1) первичной термометрии и 2) практическим температурным шкалам. Ясные и четкие определения необходимы для однозначной систематизации методов в *MeP-K*.

MeP-K использует следующие определения.

1) *Первичная термометрия* реализуется с использованием термометра, выполненного на основе хорошо изученной физической системы, для которой можно получить уравнение состояния, такое, например, как закон идеального газа или уравнение Планка, описывающее связь между термодинамической температурой T и другими независимыми величинами без включения неизвестных или существенно зависящих от температуры констант. Таким образом, термодинамическая температура может быть получена путем измерения независимых величин. Точные термодинамические значения температуры требуют не только точных измерений независимых величин, но также достаточно полного понимания функционирования системы, для того, чтобы иметь возможность провести количественную оценку отклонений от идеальной модели с целью введения соответствующих поправок.

Абсолютная первичная термометрия позволяет измерять термодинамическую температуру непосредственно на основе определения базовой единицы кельвина, то есть определения числового значения постоянной Больцмана. Никаких ссылок на какую-либо фиксированную точку температуры ($n = 0$, $n =$ количество точек) не должно быть, а все другие параметры, указанные в уравнении состояния, измеряются или определяются иным, не зависящим от температуры способом.

Относительная первичная термометрия позволяет измерять термодинамическую температуру косвенно, используя заданное уравнение состояния с одним или несколькими ключевыми параметрами, значения которых определены в фиксированных температурных точках ($n > 0$). Значения термодинамической температуры T данных точек и их неопределенности известны *априори* из предыдущей абсолютной или относительной первичной термометрии. Таблицы, содержащие данные для температуры T реперных

точек, приведены в приложениях к *MeP-K* “Относительная первичная радиометрия”, (п. 4.2.3), и “ Оценка расхождения $T-T_{90}$ ”, (п 5.1).

2) *Практические температурные шкалы* приписывают значения температуры, определенные первичной термометрией, ряду естественных и хорошо воспроизводимых состояний (например, точки затвердевания и тройные точки чистых веществ). Они также задают типы интерполяционных приборов в определенных поддиапазонах температуры и необходимые уравнения интерполяции или экстраполяции. Практические шкалы построены по строгой предписывающей методике и определяют новые величины температуры T_{XX} (температуры шкалы), которые обеспечивают близкое приближение к термодинамической температуре T и имеют ту же единицу измерения, что и T , то есть кельвин. Значения температуры, присвоенные реперным точкам каждой шкалы, считаются точными и не изменяются пока шкала действует, даже если последующие исследования обнаруживают смещение значений относительно истинной термодинамической температуры. В настоящее время единственными практическими шкалами температур, рекомендованными ККТ и утвержденными МКМВ, являются Международная шкала температур 1990 г. (МТШ-90) [3] от 0,65 К и выше, а также Временная низкотемпературная шкала [4], охватывающая диапазон температур от 0,9 мК до 1 К (ВНТШ-2000). Температуры, определенные МТШ-90 и ВНТШ-2000, обозначаются T_{90} и T_{2000} соответственно. Рекомендации по реализации МТШ-90 и ВНТШ-2000 приведены в документах «Руководство по реализации МТШ-90» и «Руководство по реализации ВНТШ-2000».

Существуют также методы реализации практических шкал, являющиеся приближениями точной реализации, т.е. использующие реперные точки, инструменты, интерполяционные или экстраполяционные уравнения, отличающиеся от указанных в определении шкалы. Такие методы и их отличие от шкалы достаточно хорошо изучены и описаны в «Руководстве по вторичной термометрии».

4. Практическая реализация кельвина методами первичной термометрии

Определение кельвина в терминах постоянной Больцмана, принятое в 2019 году, не влияет на статус шкал МТШ-90 и ВНТШ-2000. Однако это определение дает значительное преимущество для измерения термодинамической температуры ниже -20 К и выше 1300 К, где первичные термометры могут иметь меньшую погрешность, чем у МТШ-90 и ВНТШ-2000. В будущем, по мере развития первичных методов и, как ожидается, снижения неопределенностей, первичные термометры станут более широко использоваться и постепенно вытеснят МТШ-90 и ВНТШ-2000, как основные методы.

