

УДК 537.32



Стадник Б. И.

Стадник Б. И. докт. техн. наук,
Яцишин С. П. докт. техн. наук.

Национальный университет «Львовская
политехника», ул. Бандеры 12, Львов,
79013, Украина,
e-mail: slav.yat@gmail.com



Яцишин С. П.

ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ПОДХОДОВ КЕЛЬВИНА В СОЗДАНИИ АБСОЛЮТНОЙ ШКАЛЫ ТЕМПЕРАТУР

На основе анализа научных достижений Лорда Кельвина, в частности в области термодинамики и термоэлектричества, и руководствуясь достижениями нанотехнологий, показана возможность квантования температуры и обсуждены основания для создания квантового эталона температуры. Для прикладной реализации эталона, кроме квантовых эталонов электрического сопротивления и электрического напряжения, предложено использовать термоэлектрический метод, поскольку термоЭДС, в концепции Черновицкой школы термоэлектричества, интегрирует действие элементарных вихревых токов, обусловленных протеканием отдельных электронов сквозь токо-температурный конвертирующий элемент эталона. В результате, вследствие создания квантового эталона температуры, можно достичь повышения точности воспроизведения Международной практической температурной шкалы, впервые предложенной в ее современном виде именно Лордом Кельвином. Библ. 21, рис. 4.

Ключевые слова: квантовый эталон температуры, шкала температур, приведенная квантовая единица температуры, система СИ

История возникновения и современное состояние дел в реализации температурных шкал

Ранние температурные шкалы

Температурные шкалы менялись на протяжении развития технической мысли. Шкалу в более или менее современном виде, то есть с 2-мя фиксированными точками (начала и конца шкалы), предложил француз Рене А. Реомюр в 1730 г. Сейчас градусы Реомюра полностью вышли из обихода. Нулем шкалы Реомюра считалась постоянная точка замерзания воды, а один градус ($^{\circ}\text{R}$) отвечал изменению объема спирта крепостью 96° на $1/1000$. Учитывая то, что при изменении температуры от 0°C до 100°C объем спирта меняется на 8 %, температура кипения воды определена как 80°R . Обычные для нас градусы Цельсия (градусы «стоградусной шкалы»), появились не сразу. В 1742 г. шведский астроном А. Цельсий предложил «обратную» шкалу: в ней вода кипела при нуле градусов, а замерзала – при ста. Уже

после его смерти в 1744 г. шкалу «перевернул» М. Штремер (за 0 °С стали принимать температуру плавления льда, а за +100 °С – температуру кипения воды). В таком виде шкала используется до сих пор.

Праобразом «абсолютной» шкалы температуры стали так называемые лейденские градусы (L), которые использовались в начале XX столетия лабораторией Камерлинг-Оннеса в Лейдене. В этой шкале за ноль принята температура кипения жидкого водорода (–253 °С), состоящий из 75 % орто- и 25 % параводорода. Другая реперная точка – температура кипения жидкого кислорода (–193 °С). В конце концов, появились две используемые сегодня абсолютные шкалы температур – Кельвина и Ранкина. Ноль обеих шкал совпадает с абсолютным нулем температуры, а один градус отвечает изменению на 1 °С (шкала Кельвина) или на 1 °F (шкала Ранкина – США) (рис. 1).

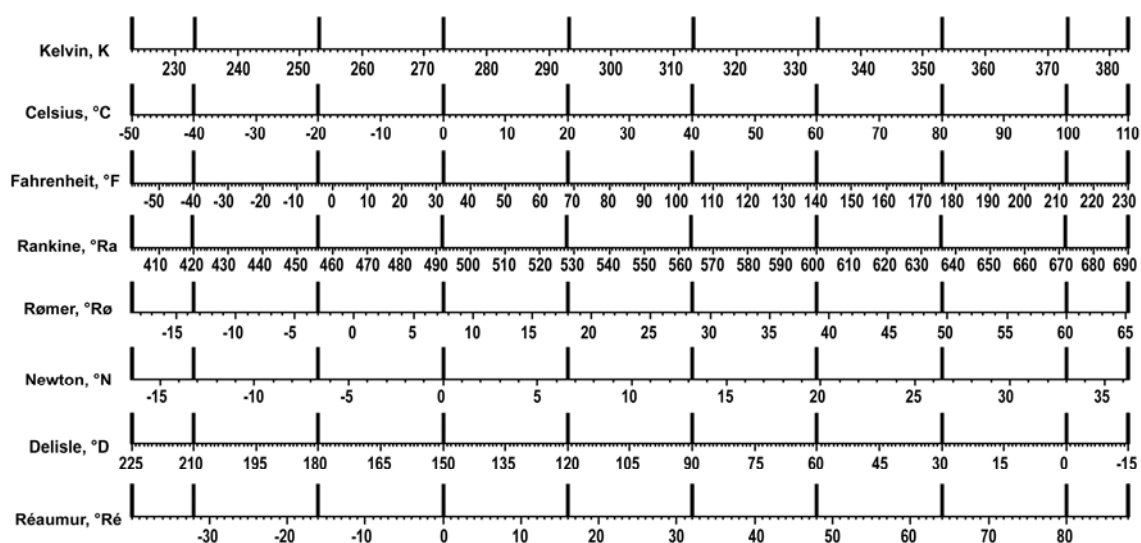


Рис. 1. Известные температурные шкалы и соотношения показаний термометров при их одновременном использовании для измерения одинаковых температур (вертикальная линия); слева приведены названия термометрических шкал.

