

значительно расширяет область применения датчика и позволяет использовать его для измерения малых расходов практически любых жидкостей, в том числе, в агрессивных и ядовитых средах.

Использование разработанного устройства для измерения малых расходов жидкости создает условия для полной автоматизации процесса высокоточного дозирования различных жидкостей, включая медицинские, с возможностью управления процессом дозирования в реальном времени.

Литература

1. Гуткин М. Б., Мишустин В. И., Чистяков Ю. А. Метрологическое обеспечение измерений расхода и объема жидкостей и газов в России // Измерительная техника. 2010. № 3. С. 30—34; Gutkin M. B., Mishustin V. I., Chistyakov Yu. A. The metrological backup for measurements of the flow rate and volume of liquids and gases in Russia // Measurement Techniques. 2010. Т. 53 N. 3. P. 281—287.
2. Адамовский Л. А. Вихревые электромагнитные расходомеры-счетчики для жидкостей с ионной проводимостью // Измерительная техника. 2008. № 11. С. 32—39; Adamovskii L. A. Vortex electromagnetic flowmeter-counter for liquids with ionic conductivity // Measurement Techniques. 2008. Т. 51. № 11. P. 1191—1199.
3. Зорин Ю. В., Еремин И. Ю. Повышение точности измерения расхода нефти при деформации сечения трубопрово-

да // Измерительная техника. 2013. №1. С. 43—44; Zorin Yu. V., Eremin I. Yu. Increasing the precision in measurement of the flow of petroleum in the case of deformation of a pipeline // Measurement Techniques. 2013. Т. 56. № 1. P. 61—64.

4. Алексеев К. О. Особенности измерения расхода биологической жидкости в аппаратах для гемодиализа / К. О. Алексеев, В. С. Лугиня, И. А. Киселев // Измерительная техника. 2010. № 11. С. 68—71; Alekseev K. O. Typical features of measurement of the flow rate of biological fluid in hemodialysis machines // Measurement Techniques. 2011. Т. 53. № 11. P. 1292—1298.

5. Литвак В. И. Фотоэлектрические датчики в системах контроля, управления и регулирования. М.: Наука, 1966. С. 289—290.

6. Пат. № 2035720 РФ. Датчик расхода жидкости / А. А. Ивашкин, В. П. Конарев // Изобретения. 1995. № 5.

7. Пат. № 2247328 РФ. Устройство для измерения расхода жидкостей / И. С. Константинов, Ю. В. Касьянов, А. И. Суздальцев // 2005. Бюлл. № 6.

8. Пат. № 136564 РФ. Датчик малых расходов жидкости / В. П. Заярный, И. В. Волков, А. М. Макаров, Ю. П. Сердобинцев // ВолгГТУ. 2014.

9. ГОСТ 25047—87. Устройства комплектные эксфузионные, инфузионные и трансфузионные однократного применения. Технические условия.

Дата принятия 13.05.2014 г.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

535.233.21:535.233.22

Радиационная шкала температур и определение постоянной Больцмана

Л. А. НАЗАРЕНКО*, А. И. ШЕВЧЕНКО**, А. В. ПРОКОПОВ***

* Харьковский национальный университет городского хозяйства, Харьков, Украина,
e-mail: lnazarenko@ksame.kharkov.ua,

** Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, Украина,
e-mail: soi_51@ukr.net,

*** Национальный научный центр «Институт метрологии», Харьков, Украина,
e-mail: prokopov@metrology.kharkov.ua

Рассмотрен новый подход к построению радиационной шкалы температур и определению постоянной Больцмана, базирующийся на выводе формул для определения плотности теплового потока из уравнений термодинамики. Предложено использование плотности полной энергии равновесного излучения ампулы воды в тройной точке, регистрация этого излучения абсолютным криогенным радиометром.

Ключевые слова: радиационная шкала температур, постоянная Больцмана.

The new approach for the construction of radiation scale of temperatures and determination of Boltzmann constant was considered. Approach is based on the derivation of formulas for determination the density of heat flow from the equations of thermodynamics. It is proposed to use for building of the practical temperature scale the density of total energy of equilibrium radiation of ampoule of water at the triple point, the registration of this radiation by an absolute cryogenic radiometer and subsequent determination of k from Stefan-Boltzmann law.