Методы первичной термометрии, включенные в этот раздел, соответствуют следующим критериям:

1. По крайней мере, один пример полного бюджета неопределенности был изучен и одобрен ККТ.
2. Неопределенность реализации кельвина не более чем на один порядок больше, чем неопределенность, достигаемая в настоящее время с помощью первичной термометрии или с помощью практической температурной шкалы или чем неопределенность, соответствующая современным потребностям.
3. Существуют как минимум две независимые реализации, применяющие метод с необходимой неопределенностью.
4. Проведено сравнение реализаций с результатами уже используемых методов.
5. Методы применимы в диапазонах температур, приемлемых для пользователей в метрологии, науке или промышленности.

6. Экспериментальные методы документированы достаточно подробно в открытой литературе для того, чтобы метрологи могли реализовать методы самостоятельно.

4.1 Измерение термодинамической температуры с помощью акустической газовой термометрии

4.1.1 Принцип первичной акустической газовой термометрии

Первичная акустическая газовая термометрия (АГТ) использует соотношение между скоростью звука u в идеальном газе и термодинамической температурой T газа,

$$u^2 = \frac{\gamma k T}{m}, \quad (1)$$

где k - постоянная Больцмана, m - средняя молекулярная масса газа, γ - отношение теплоемкости газа при постоянном давлении к его теплоемкости при постоянном объеме. Для идеального одноатомного газа $\gamma = 5/3$.

4.1.2 Абсолютная первичная акустическая газовая термометрия

Скорость звука выводится из резонансных частот одноатомного газа, содержащегося в изотермической полости. Для точного определения резонансных частот необходимо использовать невырожденные акустические моды, и часто для этой цели используются невырожденные моды радиально-симметричных сферических полостей. Средний радиус резонатора часто определяют с помощью микроволновых резонансов. Неидеальные свойства реальных газов компенсируются посредством усложнения соотношения для скорости звука и экстраполяции его к нулевому давлению. Измерения частот акустического резонанса, давления, размеров полости и молекулярной массы газа должны метрологически прослеживаться к метру, килограмму и секунде. Первичный АГТ был реализован при температуре тройной точки воды с относительными неопределенностями порядка 10^{-6} . Однако низкая неопределенность, заявленная для АГТ, еще не подтверждена независимыми измерениями. Подробности можно найти в обзорной статье «Акустическая газовая термометрия» Moldover et al. [5] и ссылках в ней.

4.1.3 Относительная первичная акустическая газовая термометрия

Относительная АГТ основана на определении отношений термодинамических температур из отношений скоростей звука. Обычно результат измерения получают относительно реперной точки, для которой уже известна термодинамическая температура. Измеренное отношение температур обычно выражаются в виде измеренных отношений длин и частот звука. Метод относительной АГТ был реализован в широком диапазоне температур от нескольких кельвинов до 550 К. Независимые реализации относительной АГТ обычно совпадают в пределах $3 \times 10^{-6} T$ в диапазоне от 234 К до 380 К.

Таблица, содержащая данные для термодинамической температуры T реперных точек, приведена в приложении. «Оценка расхождения $T-T_{90}$ » см. Раздел 5.1.

4.2 Спектральная радиометрия (1235 К и выше)

4.2.1 Принцип первичной радиометрии

Основным уравнением для спектральной радиометрии является закон Планка, который выражает спектральную яркость $L_{b,\lambda}$ идеального абсолютно черного тела как функцию температуры, T

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

где k - постоянная Больцмана, h - постоянная Планка, c - скорость света в вакууме, λ - длина волны в вакууме. Спектральная яркость - это мощность излучения, которая приходится на единицу площади, на единицу телесного угла, на единицу длины волны и выражается в единицах $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \text{ср}^{-1} \text{нм}^{-1}$.