Кельвин (K), до 1968 года - градус Кельвина (° K), единица системы СИ. Названный в честь ирландца Вильяма Томсона (1824 - 1907), который родился в Шотландии и стал великим английским ученым, удостоенным за свои научные заслуги титула лорда Кельвина – по названию реки, которая протекает через территорию Университета в Глазго. 0 K соответствует -273.15 °С и, наоборот, 0 °С равняется +273.15 K. На данный момент «кельвин» – это название термодинамической температурной шкалы и вместе с тем размерность единицы температуры этой же шкалы. Определение данной шкалы представлено по материалам 10-й Генеральной конференции мер и весов в 1954 г., которая приняла, что главной реперной точкой шкалы служит температура тройной точки воды 273.16 K. Кроме того, кельвин – это интервал МТ (кельвиновской) ПШ.

Поскольку лорд Кельвин обосновал вышеуказанную шкалу, а также 2-й закон термодинамики, его считают одним из 3-х основателей термоэлектричества. Например, первичная эталонная термопара – это термопара, которая имеет конкретную зависимость

интегральной термоЭДС от температуры, определенную согласно методам реализации Международной практической температурной шкалы Кельвина.

Температурная шкала и другие научные достижения лорда Кельвина

Кроме таланта к математике, лорд Кельвин (Вильям Томсон) имел способности к решению прикладных задач. К числу его главных изобретений и открытий относятся следующие.

Абсолютная температурная шкала. Кельвин понимал, что было бы полезно иметь возможность точно определить чрезвычайно низкие температуры. Он заметил, что молекулы перестают двигаться при абсолютном нуле и в 1848 г. предложил абсолютную шкалу температур – теперь называется «Шкала Кельвина» – где абсолютный ноль отвечает температуре 0 кельвина (0 К). Кельвиновское определение абсолютной температурной шкалы особенно важное в области сверхпроводимости. Это явление было выявлено уже после смерти Кельвина. И в наши дни, как змея кусает свой собственный хвост, сверхпроводящая карбоновая нанотрубка, рассматриваемая ниже, является основным звеном в создании Квантового эталона температуры, который может стать главной опорой модернизированной шкалы Кельвина. Более того, следующая особенность, воплощенная в конструкции эталона температуры, касается очередного достижения лорда Кельвина – термопары и термоЭДС.

Второй закон термодинамики. Исследование природы тепла привело Кельвина к формулированию второго закона термодинамики и одновременно к формированию основ термоэлектричества.

Телеграфные кабели и зеркальный гальванометр. В 1856 году Кельвин стал директором Атлантической телеграфной компании, которая работала над тем, чтобы проложить телеграфный кабель по дну через Атлантический океан. Прокладывание первого Атлантического кабеля в 1857 г. постигла неудача. В 1858 г. при прокладке прибегли к использованию средства измерения, названного зеркальным гальванометром (изобретение Кельвина) для измерения электрического тока, который протекает по кабелю. Новейшие технологии, в конце концов, не смогли заменить зеркальный гальванометр Кельвина.

Морское измерительное оборудование, в том числе высокоточные часы. Кельвин был увлеченным моряком и использовал свои навыки для решения морских проблем; изобретено несколько инструментов, которые улучшили навигацию и безопасность на море. Его изобретения включали: морской компас; машину для подачи звуковых сигналов; астрономические часы. Талант Кельвина как физика, и интерес к навигации побудили его создать и запатентовать в 1869 г. собственную версию астрономических часов. Ниже отметим необходимость точного измерения времени для обеспечения работы Квантового Эталона Температуры.

Атомарные исследования. В 1860-е годы Кельвин заинтересовался структурой атомов. Он наблюдал кольца дыма и предположил, что атомы взаимоструктурируются по спирали, как вихри один вокруг другого. Его гипотеза воспринималась с энтузиазмом на протяжении 20 лет и была опровергнута более поздними исследованиями. На сегодня особенности движения атомов тщательно изучаются учеными Национальной физической лаборатории

Великобритании, которая считается ведущим научно-исследовательским центром мира. 18-19 мая 2015 года около 50 исследователей в термометрии со всего мира собрались в Международном центре Королевского общества в Chicheley Hall, Бакингемшир, чтобы обсудить ход работы по имплементации в 2018 г. нового кельвина перед переопределением, как основной единицы СИ. Тогда Майкл де Подеста представил, вероятно, наиточнейшие измерения температуры в человеческой истории, которые базируются на наблюдениях за движением атомов.

Тетракайдекаэдрон (геометрическое тело с минимально возможной площадью поверхно-сти, ограниченное 14-ю плоскостями). Кельвин смоделировал геометрическую фигуру (полиэдрон), сформированную 14-ю гранями – трехмерную форму с наименьшей площадью поверхности. Никто не смог улучшить эту модель до 1993 г., когда появилась модель Weaire-Phelan с площадью поверхности лишь на 0.3% меньшей, чем в модели Кельвина. Так можно прийти к выводу, что Кельвин причастный к созданию энергоэффективного типа обустройства. Не исключаем, что дальнейшее исследование интенсивности теплоотвода от зоны нагрева Квантового Эталона Температуры даст возможность применить решение Кельвина с целью минимизации потерь тепла и улучшения точности передачи размера единицы температуры к образцовой термопаре 1-го разряда.

Улучшение температурной шкалы и перевод температурного эталона на квантовую физическую базу

Введение

В конце 20-го столетия вследствие интенсивных научно-исследовательских исследований в сфере нанотехнологий шесть (м, А, кг, с., моль, кд) из семи основных единиц системы СИ, кроме единицы температуры, К, были выражены через фундаментальные физические постоянные [1]. Подобный результат получен относительно ряда дополнительных величин системы СИ. Полученные эталоны полагают «внутренними», поскольку они определены на основе упомянутых постоянных, а не построены с использованием неизменности материальных артефактов, как платино-иридиевая проволока в эталоне единицы длины. Их работа основывается на определении дискретного значения конкретной физической величины или ее фиксированного размера (кванта), что дает возможность построить шкалу данной величины.

