

ке адаптивных автоматических средств обработки картин МКФИ.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг., госконтракт П1936, и Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009—2010)», проект № 2.2.2.2.5691.

Л и т е р а т у р а

1. **Разумовский И. А.** Интерференционно-оптические методы механики деформируемого твердого тела. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007.

2. **Волков И. В.** Внесендовая спекл-голография. Использование голографической и спекл-интерферометрии при измерении деформаций натуральных конструкций // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34. № 1. С. 82—89.

3. **Kirmse T., Wagner A.** Advanced methods for in-flight flap gap and wing deformation measurements in the project AWIATOR // Proc. First CEAS Europ. Air and Space Conf. Berlin (Germany), 2007. P. 1—6.

4. **Удалов А. В.** Аппаратно-программный комплекс теневого фонового метода для натуральных исследований: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. М., 2010.

Дата принятия 08.07.2010 г.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

536.508.1

Мини-ячейки для воспроизведения кривых плавления галлия и индия в микропроцессорных калибраторах температуры

Е. В. ВАСИЛЬЕВ, С. А. КОНОНОВ

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

Приведены результаты работ по исследованию мини-ячеек для воспроизведения кривых плавления галлия и индия в микропроцессорных калибраторах температуры серий АТС и RTC. Полученные результаты перспективны для использования кривых плавления известных и новых термометрических веществ с целью совершенствования метрологического обеспечения прецизионной термометрии.

Ключевые слова: кривая плавления, фазовый переход, стабильность, калибратор температуры, термометрическое вещество.

Investigation results of mini-cells for of Ga and In reproduction melting curves in microprocessor-based temperature calibrators ATC and RTC series are given. The obtained results are revealing new possibilities for perspective usage of melting curves of well-known and new thermometrical substances for metrological assurance perfection of high-precision thermometry.

Key words: melting curve, phase transition, stability, temperature calibrator, thermometrical substance.

Современное поколение цифровых микропроцессорных приборов для измерений сопротивления и температуры позволяет с высокой точностью измерять выходные сигналы эталонных платиновых термометров сопротивления (ЭТС) и индивидуально градуируемых термопреобразователей сопротивления. Однако для повышения точности измерений этого недостаточно, так как качество измерений температуры в значительной степени зависит от метрологического уровня первичных преобразователей температуры. В настоящее время единственным способом повышения точности этих преобразователей является их индивидуальная градуировка при температурах фазовых переходов термометрических веществ.

Термодинамические методы воспроизведения постоянных температур положены в основу Международной температурной шкалы 1990 г. (МТШ-90) [1]. Основные принципы и способы воспроизведения первичных реперных точек МТШ-90 в стандартных ампулах приведены в [2]. Для градуировки ЭТС наивысшей точности применяются дорогостоящие ампулы с большим объемом металлов высокой чистоты и сложные установки для воспроизведения и поддержания равновесного состояния чистых металлов при их затвердевании. По этой причине данное метрологическое оборудование применяется, главным образом, в национальных метрологических институтах и физических лабораториях, участвующих в международных сличениях. Так, ВНИИМ

им. Д. И. Менделеева участвовал в международных сличениях тройной точки галлия до ее включения в число первичных реперных точек. В [3] приведены результаты измерений, выполненных в рамках международных сличений тройной точки галлия в ампуле, содержащей 1 кг галлия чистотой 99,9999 %, которые представляют интерес и в настоящее время, так как далее описаны результаты измерений температуры плавления галлия такой же чистоты в мини-ячейке, содержащей 150 г галлия.

Термодинамический метод фазовых переходов чистых металлов применяется в стандарте на методику поверки ЭТС 1-го и 2-го разрядов [4]. Этим стандартом в качестве средств поверки предусмотрено применение ампулы больших размеров, позволяющих градуировать ЭТС стержневого типа с длиной кварцевой оболочки более 500 мм. Однако в настоящее время увеличивается парк эталонных и прецизионных термометров, габаритные размеры и форма которых несовместимы с данным метрологическим оборудованием.

В лаборатории метрологического обеспечения термометрии ВНИИМС в течение последних пяти лет проводятся работы по совершенствованию метрологического обеспечения указанных термометров с использованием термодинамического метода, основанного на воспроизведении кривых плавления термометрических веществ. Известно, что качество измерений температуры эталонными и прецизионными термометрами непосредственно зависит от их стабильности. При неправильной эксплуатации ЭТС с кварцевым защитным корпусом и в процессе длительной эксплуатации платиновых термопреобразователей сопротивления повышенной точности с металлическим корпусом изменяется сопротивление чувствительных элементов, что приводит к изменению индивидуальных статических характеристик преобразования, определенных в процессе их градуировки. Поэтому перед началом выполнения высокоточных измерений с помощью ЭТС рекомендуется контролировать их стабильность при температуре тройной точки воды (+0,01 °C). Это трудоемкий способ контроля и применяется лишь в метро-

логических центрах, поверяющих ЭТС уровня рабочих эталонов и эталонов 1-го разряда, оснащенных генераторами льда и автоматическими установками для поддержания ампул в рабочем состоянии.