4.2.2 Абсолютная первичная радиометрия

Абсолютная первичная радиометрия требует точного определения оптической мощности, излучаемой в известной спектральной полосе и известном телесном угле изотермической полостью с известной излучательной способностью. Для измерения мощности необходим радиометр, состоящий из детектора и спектрального фильтра с известной абсолютной спектральной чувствительностью. Оптическая система обычно включает два совмещенных друг с другом круглых отверстия, разделенных заданным расстоянием, определяющим телесный угол, и может дополнительно включать линзы или зеркала. Также должен быть известен показатель преломления среды, в которой производится измерение. Все измерения задействованных величин должны прослеживаться до соответствующих единиц СИ, в частности, ватта и метра.

Возможные неопределенности первичной радиометрии около 0,1 К ($k = 1$) при 2800 К. Практические рекомендации по реализации, включая оценки неопределенности, можно найти в приложении «Абсолютная первичная радиометрическая термометрия» и ссылках в нем. Методы, используемые для оценивания неопределенности термодинамической температуры, измеренной с помощью абсолютной первичной радиометрической термометрии, описаны в приложении «Оценка неопределенности при первичном радиометрическом измерении температуры» и ссылках в нем.

4.2.3 Относительная первичная радиометрия

Для относительной первичной радиометрии не требуется ни абсолютная спектральная чувствительность радиометра, ни количественная оценка геометрических факторов, определяющих телесный угол. Вместо этого мощность излучения измеряется относительно мощности, измеренной для одного или нескольких реперных черных тел, каждое с известной термодинамической температурой. Существует три общепризнанных подхода к относительной первичной термометрии:

- экстраполяция от одной реперной точки, которая требует только знания относительной спектральной чувствительности детектора и фильтра;
- интерполяция или экстраполяция от двух реперных точек, которая требует только знания ширины полосы чувствительности;
- интерполяция или экстраполяция от трех или более реперных точек, которая не требует детального измерения чувствительности.

Интерполяция и экстраполяция значительно упрощаются с использованием хорошо изученной параметрической аппроксимации интегрального выражения для оптической мощности (например, с помощью формы Планка уравнения Сакумы – Хаттори), что

устраняет необходимость итеративно решать интегральное уравнение, описывающее измеренную оптическую мощность.

Относительная первичная радиометрия дает неопределенности, которые лишь немного выше, чем абсолютная первичная радиометрия. Рекомендации по её реализации, включая типовые оценки неопределенности, можно найти в приложении «Относительная первичная радиометрия» и ссылках в нем.

4.3 Измерение термодинамической температуры с помощью поляризационной газовой термометрии

4.3.1 Принцип поляризационной газовой термометрии

Термометрия поляризованного газа (ТПГ) основана на измерении плотности газа на основе измерения его электромагнитных свойств. Основные рабочие уравнения - это уравнения Клаузиуса-Моссотти и Лоренца-Лоренца, которые были получены независимо. Уравнение Клаузиус-Моссотти связывает поведение газа в электрическом поле с диэлектрической постоянной (диэлектрической проницаемостью) ε_r . Для идеального газа его комбинация с уравнением состояния дает строгое соотношение между ε_r и давлением газа p :

$$\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2} = \frac{A_\varepsilon p}{RT}, \quad (3)$$

где A_ε - молярная электрическая поляризуемость. Уравнение Лоренца-Лоренца описывает распространение электромагнитных волн по показателю преломления n . Его сочетание с уравнением состояния идеального газа можно аппроксимировать с относительной погрешностью менее 1ppm при плотности газа до 0,1 моль/см³ с получением строгого соотношения между n и p :

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{(A_\varepsilon + A_\mu)p}{RT}, \quad (4)$$

где A_μ - молярная магнитная поляризуемость.