Формирование нового поколения эталона температуры на базе фундаментальных физических постоянных

Состояние на 2015-2016 гг. лучше всего представлено в [2]. Действующее определение единицы термодинамической температуры, кельвина, базируется на материальном артефакте, а именно на температуре тройной точки воды. Последняя зависит от ее изотопного состава, чистоты и т.п. и поэтому характеризуется существенной неопределенностью. Потребность в измеренном и воспроизводимом квантовом эталоне температуры продемонстрировали работы научных работников, представленные на 13-м Международном Симпозиуме TEMPMEKO-2016, деятельность которого касалась указанной кардинальной проблемы термометрии: CODATA выясняла потребность переопределения понятия "Температура" [3], поскольку температура – физическая величина, которая характеризует внутреннюю энергию тел, в наши дни не

измеряется непосредственно. Все средства измерения превращают температуру в любую другую физическую величину, которая может быть зафиксирована экспериментально. Принимая во внимание, что температура связана с энергией через постоянную Больцмана, предложено заменить температурные измерения энергетическими и этим избежать методической погрешности, обусловленной калиброванием средств измерения температуры в тройной точке воды *TTPW* [4]. Рядом ведущих метрологических центров (США, Великобритания и т.п.) выработано [2 – 3] новое определение единицы температуры: Кельвин, К, является единицей термодинамической температуры; его размер устанавливается путем фиксации численного значения постоянной Больцмана, что равняется $1.38065 \dots \cdot 10^{-23}$ и выраженной в единицах $\text{с}^{-2} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{К}^{-1}$, что эквивалентно Дж/К. Результат внедрения предложенного определения является следующим: 1 К будет определяться по изменению термодинамической температуры, которая приводит к изменению тепловой энергии на $kT - 1.38065 \dots \cdot 10^{-23}$ Дж. Выгоды от такой замены являются очевидными: размер кельвина, по новому определению, становится независимым от материала; становится ненужной фиксированная реперная точка (температура тройной точки воды) с неопределенностью ее определения (~ 0.01 К).

Это способствует более точному определению и передаче размера единицы термодинамической температуры непосредственно методами первичной термометрии, в частности, при очень высоких и низких температурах (первичная термометрия предусматривает, что конкретный измерительный инструмент касается определенного межранда (T), который может быть определен путем непосредственного вычисления полученных результатов без использования любых других неизвестных величин, а лишь применяя фундаментальные физические постоянные, как коэффициенты пропорциональности). В таком случае остается предварительно определить по возможности с наивысшей точностью значения постоянной Больцмана, чему и посвящен ряд совершенных работ, которые основываются на разных физических принципах. Действующее, рекомендованное CODATA, значение k определяется по результатам акустической термометрии газов [4 – 5].

К сожалению, однобокий подход по замене прямого определения температуры посредственным (за счет использования выражения $E = kT$ осуществляются энергетические измерения при известной постоянной Больцмана) формирует новые трудности. Замена температурных измерений энергетическими неизбежно поднимает ряд трудностей области сверх низкоэнергетических измерений, которые могут быть связаны с чувствительностью приборов, установлением минимального размера энергии или единицы энергии, недостаточной теплоизоляцией и отводом тепла, особенно интенсивным в области низких температур [6-7]. Более того, при привлечении предлагаемого метода, как базового, в получаемые результаты вносят дополнительную погрешность, поскольку по принципам метрологии [8] косвенное измерение есть менее точным по сравнению с непосредственным измерением: погрешность δt заменяется в косвенном методе суммой 2-х погрешностей: $\delta E + \delta k$. Итак, предлагалось привлекать лишь одну фундаментальную физическую постоянную, а именно постоянную Больцмана. Сам же квант температуры, как и квант энергии, не выделялся.

Состояние на 2017 г. изменилось в связи с достижениями Львовской школы термометрии [9]. Вторично после Г. Планка, который ввел температуру T_P (квант температуры в системе единиц Планка), которая может выступать как определяющая единица температурной шкалы: $0\text{ }^\circ\text{C} = 273.15\text{ K} = 1.9279 \cdot 10^{-30} T_P$, [10], доказано существование квантовой единицы измерения температуры [11]. Более того, показана (см. ниже) возможность ее реализации [12] на основе существующих квантовых эталонов: электрического сопротивления [13] и напряжения U [14] и обсужден проект устройства для получения контролируемого и заведомо определенного прироста температуры с использованием термоэлектрического блока.

Исследование и определение кванта температуры

Макро- и наносвойства, выраженные через фундаментальные физические постоянные в случае температуры, как основной физической величины системы СИ

Учет при рассмотрении лишь постоянной Больцмана, связанной с энергией рассеяния электронов при столкновениях с атомами, может быть неполным и потому не целиком корректным. При игнорировании процессов обретения энергии электронами, где могут быть вовлечены другие фундаментальные физические постоянные, к примеру постоянная Планка, рассматриваемую модель нельзя считать совершенной. Учет обеих сторон процесса содействует сбалансированности подхода к решению проблемы определения кванта температуры, как проявления выделения тепловой энергии (в случае пропускания электрического тока) электронами проводимости при их взаимодействии с атомами.

Существует эффективный путь изучения макросвойств материалов через их наносвойства. Он четко показан на примере исследования квантового эффекта Холла [13]: выявлена связь между макрохарактеристикой (постоянная фон Клитцинга, которая имеет размерность сопротивления $R_{KI} = \frac{h}{e^2}$), выраженной в квантованном значении измеренного электрического сопротивления 25812.807557 ± 0.0040 Ом, с наноразмерными характеристиками вещества (заряд электрона e и постоянная Планка h). Похожее касается связи электрического напряжения с указанными фундаментальными физическими постоянными [15].