Key words: radiation scale of temperatures, Boltzmann constant.

Международный комитет по мерам и весам на 94-м заседании в 2005 г. принял рекомендацию относительно перепределения кельвина таким образом, чтобы он был при-

вязан к известным фундаментальным физическим константам [1, 2]. Для кельвина такой постоянной является постоянная Больцмана k [2, 3]. Постоянная Больцмана — одна из

основных физических констант. Она определяет связь между температурой Θ , выраженной в энергетических единицах (эргах или джоулях), с температурой T , выраженной в кельвинах: $\Theta = kT$.

В настоящее время кельвин определяется через термодинамическую температуру тройной точки воды $T_{\text{тр}}$. В результате переопределения относительная неопределенность, с которой известна величина k , будет присвоена $T_{\text{тр}}$, что приведет к другому значению $T_{\text{тр}}$; отличие от $T_{\text{тр}} = 273,16 \text{ K}$ составит не более $0,25 \text{ мК}$ [2]. Такая неопределенность характерна только для значений около $T_{\text{тр}}$, для других значений температуры она будет намного больше. Признанное в мире значение постоянной $k = 1,3806488(13) \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ имеет относительную стандартную неопределенность $u_r = 9,1 \cdot 10^{-7}$, которая базируется на одном измерении, выполненном в NIST в 1988 г. методом акустической газовой термометрии [2, 4]:

$$u_0 = (y_0 RT/M)^{1/2},$$

где u_0 — скорость звука в предельном случае, когда давление и частота стремятся к нулю; $y_0 = C_p/C_v$ отношения удельных теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме; R — молярная газовая постоянная; M — молярная масса газа.

Анализ составляющей неопределенности для скорости звука [2] показывает, что значение неопределенности для R по данным Российского национального комитета КОДАТА составляет $8,3144621$ при относительной стандартной неопределенности $u_r = 9,1 \cdot 10^{-7}$ [4]. Таким образом, R и k имеют одинаковую неопределенность.

Для определения полного потока излучения используется формула Стефана—Больцмана. Постоянная Стефана—Больцмана σ связана с постоянной Больцмана k следующим образом [4]:

$$\sigma = 2\pi^5 k^4 / (15h^3 c^2), \quad (1)$$

где h — постоянная Планка; c — скорость света.

Рассмотрим работы, в которых представлены методы определения σ . В [5] описан радиометр с электрическим замещением, который работает при криогенных температурах с относительной стандартной неопределенностью $0,021 \%$ для оптического излучения $0,8 \text{ мВт}$. В [6] со ссылкой на работы [7—9] отмечено, что авторами [8] был усовершенствован абсолютный криогенный радиометр NIST (АКР) для определения σ , использующий абсолютное черное тело (АЧТ) и излучение в тройной точке воды. В [8] использован АЧТ в тройной точке воды для определения σ со стандартной неопределенностью $0,0134 \%$. В [10] приведено описание АКР. Недостатком такого подхода является то, что в более широких диапазонах температурная шкала строится с помощью менее точных платиновых термометров сопротивления. Возможные варианты определений кельвина теоретически не связаны с термодинамической (абсолютной) температурой и циклами Карно [11].

Анализ показал, что теоретически термодинамическая температура в настоящее время устанавливается только на базе идеального газа. Все другие определения практических температур теоретически не связаны с термодинамикой. Более того, определения постоянной Больцмана не связаны напрямую с постулатами квантовой физики. В [4]

отмечено, что вблизи каждого состояния термически неоднородной равновесной системы существуют такие состояния, которые нельзя достичь адиабатическим путем (принцип адиабатической недостижимости Каратеодори).

