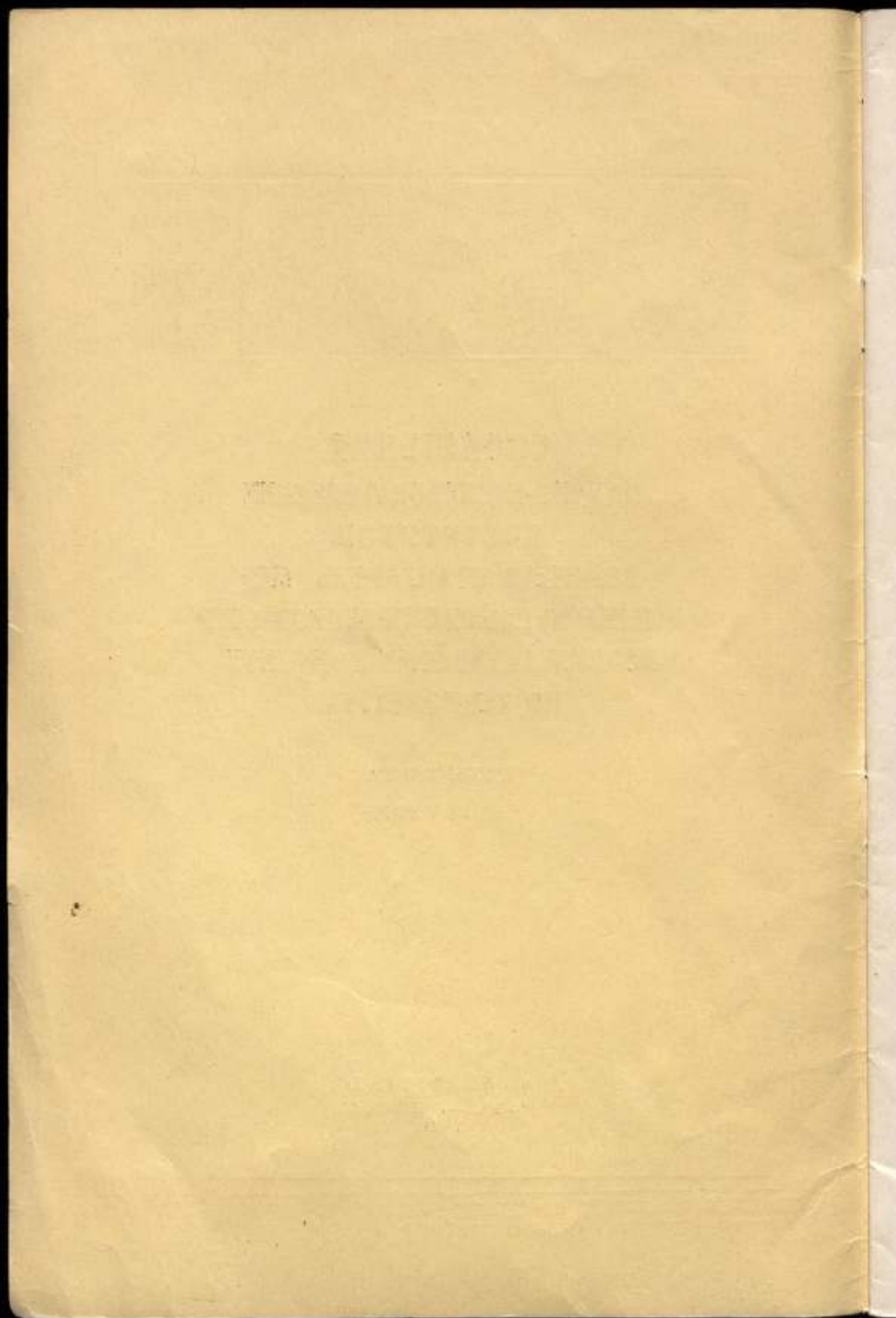


КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
**ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
ИМ. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА**

**СООБЩЕНИЯ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ
ИНСТИТУТОВ
КОМИТЕТА СТАНДАРТОВ, МЕР
И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ СССР
КОНСУЛЬТАТИВНОМУ КОМИТЕТУ
ПО ТЕРМОМЕТРИИ**

ТРУДЫ ВНИИМ
ВЫПУСК 36(96)

«СТАНДАРТГИЗ»
МОСКВА — ЛЕНИНГРАД
1958



КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ имени Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

СООБЩЕНИЯ

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИНСТИТУТОВ
КОМИТЕТА СТАНДАРТОВ, МЕР
И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ СССР
КОНСУЛЬТАТИВНОМУ КОМИТЕТУ
ПО ТЕРМОМЕТРИИ

ТРУДЫ ВНИИМ

ВЫПУСК 36(96)

БИБЛИОТЕКА
Всесоюзного научно-исследова-
тельского института метрологии
имени Д. И. Менделеева

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ
«СТАНДАРТИЗ»