Эти два соотношения тесно связаны, поскольку $n^2 = \varepsilon_r \mu_r$ где μ_r - относительная магнитная проницаемость. При ненулевых плотностях газа свойства реальных газов отклоняются от идеальных уравнений, приведенных выше, поэтому для уравнения Клаузиуса-Моссотти, уравнения Лоренца-Лоренца и уравнения состояния используются разложения в степенной ряд с различными вириальными коэффициентами. Однако для первичной термометрии свойства идеального газа могут быть определены путем экстраполяции к нулевой плотности.

Каждая из приведенных выше двух функций является физической основой определенного типа ТПГ. Термометрия на основе диэлектрической постоянной газа (ДПГТ) определяет ε_r путем изменения емкости конденсатора в измерительном газе. Газовая термометрия на основе показателя преломления (ППГТ) определяет резонансы электромагнитных волн в объемном резонаторе. При реализации ДПГТ и ППГТ возникает ряд общих проблем. Поляризуемость должна быть известна из предварительных расчетов. При неопределенностях менее 1 ppm это требование в настоящее время выполняется только

для гелия, который имеет малые поляризуемости порядка $A_\epsilon \cong 0,52 \text{ см}^3/\text{моль}$ и $A_\mu \cong 0,0000079 \text{ см}^3/\text{моль}$. ДПГТ и ППГТ имеют также общую потребность в точном измерении давления с привязкой к основным единицам СИ: метру, килограмму и секунде.

4.3.2 Термометрия на основе диэлектрической постоянной газа

Диэлектрическая постоянная определяется по изменению емкости $C(p)$ конденсатора в камере с газом и без него. Этот метод идеально работает только для независимой от давления конфигурации конденсатора. На практике изменение геометрии электродов конденсатора при изменении давления неизбежны и должны быть приняты во внимание. Для высокостабильного конденсатора метод приводит к линейному экспериментальному уравнению для определения ϵ_r

$$\epsilon_r = \frac{C(p)}{C(0)(1 + k_{\text{eff}} p)}, \quad (5)$$

где k_{eff} - отрицательная эффективная изотермическая сжимаемость, $C(0)$ - ёмкость откачанного конденсатора. Из-за малого значения A_ϵ гелия изменения емкости должны измеряться с помощью высокоточного моста отношения, сопоставимого по качеству с эталонным мостом, применяемым для реализации и передачи единицы ёмкости.

Для вывода полного рабочего уравнения ДПГТ необходимо комбинировать экспериментальное уравнение для ϵ_r и соотношение между ϵ_r и p . Применяя полное рабочее уравнение, измеряют изотермы $C(p)$ в зависимости от p при постоянной температуре и затем получают результаты ДПГТ в предельном случае идеального газа путем экстраполяции. В этом предельном случае значения вириальных коэффициентов не нужны и, таким образом, могут быть получены значения термодинамической температуры T .

Помимо предварительной оценки поляризуемости измеряемого газа и прослеживаемых к эталону измерений давления, как упоминалось выше, абсолютный первичный ДПГТ требует расчета эффективной сжимаемости измерительного конденсатора, зависящей от индивидуальных упругих постоянных его конструктивных материалов. Прослеживаемость до единицы ёмкости не требуется, потому что необходимы только соотношения ёмкостей. Первичная ДПГТ была проведена в тройной точке воды с относительной неопределенностью порядка 1 ppm. Относительная неопределенность результатов первичного ДПГТ в низкотемпературном диапазоне уменьшается от примерно 40 ppm при 2,5 К до примерно 10 ppm при 100 К. Все результаты подтверждены независимыми термодинамическими измерениями в пределах заявленной неопределенности. Подробности можно найти в обзорной статье «Газовая термометрия на основе диэлектрической проницаемости» Gaiser et al. [6] и ссылках в ней.

Требование к измерению давления с минимальной неопределенностью и прослеживаемостью до эталона может быть ослаблено за счет проведение относительной первичной ДПГТ. Например, измерения на изобарах требуют только стабилизации p с помощью некалиброванного баланса давления. Однако из-за сложной температурной зависимости упругих постоянных конструкционных материалов, влияющей на k_{eff} конденсатора, простых измерений отношения недостаточно.