Возможность квантования температуры и существование кванта температуры

Докажем возможность существования кванта температуры, как проявления свойств макроразмерной субстанции при электрон-фононном взаимодействии, то есть взаимодействии на наноуровне. Рассмотрим прохождение малых токов через материал с эффектом Клитцинга. Им может быть полупроводниковый материал или один из видов карбоновых материалов (графен [17] или нанотрубки [18]). Конкретно процесс происходит при низко-средних температурах [17] на контактах сверхпроводящей карбоновой нанотрубки, на графене или другом веществе, где фиксируется квантовый эффект Холла, с проводниковым/полупроводниковым материалом (для карбоновых нанотрубок диаметром несколько нанометров электрон проводимости проявляет главным образом волновые свойства. Сквозь такие нанотрубки электроны проходят так же, как световые волны проходят по световодам. Таким образом, электрика в наном мире превращается в оптику, а

джоулевое тепло рассеивается только на границе наномира, где нанотрубка соединяется с обычной проволокой, то есть на контактах с подводящими проводами. Выведем формулу: $R_{kl} = h/e^2$, связывающую квант сопротивления с фундаментальными физическими постоянными. Пусть между указанными контактами нанотрубки приложено напряжение U , а сила тока в ней составляет I . Поскольку энергия не рассеивается, то ее изменение между сечениями A и B составляет $\Delta E = eU$. Это происходит в промежуток времени Δt , равный времени пролета между контактами. Соотношение неопределенности Гейзенберга накладывает ограничения на изменения ΔE , Δt , откуда вытекает, что $U \geq h/e\Delta t$. Оценим ток в нанотрубке, как одномерной квантовой структуре. В ней, как в атоме гелия, могут сосуществовать только два электрона с разными спинами. Это означает, что ток I между контактами равняется $I = 2e/\Delta t$. Отсюда легко вывести формулу для искомого сопротивления: $R_{kl} = U/I = h/e^2$. Так как нанотрубки не греют, они способны пропускать токи огромной плотности - свыше 10^7 А/см². Если бы в карбоновых нанотрубках была обычная проводимость, то при указанных токах их температура возросла бы до 20000 К, превысив температуру сгорания – 700 К).

Конструктивно предлагается проводить исследование на одной из распространенных конструкций полевых транзисторов (CNTFET), а именно на транзисторе со встроенной, как затвор, сверхпроводящей карбоновой нанотрубкой [18]. Исток и сток изготовлены из разных материалов, которые вместе образуют квазитермоэлемент через нанотрубку, как горячий спай. Подобная структура характеризуется электрическим сопротивлением 25812.807557 ± 0.0040 Ом, обусловленным резистивными свойствами исключительно подводящих контактов.

При изучении рассеяния электроэнергии ($I^2 R = U^2/R$) на таком электрическом сопротивлении в области измерения температуры:

$$E = U^2 \Delta t / R_{kl} = I^2 R_{kl} \Delta t = N \frac{3}{2} kT, \quad (1)$$

отметим, что есть возможность оценить изменение температуры ΔT , обусловленное рассеянием N электронов. Заменяя уравнение на $I = \Delta Q/\Delta t = Ne/\Delta t$ (Δt – время), приведем его к:

$$\frac{(Ne)^2 h}{(\Delta t)^2 e^2} \Delta t = N \frac{3}{2} kT, \quad (2)$$

описывающее формирование электрического тока в единицу времени N электронами проводимости, которые передают атомам собственную энергию $\frac{3}{2}kT$. Отсюда прыжок

температуры ΔT при токе I через сверхпроводящую нанотрубку (охлаждение считается незначительным) определяется как:

$$\Delta T = \frac{2hI}{3ke} = \frac{2hN}{3k\Delta t}. \quad (3)$$

Иначе, прирост температуры предопределяется релаксацией электронов на фононах в зоне контакта затвора транзистора с истоком/стоком. При фиксированном количестве электронов за секунду он определяется через фундаментальные физические постоянные (h и k) и равняется $2h \text{ лс}/3k = 3.2 \cdot 10^{-11}$ К при условии диссипации 1 e/c . При питании от массива контактов Джозефсона появляется возможность пропустить определенное контролируемое количество электронов через элемент с квантовым эффектом Холла. Величина, сведенная к диссипации одного электрона на фононах в единицу времени или же к единичному току, названная нами, как приведенная квантовая единица температуры (ПКЕТ) и определенная выражением:

$$\Delta T \Big|_{\substack{\Delta t \rightarrow 1 \text{ с} \\ N \rightarrow 1}} = \frac{2h}{3k} \left[\frac{\text{К}}{\text{с}} \right] \cdot 1 [\text{с}]. \quad (4)$$

Ее значение не зависит от факторов влияния и вида вещества, а полностью определяется соотношением 2-х фундаментальных физических постоянных (h/k). Рассматриваемая ПКЕТ рекомендована для создания квантового температурного эталона. Работа такого эталона основывается на 2-х квантовых эффектах (эффект Клитцинга и эффект Джозефсона). Значение ПКЕТ, будучи измеренным относительно единиц СИ, характеризуется неопределенностью, которая определяется суммой 2-х неопределенностей: постоянной Планка h и постоянной Больцмана k [19], которые вместе формируют суммарную относительную неопределенность $59.2 \cdot 10^{-8}$.

Обращаем внимание, что неопределенности постоянной Планка и постоянной Больцмана приведены в таблицах NIST, как средневзвешенные значения физических постоянных, определенных несколькими релевантными физическими методами. Например, для изучения постоянной Планка применялся метод баланса мощности, методы изучения: плотности кристалла рассеянием рентгеновских лучей; магнитного резонанса, постоянной Фарадея, постоянной Джозефсона. В результате, рекомендованное CODATA 2010 среднее значение относительной неопределенности определения постоянной Планка представляет $u_h = 4.4 \times 10^{-8}$. Методы определения постоянной Больцмана следующие: из уравнения состояния идеального газа; изучением диэлектрической постоянной газа; скорости распространения звука в нем; из уравнения Найквиста при изучении электронных тепловых шумов; измерением интенсивности излучения абсолютно черного тела; измерением скорости звука в газообразном гелии, который находится в квазисферическом резонаторе (объемом 0.5 л) при температуре, близкой к температуре тройной точки воды (273.16 К) [20]. Кроме того, внедряется лазерный метод измерения постоянной Больцмана, что дает возможность достичь неопределенности $2 \cdot 10^{-4}$ в результате последовательных 61-часовых измерений [21].