В настоящей статье предложено для построения практической радиационной температурной шкалы использовать плотность полной энергии равновесного излучения ампулы воды в тройной точке, регистрацию этого излучения АКР [10] и последующее определение k из закона Стефана—Больцмана. Такой подход позволяет определить $T_{\text{тр}}$ из уравнения Клапейрона—Клаузиуса для зависимости давления насыщенного пара воды от температуры: $dT/dp = T(V_2 - V_1)/\lambda$ [3], где T — абсолютная температура; λ — молярная теплота парообразования, $\lambda = T(S_2 - S_1)$; $(V_2 - V_1)$ — изменение объема этого вещества; $(S_2 - S_1)$ — разница энтропии воды в жидком и газообразном состояниях при фазовом переходе первого рода от жидкого состояния воды к газообразному; V_1, V_2 — объемы воды в жидком и газообразном состояниях.

Тройную точку воды можно использовать в качестве реперной точки в радиационной шкале. Приведем преимущества использования тройной точки воды как реперной для определения постоянной k . Для $T_{\text{тр}}$ кроме фазового перехода жидкость — насыщенный пар существует фазовый переход жидкость — твердое тело, что дает возможность использовать для $T_{\text{тр}}$ еще одну подобную формулу, но вместо молярной теплоты парообразования применять λ_t — молярную теплоту плавления твердого тела — льда. Использование двух физических явлений — плавления и парообразования — позволяет повысить точность определения абсолютной термодинамической температуры кельвина и построения температурной шкалы. При построении шкалы на базе АКР можно использовать уравнение для мощности полного излучения АЧТ. При построении международной температурной шкалы МТШ-90 для температур T_{90} в интервале $0—961,78 \text{ °C}$ используют инверсное уравнение [12]:

$$T_{90}/K - 273,16 = D_0 \sum_{i=1}^9 D_i [(W_r(T_{90}) - 2,64) / 1,64]^i, \quad (2)$$

где T_{90}/K — температура по шкале МТШ-90 в градусах кельвина; $W_r(T_{90}) = R(T_{90})/R(273,16 \text{ K})$; D_0, D_i — коэффициенты, приведенные в [12]. Это уравнение по данным платиновых термопреобразователей сопротивления — аппроксимация температурной шкалы в указанном интервале. Фактически оно является уравнением измерений, но применяется не во время измерений или передачи единицы температуры от шкалы с одного поля поверочной схемы до шкалы другого поля, а внутри одной и той же шкалы путем аппроксимации. При построении радиационной шкалы на базе АКР можно использовать подобное уравнение, но в этом случае роль платиновых термометров сопротивления выполняет АКР, и тогда оно используется для мощности полного излучения АЧТ.

Радиационное излучение в малой полости внутри тела и вне его поверхности при одинаковой температуре идентичны. Рассмотрим первое и второе уравнения термодинамики:

$$\delta Q = dU + A da; \quad (3)$$

$$\delta Q/T = dS, \quad (4)$$

где δQ — элемент теплоты; U — внутренняя энергия; a — внешний параметр, связанный с силовым параметром A ; S — энтропия [3].

Согласно [3] из (3), (4) получим уравнение, в котором радиационное излучение q_u выделено из общей энергии U . Силовой параметр A можно заменить на q_u , а a на τ :

$$TdS = du + q_u d\tau, \quad (5)$$

где q_u — плотность потока радиационного излучения с единицы площади поверхности; τ — время; u — кинетическая энергия атомов и молекул тела.

Из (1) аналогично [3] выведем формулу

$$\ln(T/T_0) = \int_{t_0}^t \left(\frac{\partial q_u}{\partial t} \right)_{\tau} dt / \left[\left(\frac{\partial u}{\partial \tau} \right)_t + q_u \right] = I, \quad T/T_0 = e^I,$$

где T , T_0 — значения температуры по абсолютной шкале, соответствующие практическим температурам t , t_0 .

В выражении $q_u d\tau$, определяющем работу, q_u можно использовать в качестве обобщенной силы. Радиационное излучение воздействует на внешнюю среду и может влиять на нее [3], т. е. q_u может входить не только в термическое, но и в калорическое уравнение состояния системы и быть потенциалом (обобщенной силой) в термодинамической системе. Формула (5) позволяет построить радиационную шкалу на базе энергетических единиц радиационного излучения [7, 13].