4.3.3 Газовая термометрия на основе показателя преломления (ППГТ)

В случае абсолютной первичной микроволновой ППГТ показатель преломления определяется посредством измерения частот микроволнового резонанса $f_m(p)$ изотермической полости, заполненной газом (индекс « m » указывает конкретную микроволновую моду.) Обычно используются квазисферические или цилиндрические формы резонатора, причем размеры полости при рабочем давлении газа рассчитываются с учетом положительной изотермической эффективной сжимаемости k_{eff} корпуса резонатора на основе резонансных измерений, выполненных в вакууме $f_m(0)$ (знак k_{eff} зависит от конструкции резонатора):

$$n^2 = \frac{f_m^2(0)}{f_m^2(p)(1 - \kappa_{\text{eff}} p)^2} \approx \frac{f_m^2(0)}{f_m^2(p)} (1 + 2\kappa_{\text{eff}} p) . \quad (6)$$

Это экспериментальное уравнение для определения n^2 аналогично уравнению ДПГТ для ε_r . Причем влияние отрицательной эффективной сжимаемости k_{eff} вдвое больше. Уравнение содержит отношение частот микроволнового резонанса $f_m(0)/f_m(p)$. Это отношение можно точно измерить, используя часы, которые стабильны в течение интервала, необходимого для проведения термически уравновешенных измерений $f_m(0)$ и $f_m(p)$ (для изотермы обычно это дни или недели).

Для вывода полного рабочего уравнения ППГТ экспериментальное уравнение для n^2 должно применяться в сочетании с соотношением между n^2 и p . Кроме того, для описания свойств реального газа гелия, должны использоваться степенные ряды с различными вириальными коэффициентами, как для уравнения Лоренца-Лоренца, так и для уравнения состояния. Применяя полное рабочее уравнение и измеряя изотермы n^2 в зависимости от p при постоянной температуре, можно с помощью экстраполяции получить результаты ППГТ в предельном состоянии идеального газа. В этом предельном случае значения вириальных коэффициентов не нужны и, таким образом, может быть вычислена термодинамическая температура T .

Помимо предварительной оценки поляризуемости измеряемого газа и прослеживаемых к единице СИ точных измерений давления, как упоминалось выше, абсолютный первичный ППГТ требует расчета эффективной сжимаемости измерительного конденсатора, зависящей от индивидуальных упругих постоянных конструктивных материалов.

Абсолютный первичный термометр ППГТ был реализован с использованием газообразного гелия при температуре тройной точки воды с относительной неопределенностью порядка 10 ppm, а при температурах тройных точек неона, кислорода и аргона с относительной неопределенностью порядка 20 ppm. Все результаты подтверждены независимыми термодинамическими измерениями в пределах оцененной неопределенности. Подробности можно найти в обзорной статье «Газовая термометрия на основе показателя преломления» автора Rourke et al. [7] и ссылок в ней.

Требование к точному измерению давления с отслеживанием к единице СИ может быть ослаблено в случае применения метода относительного ППГТ. Например, измерения на изобарах требуют только, чтобы давление было стабилизировано с помощью баланса, при этом требования к калибровке ниже, чем для абсолютного первичного ППГТ. Однако из-за сложной температурной зависимости упругих постоянных конструктивных материалов, а следовательно k_{eff} конденсатора, простых измерений отношения может быть недостаточно.

4.4 Измерение термодинамической температуры методом шумовой термометрии Джонсона

4.4.1 Принцип первичной шумовой термометрии Джонсона

Первичная шумовая термометрия Джонсона (ДШТ) основана на тепловом возбуждении носителей заряда внутри электрического проводника и его теоретическом описании – теореме флуктуации-диссипации. Спектральная плотность мощности $S_V(f, T)$ шумового напряжения V на комплексном электрическом импедансе $Z(f)$ выражается следующим образом:

$$S_V(f, T) = 4hf \operatorname{Re}(Z(f)) \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{\exp(hf / kT)} \right], \quad (7)$$