Связи основных единиц СИ между собой и их определение через фундаментальные физические постоянные

По результатам проведенного исследования установлено, что представленные в [14] связи основных единиц СИ между собой (рис. 2) и принципа определения этих единиц через фундаментальные физические постоянные (рис. 3) видоизменяются, и это отображено соответствующими стрелками.

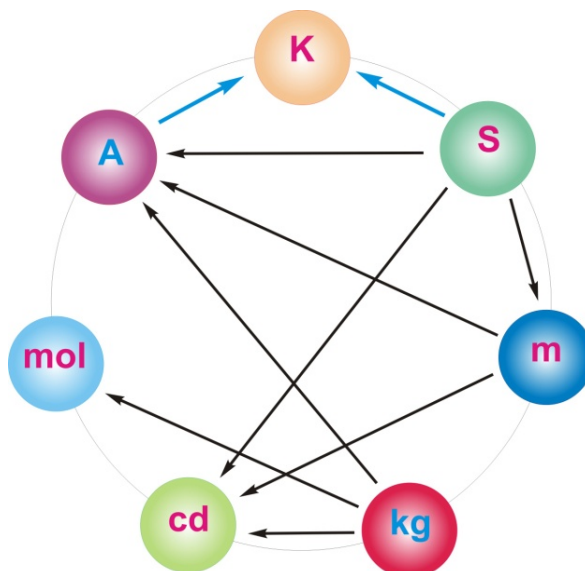


Рис. 2. Взаимосвязи и взаимоопределения основных единиц СИ: синие стрелки показывают выявленную взаимосвязь исследуемой величины T_c величиной I , A (через величины V и R) и с величиной t , s .

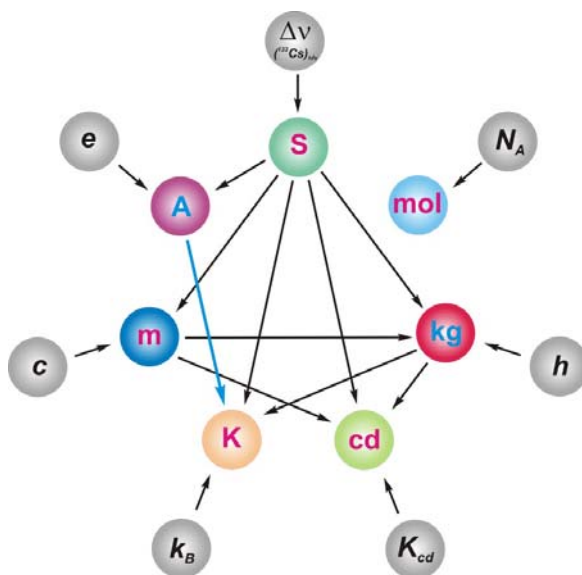


Рис. 3. Принципы изучения единиц системы СИ через фундаментальные физические постоянные: устранение взаимосвязи между единицами t и T (черная стрелка), как и появление (синяя стрелка) взаимосвязи между единицами I , A и T , K .

Метрологическая концепция кванта температуры и возможность ее реализации

Полученная ПКЕТ определяется через известные из [19] значения постоянных h и k и составляет $3.199\ 493\ 42 \cdot 10^{-11}$ К с относительной стандартной неопределенностью $59.2 \cdot 10^{-8}$. Заметим, что данное рассмотрение носит чисто феноменологический характер, так как авторы понимают упрощенность вышеприведенных соображений относительно рассеяния электрона и передачу им всей приобретенной энергии фононам. В действительности, при минимальных, тяжело фиксируемых изменениях температуры $\sim 10^{-11}$ К, обусловленных одноэлектронной релаксацией, мы не способны фиксировать настолько малые прыжки температуры, а, следовательно, должны работать со значительно большими токами, к которым уже можно применять статистическую термодинамику.

Это значит, что теоретически и практически нужно: а) увеличить ток через нанотрубку/полупроводник с квантовым эффектом Холла; б) использовать для регистрации слабого температурного сигнала электронные явления с ярко выраженным интеграционным эффектом. Прежде всего, это – эффект термоЭДС, в основе которого элементарные вихревые токи, соответствующие кооперативным движениям групп электронов. Поскольку 1 А определяется, как $6.2415093 \cdot 10^{18}$ электронов, которые проходят через сечение проводника за 1 с., то при условии, что электронный насос способен отсчитать 10^8 электронов за 1 с. или амперметр – измерить электрический ток $6.24 \cdot 10^{-10}$ А, мы должны определить прыжок температуры $3.2 \cdot 10^{-11}$ К $\cdot 10^8 = 3.2 \cdot 10^{-3}$ К. Такое значение является измеримым: при чувствительности ~ 43 мкВ/К ХК-термопары, измеренное значение представляет ~ 0.14 мкВ, а при десятикратно высшей чувствительности полупроводниковой термопары получаемое значение достигает 1.4 мкВ. Вышеупомянутая неопределенность – $59.2 \cdot 10^{-8}$ – дает возможность утверждать, что искомая величина (прыжок температуры $3.2 \cdot 10^{-3}$ К) определяется с абсолютной неопределенностью $\sim 1.9 \cdot 10^{-9}$ К.

Это представляет основное преимущество эталона температуры, созданного на базе фундаментальных физических постоянных. Исходя из ранее заданного значения температурного прыжка с известной относительной и абсолютной неопределенностями, можно предложить методологию создания чрезвычайно полезного эталона температуры, который относится к первичным термометрическим средствам и квалифицируется по аналогии с известными квантовыми эталонами других величин системы СИ, как «внутренний эталон».