Для определения полного потока излучения используется формула Стефана—Больцмана. Энергетическая светимость АЧТ $M_{\text{АЧТ}}$ равняется отношению потока излучения Φ к площади поверхности источника излучения S_B : $M_{\text{АЧТ}} = \Phi/S_B$. Согласно закону Стефана—Больцмана $M_{\text{АЧТ}}$ пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры T [3]:

$$M_{\text{АЧТ}} = \sigma T^4. \quad (6)$$

С учетом приведенного выше, определение постоянной Больцмана k и построение радиационной шкалы состоит из следующих этапов:

из (6) находим σ путем измерения температуры $T_{\text{тр}}$ тройной точки воды с помощью АКР (эта температура является основной реперной точкой);

по (1) рассчитываем константу Больцмана k ;

объединяем (1), (6), получаем зависимость $T = f(\Phi)$ и строим температурную шкалу по радиационному излучению основной реперной точки $T_{\text{тр}}$ и ряду других реперных точек;

для определения точек температурной шкалы по радиационному излучению в промежутках между реперными точками выводим инверсное уравнение, подобное (2), как это сделано в МТШ-90.

Таким образом, для построения температурной шкалы предложено использовать плотность полной энергии равновесного излучения ампулы воды в тройной точке, регистрацию этого излучения АКР [9] и последующее определение k из закона Стефана—Больцмана. Константы σ и k при этом можно определить с относительной неопределенностью $13 \cdot 10^{-6}$ (3 мК), и построить температурную шкалу с использованием радиационного излучения [13].

Литература

1. Миллс Я. М. и др. Переопределение килограмма, ампера, кельвина и моля: предлагаемый подход к применению. Рекомендации 1 МКМВ (С1-2005) // Метрология. 2007. № 2. С. 5—57.
2. Иоахим Фишер. Кельвин в новой системе единиц СИ. Температура-2011. Тез. докл. 4-й Всерос. и стран участниц КООМЕТ конф. по проблемам термометрии. СПб. 2011. С. 4. [Офиц. сайт] http://temperatures.ru/pages/razrabotka_novogo_opredeleniya_kelvina (дата обращения: 20.02.2014 г.)
3. Базаров И. П. Термодинамика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1961.
4. Mohr P. J., Taylor B. N., Newell D. B. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010 // Rev. Mod. Phys. 2012. V. 84. P. 1527—1605.
5. Gentile T. R. e. a. National institute of standards and technology high-accuracy cryogenic radiometer // App. opt. 1996. V. 35. N. 7. P. 1056—1058.
6. Mangum B. W. e. a. The Kelvin and Temperature Measurements // J. Res. Nat. Inst. Stand. and Technol. 2001. V. 106. N. 1. P. 105—149.
7. Quinn T. J., Martin J. E. A radiometric determination of the Stefan-Boltzmann constant in precision measurement and fundamental constants II // Natl. Bur. Stand. (U.S.) Spec. Publ., 1984.
8. Ginnings D. C., Reilly M. L. Calorimetric measurement of thermodynamic temperatures above 0 °C using total blackbody radiation, in Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry // H. H. Plumb, ed., Instrum. Soc. America, Pittsburgh PA. 1972.
9. Mohr P. J., Taylor B. N. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 1998 // J. Phys. Chem. Ref. 1999.
10. Голобородько В. Т. и др. Радиометрический метод построения термодинамической температурной шкалы // Измерительная техника. 1995. № 6. С. 36—39; Goloborod'ko V. T. e. a. Radiometric method of constructing a thermodynamic temperature scale // Measurement Techniques. 1995. V. 38. N. 6. P. 655—660.
11. Report to the CIPM on the implications of changing the definition of the base unit kelvin. 02 May 2007. Prepared by the task group TG-SI of the CCT. J. Fisher, S. Gerasimov, K. D. Hill, G. Mashin at al. [Офиц. сайт] <http://www.temperatures.ru/> pdf (дата обращения: 20.02.2014 г.).
12. Preston-Thomas H. The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90) // Metrologia. 1990. V. 27. P. 3—10.
13. Fellmuth B., Gaiser Ch., Fischer J. Determination of the Boltzman const — status and prospects // Meas. Sci. Technol. 2006. V. 17. N. 10. P. 145—159.

Дата принятия 22.04.2014 г.