где f - частота, T - термодинамическая температура, h - постоянная Планка, k - постоянная Больцмана, а Re означает действительную часть числа. Импеданс может быть, но не обязательно, резистором с сопротивлением $\operatorname{Re}(Z(f)) = R$. Если пренебречь квантовыми поправками при условии $hf \ll kT$, это уравнение дает формулу Найквиста

$$\langle V^2 \rangle = 4kT R \Delta f, \quad (8)$$

где Δf - полоса пропускания, в которой измеряется шумовое напряжение. В самом низком порядке квантовые эффекты вносят относительную поправку, равную $(hf/kT)^2/12$, которая составляет, например, 2×10^{-10} при 1 мК и 1 кГц или менее 2×10^{-9} для температур около 300 К и частот ниже 1 ГГц.

4.4.2 Абсолютная первичная низкотемпературная шумовая термометрия Джонсона (ниже 4 К)

Абсолютная первичная ДШТ при низких температурах требует измерения спектральной плотности мощности на источнике шума с точно известным импедансом $Z(f)$, который обычно зависит от частоты. Источник шума, как правило, изготавливается из металла высокой чистоты, содержащего незначительное количество магнитных примесей для обеспечения независимого от температуры импеданса. При низких температурах шумовые сигналы очень слабые и в большинстве случаев измеряются датчиком на основе устройства сверхпроводящей квантовой интерференции SQUID. В оцениваемой полосе частот электронная передаточная функция всей цепи, включающая источник шума и датчик SQUID, должна быть точно определена. Относительные суммарные стандартные измерения термодинамической температуры с помощью метода абсолютной первичной низкотемпературной шумовой термометрии составили порядка 1×10^{-3} . Подробности в приложении «Низкотемпературная шумовая термометрия Джонсона» и ссылках в нём. См. также Qu et al. [8] и Флауэрс-Джейкобс и др. [9].

4.4.3 Относительная первичная низкотемпературная термометрия шума Джонсона (ниже 4 К)

В относительных первичных низкотемпературных шумовых термометрах отношения температур определяются из отношения измеренной спектральной плотности мощности шума к спектральной плотности мощности шума опорной температурной точке, для

которой известно термодинамическое значение температуры. Неопределенность относительной первичной ДШТ может быть того же уровня или ниже, что и для абсолютного первичного ДШТ, при условии, что неопределенность термодинамической температуры опорной точки достаточно низкая. Подробности см. в приложении «Низкотемпературная шумовая термометрия Джонсона» и ссылках в нем.

4.4.4 Абсолютная первичная шумовая термометрия Джонсона (выше 1 К)

Спектральная плотность мощности шума выводится из измерений среднеквадратического напряжения шума (или шумового тока) в пределах полосы пропускания измерительной системы, а также из измерения сопротивления. Неидеальные свойства переменного тока реальных резисторов и соединительных проводов можно учесть с помощью частотно-зависимой модели и экстраполяции к нулевой частоте.

Измерения напряжения, сопротивления и полосы пропускания должны метрологически проследиваться до единиц СИ - ампера, килограмма и секунды. Абсолютная первичная термометрия ДШТ при температуре тройной точки воды, показала относительные неопределенности порядка 4×10^{-6} . Точные электронные измерения были выполнены путем сравнения мощности теплового шума с мощностью волнового псевдослучайного шума, генерированного с помощью волнового сверхпроводящего джозефсоновского синтезатора. Низкие погрешности, заявленные для ДШТ, были подтверждены независимыми измерениями с использованием абсолютной первичной акустической газовой термометрии. Подробную информацию об абсолютной первичной ДШТ можно найти в приложении «Термометрия первичного шума Джонсона» и ссылках в нем.

4.4.5 Относительная шумовая термометрия Джонсона (выше 1 К)

Относительная первичная ДШТ основана на определении отношения термодинамических температур исходя из измеряемых отношений спектральных плотностей мощности. Обычно температура определяется по отношению к температуре опорной точки, для которой известна термодинамическая температура. Измеренные отношения температур выражаются в терминах измеренных отношений мощности шума и сопротивления. Относительная первичная ДШТ была реализована в широком диапазоне температур до 2500 К. Подробные сведения об относительной первичной ДШТ можно найти в приложении «Первичная термометрия шума Джонсона» и ссылках в нем.