Создание эталона температуры на базе кванта температуры

Исследование открывает принципиальную возможность и указывает путь создания эталона температуры на основе фундаментальных физических постоянных. Для этих целей предлагается привлечь действующие эталоны, созданные на основе фундаментальных физических постоянных: 1) эталон электрического сопротивления на основе обратно пропорционального значения кванту электропроводности (Inverse of Conductance Quantum) [13]; 2) эталон напряжения на основе Джозефсоновских контактов [14], который может вырабатывать импульсы напряжения, квантованные с целыми значениями величины $\frac{h}{2e}$ с прецизионным превращением частоты в напряжение (синтезированное напряжение определяется через известные значения количества импульсов, тактовую частоту и фундаментальные физические постоянные) (рис. 4).

Квантовый эталон температуры реализуется следующим образом. В квантовом эталоне

электрического сопротивления на основе одного из распространенных видов конструкций полевых транзисторов – CNTFET [18], исток и сток изготовлены из 2-х разнородных проводящих материалов, к примеру, из никеля и меди. Последние формируют термопару с квазизлупом в виде сверхпроводящей карбоновой нанотрубки (3-е промежуточное тело в цепи по основным законам термоэлектричества) длиной ~ 0.1 мкм. Таким образом, при условии определения количества электронов, которые проходят через контакты нанотрубки, на элементе конструкции эталона получаем возможность измерить термоэлектрическим методом прыжок температуры с минимальной методической погрешностью (или с максимальной достоверностью в подходе неопределенности).

Режим работы устройства следующий. То самое устройство служит и генератором известного заранее температурного прыжка на 1-м этапе, и используется для измерения температуры термоэлектрическим методом на 2-м этапе. Поскольку исследуемое устройство питается последовательностью непродолжительных ($\sim 10^{-2}$ с.) импульсов напряжения, то на 1-м этапе на устройство подается заданный ток, а на 2-м этапе (при отсутствии электрического тока) с помощью вышеописанной термопары измеряется прирост температуры. Итак, то самое устройство – «внутренний» эталон температуры – служит как генератор заведомо известного прыжка температуры на 1-й стадии, а также как средство измерения температуры на 2-й стадии.

Дальнейшая передача заданного значения температурного прыжка от эталона до образцовой термопары 1-го разряда осуществляется традиционным путем, располагая ее горячий спай вплотную к CNT-квазиспаю эталона температуры. При отклонении зафиксированного ею прироста температуры от значения прироста температуры эталона, который может быть обусловлен теплопотерями, вводится коэффициент коррекции. При более существенных теплопотерях можно предложить использование тепловых экранов, даже выполненных в форме 14-тигранника, то есть по Лорду Кельвину.

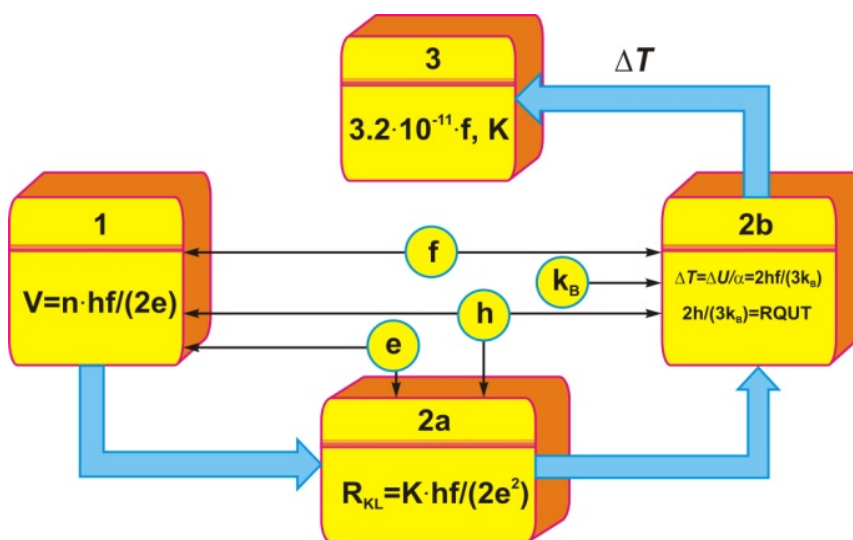


Рис. 4. Блок-схема эталона температуры на основе ПКЕТ и перенесение размера единицы от него к рабочим эталонам: 1 – эталон напряжения на основе массива переходов Джозефсона; 2а – карбоновая нанотрубка, как база полевого нанотранзистора; 2b – блок передачи размера единицы; 3 – рабочий эталон температуры (образцовая термопара 1-го разряда).

Выводы

Уже почти два столетия изобретения и открытия великого ученого живут и работают на человечество, используются в ежедневной жизни и в научных и прикладных исследованиях. Каждый раз измеряя температуру, мы неизбежно обращаемся к Кельвину. Придирчиво подходу к достижениям настоящего, попробуем оценить их сквозь призму наследства Большого Вильяма Томсона, 1-го Лорда Кельвина.

1. Прогресс в измерении физических величин состоит в обеспечении средств измерений эталонами, построенными с использованием квантовых эффектов, которые основываются на неизменности положенных в их основу фундаментальных физических постоянных. Соответственно, прогресс в температурных измерениях и усовершенствовании Абсолютной шкалы температур тормозился отсутствием именно такого эталона. Рассматривая электрон-фононную диссипацию на электрическом сопротивлении, обратном пропорциональном кванту проводимости, впервые доказали существование Кванта температуры, выраженного через отношение постоянной Больцмана к постоянной Планка h/k .