Для контроля стабильности ЭТС и прецизионных термометров в поверочных и калибровочных лабораториях предлагается новый, более простой и надежный метод, основанный на измерении выходного сигнала (или температуры) контролируемого термометра в процессе воспроизведения кривой плавления галлия (29,7646 °C). Разработке этого метода предшествовали многочисленные эксперименты по воспроизведению кривых плавления галлия и индия (156,5985 °C) при нагревании малогабаритных ячеек в переносных микропроцессорных калибраторах температуры с твердотельными термостатами.

На рис. 1 изображены типичные кривые плавления галлия чистотой 99,9999 % (рис. 1, а) и индия чистотой 99,999 % (рис. 1, б), полученные с помощью эталонных платиновых термометров сопротивления типа ЭТС-25 с защитным корпусом в виде трубки из кварца длиной 550 мм. Кривые плавления галлия и индия многократно воспроизводились в мини-ячейках в процессе их нагревания вместе с ЭТС в калибраторах температуры типов АТС-650В, RTC-157В и RTC-700В. Измерения и регистрацию температуры выполняли при помощи прецизионного измерителя температуры типа МИТ 8.15, погрешность измерений сопротивления которого периодически контролировали по эталонным мерам электрического сопротивления. Стабильность мер электрического сопротивления соответствовала требованиям, предъявляемым к эталонным мерам 1-го разряда. Периодический контроль погрешности прецизионного измерителя температуры МИТ 8.15 № 016 показал, что погрешность измерения температуры галлия при реализации кривых плавления не превышает ± 1 мК. На рис. 1 указаны средние значения t_{cp} температуры плавления, измеренные при силе тока $I = 1$ мА, и среднее квадратическое отклонение (СКО). Предварительно определили перегрев термометров измерительным током в процессе измерений сопротивления в

мини-ячейках при силах тока 1 и 2 мА, что позволило экстраполировать к нулевому току и уточнить измеренное значение температуры в мини-ячейке в процессе ее аттестации.

В табл. 1 и 2 приведены результаты статистической обработки типичных кривых плавления галлия и индия (см. рис. 1), полученных при нагревании мини-ячеек в калибраторе температуры с рабочим объемом цилиндрической формы высотой 160 и 210 мм и диаметром 30 мм. Анализ результатов статистической обработки цифровых данных, по которым построены кривые плавления галлия и индия, позволяет сделать следующие выводы:

продолжительность горизонтальных участков кривых плавления галлия и индия, соответствующих квазистатическому режиму изменения температуры со средней скоростью 0,1 мК/ч, составляет не менее 8 ч для галлия и 7 ч для индия;

средние температуры плавления галлия и индия на горизонтальных участках кривых плавления продолжительностью 8 и 7 ч соответственно составляют 29,7670 °C при СКО = $4,7 \cdot 10^{-4}$ °C и 156,6000 °C при СКО = $6,4 \cdot 10^{-4}$ °C;

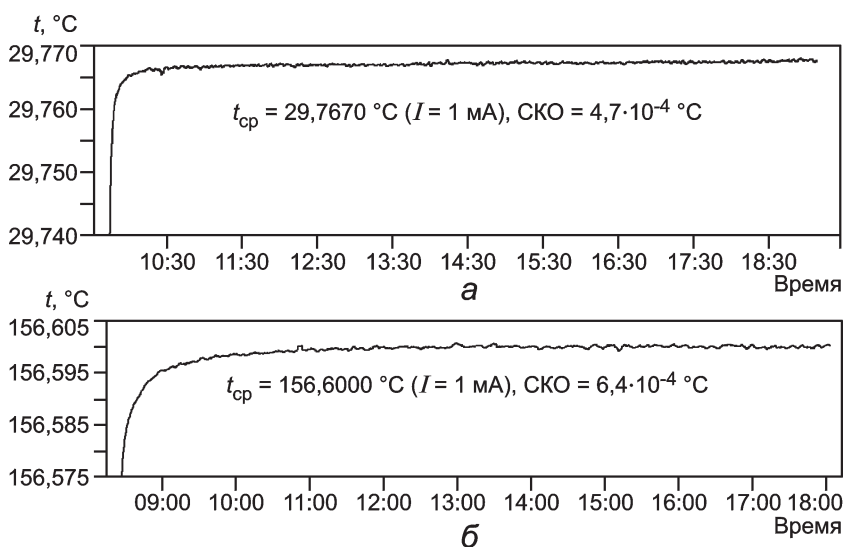


Рис. 1. Типичные кривые плавления галлия (ячейка Г-25-7,5 № 1) (а) и индия (И-25-7,5 № 1) (б), полученные при помощи термометра сопротивления ЭТС-25 № 003 в калибраторах температуры соответственно АТС-650В и RTC-700В