5. Реализация кельвина с применением международных практических температурных шкал

МКМВ (Международный комитет мер и весов) принял несколько международных температурных шкал. Первая шкала была принята в 1927 году Генеральной конференцией по мерам и весам (ГКМВ), а с 1937 года шкалы принимались по рекомендации ККТ. Вслед за шкалой 1927 года в 1948, 1968 и 1990 годах были утверждены новые шкалы и небольшие дополнения к шкалам в периоды между ними. В 2000 году была принята временная низкотемпературная шкала ВНТШ-2000 для температур ниже 1 К.

Следует отметить, что температуры реперных точек, указанные в Международной температурной шкале, являются точными (нет заданной неопределенности) и фиксированными (значение остается неизменным на протяжении всего срока действия шкалы). Как следствие, определение кельвина в терминах постоянной Больцмана не влияет на значения температуры или неопределенности реализации действующих Международных температурных шкал.

Международная температурная шкала 1990 года (МТШ-90), которая действует в диапазоне от 0,65 К и выше, и временная шкала низких температур (ВНТШ-2000), действующая в диапазоне от 0,9 мК до 1 К, по-прежнему будут использоваться в обозримом будущем, что позволит осуществлять точные, хорошо воспроизводимые приближения к термодинамической температуре. В частности, наиболее точные измерения температуры в диапазоне температур примерно от -250°C до 960°C , по крайней мере, на начальном этапе, будут по-прежнему производиться с помощью эталонных платиновых термометров сопротивления, калиброванных в соответствии с МТШ-90.

5.1 Международная температурная шкала 1990 г. (МТШ-90) для температур выше 0,65 К.

МТШ-90 [Рекомендация 5, СІ-1989] является последним вариантом исходной Международной температурной шкалы 1927 года и заменяет Международную практическую температурную шкалу 1968 года (МПТШ-68) и временную шкалу 1976 года от 0,5 К до 30 К (ВТШ-76). МТШ-90 охватывает диапазон температур от 0,65 К до самых высоких температур, которые можно определить практически только радиометрическими методами. Выпущены специальные руководства по реализации МТШ-90 и методам ее аппроксимации.

Помимо текста МТШ-90, обязательным является также Техническое приложение, в котором указывается изотопный состав трех веществ реперных точек - воды, водорода и неона. Данная спецификация не была включена в основное определение шкалы. Изотопный состав воды, указанный в Техническом приложении, был также утвержден на 94-м заседании в 2005 г. как дополнение к прежнему определению единицы температуры кельвина через температуру тройной точки воды. Кроме того, Техническое приложение содержит уравнения, которые могут облегчить корректировку результатов, полученных в реперных точках, имеющих другой изотопный состав.

Расхождения между термодинамической температурой T и температурой T_{90} по шкале МТШ-90, $T-T_{90}$, а также их неопределенности приведены в приложении «Оценка расхождения $T-T_{90}$ » к документу MeP-K. Используя таблицу расхождений, пользователь может легко преобразовать результаты измерения, полученные как T_{90} , в значения термодинамической температуры T и наоборот. Поскольку заданные в МТШ-90 температуры реперных точек не имеют неопределенности, расхождения $T-T_{90}$ позволяют напрямую получить значения термодинамической температуры T для реперных точек и неопределенности этих значений.