2. Показано, что при диссипации одного электрона в секунду получается прыжок температуры, обозначенный как приведенный квант температуры, который равняется $3.199\ 493\ 42 \cdot 10^{-11}$ К с относительной стандартной неопределенностью $59.2 \cdot 10^{-8}$, определенной благодаря известным значениям фундаментальных физических постоянных. Для экспериментального фиксирования эффекта прыжка температуры через квантовое сопротивление нужно пропускать электрический ток хотя бы $0.1\ \text{nA} = 10^8\ \text{e/c.}$; тогда получается прыжок температуры $\sim 10^3$ К, достаточный для его фиксирования встроенным нанотермометром (нанотермопарой), а также для дальнейшей передачи размера единицы температуры, к примеру, к образцовой термопаре 1-го разряда. Построенный таким образом эталон температуры может обеспечить пошаговую передачу размера (кванта) температуры, начиная от температуры, достаточно близкой к абсолютному нулю.

3. Предложенный эталон температуры можно рекомендовать для применения как «внутренний» эталон, который не требует проведения повторяемых измерений и сверок, чтобы обеспечить и подтвердить заведомо объявленную точность, в отличие от классических эталонов физических величин системы СИ. «Внутренние» эталоны становятся все более важными метрологическими инструментами в распространении точных измерений, к примеру, в киберфизических системах, элементы которых расплывлены в пространстве и времени.

Авторы выражают глубокую благодарность Академику АН Украины, Президенту Международной Термоэлектрической Академии Лукьяну Ивановичу Анатычуку за глубокую заинтересованность и значительный научный интерес и помощь.

Литература

1. Mills Ia., Quin T., Mohr P., Taylor B., Williams E. (2011). The new SI: units and fundamental constants. In: *Royal Society Discussing Meeting*. (January, 2011).
2. Fischer J. (2015). International temperature scale and new definition of the kelvin. In: *Meeting on Fundamental Physical Constants*. (Eltville, February 4, 2015).
3. Podesta M.de. (2016). The definition of the kelvin in the new SI: its rationale, implementation and

- implications. In: *Abstracts of XIII International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, TEMPMECO 2016*. (Zakopane, June 26-July 07, 2016).
4. Benz S.P., Pollarolo A., Qu J., Rogalla H., Urano C., Tew W.L., et al. (2013) An electronic measurement of the Boltzmann constant. *Metrologia*, 48, 42.
 5. Pitre L., Sparasci F., Truong D., Guillou A., Risegari L., Him M. (2011). Measurement of the Boltzmann constant k_B using a quasi-spherical acoustic resonator. *Int. J. Thermophys.*, 32, 1825–1886; DOI 10.1007/s10765-011-10.
 6. Hohmann M., Breitzkreutz P., Schalles M., Fröhlich T. (2014). Calibration of heat flux sensors with small heat fluxes. In: *Proc. of the 58 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium: "In Shaping the Future by Engineering"*. (Ilmenau, September 08-12, 2014).
 7. Lindeman M. (2000). *Microcalorimetry and transition-edge sensor*. Thesis UCRL-LR-142199. US Department of Energy, Lawrence Liverpool National laboratory.
 8. Дорожовець М.М. Опрацювання результатів вимірювань: Навч. посібник. – Л.: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2007.
 9. Yatsyshyn S., Stadnyk B., Lutsyk Ya., Buniak L.. Handbook of Thermometry and Nanothermometry, *IFSA Publishing*. 2015.
 10. Томилин К. А. Планковские величины // 100 лет квантовой теории. История. Физика. Философия : Труды международной конференции. – М.: НИИ-Природа, 2002. – С. 105-113.
 11. Yatsyshyn S., Stadnyk B. Metrological Array of Cyber-Physical Systems, Part 12. Study of Quantum Unit of Temperature. *Sensors and Transducers*. 2015. Vol. 192. Issue 9. P. 30 – 36.
 12. Stadnyk B., Yatsyshyn S. Metrological Array of Cyber-Physical Systems, Part 15. Approach to the Creation of Temperature Standard on the Basis of Fundamental Physical Constants, *Sensors and Transducers*. 2016. Vol. 199. Issue 4. P. 62 – 66.
 13. Giesbers A. J, Rietveld G., Houtzager E. et al. Quantum resistance metrology in graphene, *Applied Physics Letters*, **93**, pp.222109-1 ... 3 (2008).
 14. A Practical Josephson Voltage Standard at One Volt.
http://www.lee.eng.uerj.br/ownloads/graduacao/medidas_eletricas/JosephsonJunction.pdf
 15. Joyez P., Vion D., Götze M., Devoret M. and Esteve D.. The Josephson Effect in nanoscale tunnel junctions. *Journ. of Superconductivity*. 1999. **12**, 6. P. 757 – 766.
 16. Luste O. J., Kuz' R.V. Computer control of Eddy thermoelectric currents *Thermoelectricity*. № 2. 2004. P. 11 – 19.
 17. Novoselov K. S. et al. Room-Temperature Quantum Hall Effect in Graphene. *Science*, Mar. 9. 2007. 315 (5817). 1379.
 18. Sahoo R., Mishra R.. Simulations of Carbon Nanotube Field Effect Transistors, *Internat. Journ. of Electronic Engineering Research*. 209. **1**, 2 P. 117 – 125.
 19. The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty, CODATA Internationally Recommended 2014 Values on Fundamental Physical Constants.
 20. Pitre L., Risegari L., Sparasci F., Plimmer M. D., Himbert M. E., P. Giuliano Albo. Determination of the Boltzmann constant from the speed of sound in helium gas at the triple point of water. *Metrologia*, Focus on the Boltzmann Constant. **52**. 5 (BIPM & IOP Publishing, 19 Aug. 2015).
 21. Daussy C., Guinet M., Amy-Klein A., Djerroud K., et al, First Direct Determination of the Boltzmann

Constant by an Optical Method. <http://arxiv.org/ftp/quant-ph/papers/0701/0701176.pdf>.