Таблица 1

Результаты статистической обработки типичной кривой плавления галлия (ячейка Г-25-7,5 № 1)

Температура плавления и СКО, °С, по часовым интервалам								СКО t_{cp} и за 8 ч, °С
1	2	3	4	5	6	7	8	
29,7665	29,7667	29,7668	29,7670	29,7671	29,7671	29,7672	29,7673	29,7670
$4,1 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-4}$

Таблица 2

Результаты статистической обработки типичной кривой плавления индия (ячейка И-25-7,5 № 1)

Температура плавления и СКО, °С, по часовым интервалам							СКО t_{cp} и за 7 ч, °С
1	2	3	4	5	6	7	
156,5996	156,5999	156,6001	156,5999	156,6001	156,6001	156,5999	156,6000
$6,2 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,8 \cdot 10^{-4}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$	$5,8 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$

измерения температуры плавления галлия и индия в ячейках при помощи ЭТС стержневого типа с кварцевым корпусом показали, что в диапазоне комнатных температур отвод тепла по корпусу эталонного термометра ЭТС-25 длиной 550 мм при частичном погружении в ячейку на глубину 125 мм не оказывает существенного влияния на результаты измерений. Этот вывод справедлив и для случаев измерения температуры плавления галлия прецизионным термопреобразователем сопротивления типа STS-100 с металлическим корпусом угловой формы длиной 350 мм и диаметром 4,1 мм.

На рис. 2 изображена мини-ячейка, разработанная на основе малогабаритной ампулы реперной точки галлия оригинальной конструкции [5]. Данная ячейка предназначена для воспроизведения кривых плавления различных термометрических веществ в микропроцессорных калибраторах температуры с рабочим объемом термостата, соответствующим цилиндру высотой 160 и диаметром 30 мм и более.

Сменная металлическая втулка 1 предназначена для уменьшения воздушного кольцевого зазора и улучшения теплопередачи к корпусу ячейки при помещении ее в цилиндрический колодец калибратора температуры с внутренним диаметром, превышающим наружный диаметр корпуса ячейки. При диаметре корпуса ячейки не более 25 мм и высоте корпуса 155 мм длина термометрового канала составляет не менее 125 мм. Такие размеры малогабаритных ячеек позволяют применять их по назначению в переносных микропроцессорных калибраторах температуры различных типов, что обеспечивает решение ряда актуальных задач в области метрологического обеспечения прецизионной термометрии. К числу таких задач относятся:

повышение качества измерений температуры эталонными и прецизионными платиновыми термометрами сопротивления благодаря оперативному периодическому контролю их стабильности, что позволит своевременно выявить изменения метрологических характеристик термометров в процессе их эксплуатации;

поверка и калибровка прецизионных термометров сопротивления, размеры и форма которых не совместимы с ампулами стандартных реперных точек;

возможность поверки прецизионных термометров и каналов измерений температур различных систем на местах эксплуатации;

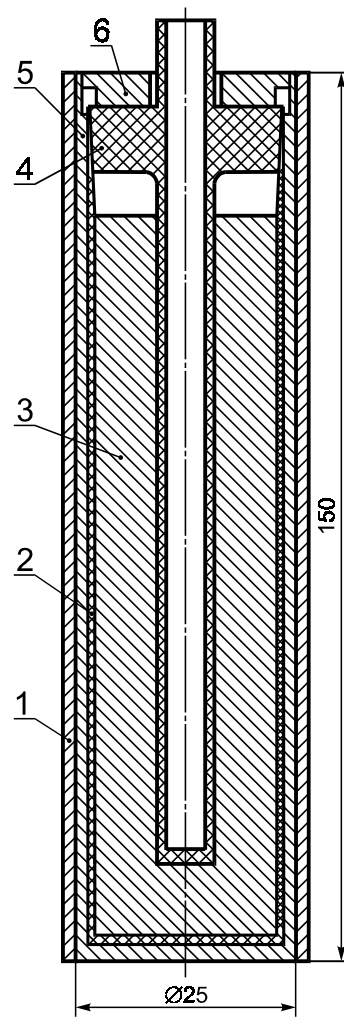


Рис. 2. Мини-ячейка для галлия, индия и других термометрических веществ:

1 — сменная втулка; 2 — фторопластовый стакан; 3 — термометрическое вещество; 4 — вкладыш для термометра; 5 — металлический корпус; 6 — гайка

создание переносных эталонов для поверочных и калибровочных лабораторий различных отраслей промышленности;

развитие новой формы организации поверки эталонных и индивидуально градуируемых термометров сопротивления в калибровочных лабораториях, расположенных в районах Крайнего Севера, Дальнего Востока и других отдаленных районов России без транспортировки в метрологические центры;

сокращение времени проведения исследований новых термометрических веществ, не входящих в число основных реперных точек МТШ-90.