5.2 Предварительная низкотемпературная шкала от 0,9 мК до 1 К (ВНТШ-2000)

Для разработки температурной шкалы, охватывающей диапазон температур ниже 0,65 К были проведены обширные исследования. Результатом стала шкала ВНТШ-2000, принятая в 2000 году МКМВ [Рекомендация 1, СІ-2000]. ВНТШ-2000 определяет температуры от 1 К вниз до 0,9 мК. Шкала названа предварительной с учетом того, что данные, составляющие основу шкалы, были несколько неоднозначны ниже 10 мК. В диапазоне температур от 0,65 К до 1 К температуру можно определить либо по МТШ-90, либо по ВНТШ-2000. Любая шкала приемлема, выбор шкалы опирается на удобство или неопределенность реализации. В тех редких случаях, когда пользователю удобно использовать обе шкалы, нужно учитывать, что в перекрывающейся области T_{2000} дает лучшее приближение к термодинамической температуре, чем T_{90} . В отличие от шкалы МТШ-90, для которой Техническое приложение содержит важные требования, в шкале ВНТШ-2000 только сам текст шкалы является обязательным для реализации температур

T₂₀₀₀. Методы, с помощью которых можно успешно реализовать шкалу ВНТШ-2000, описываются в специальном руководстве по реализации шкалы.

Статьи, на которые ссылается документ

- [1] BIPM, The International System of Units (SI Brochure) [9th edition, 2019],
<https://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>
- [2] Newell D B, Cabiati F, Fischer J, Fujii K, Karshenboim S G, Margolis H S, de Mirandes E, Mohr P J, Nez F, Pachucki K, Quinn T J, Taylor B N, Wang M, Wood B M and Zhang Z 2018 The CODATA 2017 Values of h , e , k , and NA for the revision of the SI *Metrologia* **55**, L13-L16
<https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa950a>
- [3] Preston-Thomas H 1990 The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) *Metrologia* **27**, 3-10 (8 pp.)
<https://doi.org/10.1088/0026-1394/27/1/002> and 109 (1 p. - erratum)
- [4] Proces-Verbaux du Comite International des Poids et Mesures, 89th meeting (2000),
<https://www.bipm.org/utis/en/pdf/PLTS-2000.pdf>
- [5] Moldover M, Gavioso R M, Mehl J B, Pitre L, de Podesta M and Zhang J T 2014 Acoustic gas thermometry *Metrologia* **51**, R1-R19 <https://doi.org/10.1088/0026-1394/51/1/R1>
- [6] Gaiser C, Zandt T and Fellmuth B 2015 Dielectric-constant gas thermometry *Metrologia* **52**, S217-S226 <https://doi.org/10.1088/0026-1394/52/5/S217>
- [7] Rourke P M C, Gaiser C, Gao Bo, Ripa D M, Moldover M R, Pitre L and Underwood R J 2019 Refractive-index gas thermometry *Metrologia* **56**, 032001 (13 pp)
<https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab0dbe>
- [8] Qu Jifeng, Benz S P, Coakley K, Rogalla H, Tew W L, White R, Zhou K and Zhou Z 2017 An improved electronic determination of the Boltzmann constant by Johnson noise thermometry *Metrologia* **54**, 549-558 (10 pp) <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa781e>
- [9] Flowers-Jacobs N-E, Pollarolo A, Coakley J J, Fox A E, Rogalla H, Tew W L and Benz S P 2017 A Boltzmann constant determination based on Johnson noise thermometry *Metrologia* **54**, 730-737 (8 pp) <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa7b3f>

Приложения к документу

Абсолютная первичная радиометрия

Absolute primary radiometric thermometry

https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/MeP-K-2018_Absolute_Primary_Radiometry.pdf

Оценка неопределенности при первичном радиометрическом измерении температуры

Uncertainty estimation in primary radiometric temperature measurement

https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/MeP-K-2018_Absolute_Primary_Radiometry_Uncertainty.pdf

Относительная первичная радиометрия

Relative primary radiometric thermometry

https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/MeP-K-2018_Relative_Primary_Radiometry.pdf

Низкотемпературная шумовая термометрия Джонсона

Low-temperature Johnson noise thermometry

https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/MeP-K-2019-LT_Johnson_Noise_Thermometry.pdf

Первичная шумовая термометрия Джонсона

Primary Johnson noise thermometry

<https://www.bipm.org/utis/en/pdf/si-mep/MeP-K-2018-Document-being-prepared.pdf>

.