Поступила в редакцию 12.06.2017

S. Yatsyshyn, *Dr. of Tech. Sciences*,
B. Stadnyk, *Dr. of Tech. Sciences*,

Lviv Polytechnic National University,
str. Bandery, 12, Lviv, 79013, Ukraine
e-mail: slav.yat@gmail.com

FURTHER DEVELOPMENT OF KELVIN APPROACHES TO CREATING AN ABSOLUTE TEMPERATURE SCALE

Based on the analysis of Lord Kelvin's scientific achievements, in particular in the field of thermodynamics and thermoelectricity, and guided by the advances in nanotechnology, the possibility of temperature quantization and reasonably grounded basis for creating a quantum temperature standard is demonstrated. For the application of the standard, in addition to the quantum standards of electric resistance and electric voltage, it is proposed to employ the thermoelectric method, since the thermoelectric power, in the concept of the Chernivtsi School of Thermoelectricity, integrates the action of elementary eddy currents caused by the flow of individual electrons through the current-temperature converting element of the standard. As a result, due to the creation of a quantum temperature standard, it becomes possible to achieve an increase in the accuracy of the reproduction of the International Practical Temperature Scale, first proposed in its modern form by Lord Kelvin. Ref. 21, Fig. 4.

Key words: quantum temperature standard, temperature scale, reduced quantum temperature unit, base SI units

References

1. Mills Ia., Quin T., Mohr P., Taylor B., Williams E. (2011). The new SI: units and fundamental constants. In: *Royal Society Discussing Meeting*. (January, 2011).
2. Fischer J. (2015). International temperature scale and new definition of the kelvin. In: *Meeting on Fundamental Physical Constants*. (Eltville, February 4, 2015).
3. Podesta M.de. (2016). The definition of the kelvin in the new SI: its rationale, implementation and implications. In: *Abstracts of XIII International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, TEMPMECO 2016*. (Zakopane, June 26-July 07, 2016).
4. Benz S.P., Pollarolo A., Qu J., Rogalla H., Urano C., Tew W.L., et al. (2013) An electronic measurement of the Boltzmann constant. *Metrologia*, 48, 42.
5. Pitre L., Sparasci F., Truong D., Guillou A., Risegari L., Him M. (2011). Measurement of the Boltzmann constant k_B using a quasi-spherical acoustic resonator. *Int. J. Thermophys.*, 32, 1825–1886; DOI 10.1007/s10765-011-10.

6. Hohmann M., Breitzkreutz P., Schalles M., Fröhlich T. (2014). Calibration of heat flux sensors with small heat fluxes. In: *Proc. of the 58 Internationales Wissenschaftliches Kolloquium: "In Shaping the Future by Engineering"*. (Ilmenau, September 08-12, 2014).
7. Lindeman M. (2000). *Microcalorimetry and transition-edge sensor*. Thesis UCRL-LR-142199. US Department of Energy, Lawrence Liverpool National laboratory.
8. Dorozhovets M.M. (2007). Opratsiuvannia rezultativ vymiriuvannia. Navchalnyi posibnyk [*Processing of Measurement Results, Manual*]. Lviv: National University "Lvivska Politechnica" Publ. [In Ukrainian].
9. Yatsyshyn S., Stadnyk B., Lutsyk Ya., Buniak L. (2015). *Handbook of Thermometry and Nano thermometry*. IFSA Publishing.
10. Tomilin K.A. (2002). Plankovskie velichiny. Sto let kvantovoi teorii. Istoria. Fizika. Filosofia – Trudy mezhdunarodnoi konferentsii [Planck values. In: *Proc. of International Conference "One Hundred Years of Quantum Theory. History. Physics. Philosophy"*]. Moscow [in Russian].
11. Yatsyshyn S., Stadnyk B. (2015). Metrological array of cyber-physical systems, Part 12, Study of quantum unit of temperature. *Sensors and Transducers*, 192(9), 30-36.
12. Stadnyk B., Yatsyshyn S. (2016). Metrological array of cyber-physical systems, Part 15, Approach to the creation of temperature standard on the basis of fundamental physical constants. *Sensors and Transducers*, 199(4), 62-66.
13. Giesbers A.J., Rietveld G., Houtzager E. et al. (2008). Quantum resistance metrology in graphene. *Applied Physics Letters*, 93, 222109-1 ... 3; DOI: 10, 1063/1.3043426.
14. A practical Josephson voltage standard at one volt. http://www.lee.eng.uerj.br/ownloads/graduacao/medidas_eletricas/JosephsonJunction.pdf
15. Joyez P., Vion D., Götz M., Devoret M., Esteve D. (1999). The Josephson effect in nanoscale tunnel junctions. *J. Superconductivity*, 12(6), 757-766.
16. Luste O.J., Kuz R.V. (2004). Kompiuternyi control vikhrevykh termoelektricheskikh tokov [Computer control of eddy thermoelectric currents]. *Termoelektryka- J.Thermoelectricity*, 2, 11-19 [in Ukrainian].
17. Novoselov K.S. et al. (2007). Room-temperature quantum Hall effect in graphene. *Science*, 315 (5817), 1379.
18. Sahoo R., Mishra R. (2009). Simulations of carbon nanotube field effect transistors. *Internat. Journ. of Electronic Engineering Research*, 1(2), 117-125.
19. *The NIST Reference on Constants, Units, and Uncertainty*. CODATA internationally recommended 2014 values on fundamental physical constants.
20. Pitre L., Risegari L., Sparasci F., Plimmer M.D., Himbert M.E., Giuliano Albo P. (2015) Determination of the Boltzmann constant from the speed of sound in helium gas at the triple point of water. *Metrologia*, August 19, 2015, BIPM & IOP Publishing.
21. Daussy C., Guinet M., Amy-Klein A., Djerroud K., et al. First direct determination of the Boltzmann constant by an optical method. <http://arxiv.org/ftp/quant-ph/papers/0701/0701176.pdf>.

Submitted 12.06.2017