На основе разработанных мини-ячеек и результатов статистической обработки многочисленных кривых плавления галлия была создана система контроля стабильности эталонных и прецизионных термометров в процессе их эксплуатации [6]. Система включает мини-ячейку с галлием, помещенную в рабочий объем микропроцессорного калибратора температуры утвержденного типа, прецизионный измеритель температуры типа МИТ 8.15 и персональный компьютер.

Метрологические характеристики калибраторов серий АТС и RTC были исследованы в процессе их испытаний для целей утверждения типа и при разработке рекомендаций по поверке средств измерений температуры. Эксперименты по воспроизведению кривых плавления галлия и индия в указанных калибраторах подтверждают возможность применения их в составе системы оперативного контроля стабильности эталонных и прецизионных термометров и для воспроизведения кривых плавления термометрических веществ. Суммарное время, достаточное для контроля стабильности одного термометра, включая охлаждение и нагрев мини-ячейки до начала фазового перехода, составило 90 мин. Предлагаемая система оперативного контроля стабильности термометров предназначена для поверочных и калибровочных лабораторий различных отраслей науки и техники, в которых применяются эталонные и прецизионные платиновые термометры сопротивления и микропроцессорные калибраторы температуры. Данная система демонстрировалась в рабочем режиме контроля стабильности индивидуально градуируемого платинового термопреобразователя сопротивления повышенной точности типа STS-100 с металлическим корпусом угловой формы на выставках «Метрология-2009» и «Метрология-2010».

Л и т е р а т у р а

1. Походун А. И., Васильев Е. В. Новая международная температурная шкала МТШ-90 // Законодательная и прикладная метрология. 1992. № 1. С. 28—32.
2. Дополнительная информация к Международной температурной шкале 1990 г. (Supplementary information for the International Temperature Scale of 1990). Sevres: BIPM, 1990.
3. Иванова А. Г., Корякова О. Н., Походун А. И. Международное сличение по МПТШ-68 тройной точки галлия // Измерительная техника. 1987. № 7. С. 37—38.
4. ГОСТ Р 8.571—98. ГСИ. Термометры сопротивления платиновые эталонные 1-го и 2-го разрядов. Методика поверки.
5. Пат. 2334960 РФ. Малогабаритная ампула реперной точки для градуировки прецизионных термометров и термопреобразователей в калибраторах температуры твердотельными термостатами / Е. В. Васильев, А. А. Игнатов, А. Н. Бахарев // Изобретения. Полезные модели. 2008. № 27.
6. Пат. 79333 РФ. Система контроля стабильности эталонных и прецизионных термометров в процессе их эксплуатации / Е. В. Васильев, А. А. Игнатов, А. Н. Бахарев // Изобретения. Полезные модели. 2008. № 36.

Дата принятия 13.08.2010 г.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

621.317.322

Особенности измерения переменного высокочастотного напряжения электронными вольтметрами

В. В. КРЕСТОВСКИЙ, Г. П. ТЕЛИТЧЕНКО, В. И. ШЕВЦОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: V.I.Schevtsov@vniim.ru

Рассмотрены особенности измерения переменного высокочастотного напряжения электронными вольтметрами для случаев, когда измеряемое переменное напряжение нормируется на входе пробника электронного вольтметра либо на входе специального проходного соединительного элемента, в который включен пробник вольтметра.

Ключевые слова: электронный вольтметр, переменное напряжение.

Peculiar properties of a.c. high frequency voltage measurement by electronic voltmeters are considered; for cases when measured a.c. voltage is determined at the input of the electronic voltmeter probe, or a.c. voltage is determined at the input of the special connecting element in which the voltmeter probe is plug in.

Key words: electronic voltmeter, a.c. voltage.

Электрическое напряжение — скалярная величина, равная линейному интегралу напряженности электрического поля вдоль рассматриваемого пути [1]. Данное определе-

ние целиком справедливо лишь для стационарных электрических полей. Для переменного электромагнитного поля, особенно высоких и сверхвысоких частот, выбор произволь-