МОСКВА — ЛЕНИНГРАД

1958

118225

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Предложения научно-исследовательских институтов Комитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР Консультативному Комитету по термометрии	3
Равноделенные ртутно-стеклянные термометры (В. П. Простяков, Ф. З. Алиева, Б. Н. Олейник)	6
Исследование воспроизводимости температуры затвердевания цинка высокой чистоты (Ф. З. Алиева)	9
Новый метод градуировки пирометров и новый точный оптический пирометр (В. Е. Финкельштейн, В. В. Кандыба)	16
Применение фотоэлектрического метода для точных работ в области оптической пирометрии (Л. А. Боярский, А. Н. Гордов, Г. Л. Исельсон, В. В. Кандыба, И. И. Киренков, В. А. Ковалевский, Г. А. Крахмальникова, Э. А. Лапина, К. Г. Тараян)	23

**ПРЕДЛОЖЕНИЯ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ ИНСТИТУТОВ
КОМИТЕТА СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
ПРИБОРОВ СССР КОНСУЛЬТАТИВНОМУ КОМИТЕТУ
ПО ТЕРМОМЕТРИИ**

Институтами системы Комитета стандартов, мер и измерительных приборов представлены Консультативному Комитету по термометрии в 1958 г. четыре сообщения.

В первом сообщении изложены результаты исследования во Всесоюзном научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ) нескольких наборов равноделенных ртутно-стеклянных термометров. Эти исследования показали, что благодаря небольшому интервалу температур, охватываемому шкалой каждого из термометров одного набора, показания равноделенного термометра с достаточной точностью ($0,001^\circ$) соответствуют температуре по международной шкале. Использование новой технологии искусственного старения термометров позволило обеспечить высокое постоянство нулевого показания термометров. Таким образом, в результате проведенной работы показано, что равноделенные ртутно-стеклянные термометры могут с успехом применяться для измерения температур в интервале $0-100^\circ\text{C}$ с точностью до тысячных долей градуса.

Во втором сообщении излагаются результаты исследования во ВНИИМ воспроизводимости температуры затвердевания цинка высокой чистоты. Исследованию были подвергнуты образцы цинка, взятые из различных месторождений (Канада, Польша, СССР). Изотопический состав этих образцов оказался очень близким. Поэтому установить наличие связи температуры затвердевания цинка и его изотопического состава не удалось. В работе показано, что сильные изменения условий эксперимента практически не влияют на температуру затвердевания цинка и среднее значение этой температуры по нашим измерениям оказалось практически совпадающим со значением, полученным Мак-Лареном в Оттаве. Воспроизводимость температуры затвердевания цинка почти на целый порядок выше, чем воспроизводимость температуры кипения серы, осуществляемой в соответствии со спецификациями Положения о международной температурной шкале 1948 года. Таким образом, в работе показано бесспорное преимущество точки цинка перед точкой серы для работ по воспроизведению температурной шкалы.

Третье сообщение содержит описание разработанного в Харьковском государственном институте мер и измерительных приборов

(ХГИМИП) нового метода градуировки точного визуального оптического пирометра до весьма высоких температур. Этот метод позволяет учитывать изменение с температурой излучателя ослабления поглощающего стекла пирометра и, тем самым, повысить точность градуировки этого прибора в той области температур, где она осуществляется только расчетным путем. Этот метод был применен для градуировки разработанного в том же институте точного оптического пирометра типа ЭОП-51. Исследование этого прибора показало, что он удобен в работе и обладает высокими метрологическими качествами.

Наконец, четвертое сообщение посвящено изложению исследований, проведенных во ВНИИМ и ХГИМИП по применению фотоэлектрического метода в точных работах по оптической пирометрии. В работе описывается объективная спектральная пирометрическая установка, позволяющая полностью исключить человеческий глаз как компарирующий прибор в исследованиях по воспроизведению шкалы яркостных и цветовых температур. Установка снабжена устройством, позволяющим осуществить воспроизведение шкалы в лучах любой длины волны от 0,45 до 1 мк и для температур в диапазоне от 1063° С и выше. Исследования показали, что воспроизведение температурной шкалы и градуировка температурных ламп на яркостные и цветовые температуры с помощью объективной установки осуществляется с погрешностями, существенно более низкими, чем соответствующие погрешности, возникающие при использовании визуальной аппаратуры. Таким образом, работа показывает широкие возможности, открывающиеся при использовании объективных методов в эталонных работах по оптической пирометрии.

На основании результатов своих исследований, изложенных как в представляемых сообщениях, так и опубликованных ранее, ВНИИМ, ХГИМИП и Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ) выносят на обсуждение Консультативного Комитета по термометрии следующие предложения.

1. С целью повышения воспроизводимости международной температурной шкалы в области $0 - 630^{\circ}\text{C}$ целесообразно ввести температуру затвердевания цинка в число перанчных реперных точек (взамен температуры кипения серы), приписав ей числовое значение $419,504^{\circ}\text{C}$.

2. Провести в ближайшие годы второй тур международных сличений термометров сопротивления, осуществив эти сличения по трем точкам (тройной точке воды, точке кипения воды и точке затвердевания цинка). Хорошо изученные термометры сопротивления ВНИИМ может выделить и направить в ту национальную лабораторию, которая будет указана Международным Бюро мер и весов.

3. Рекомендовать национальным лабораториям, располагающим соответствующими возможностями, ввести объективные методы измерений в практику работ по воспроизведению и сличению температурных шкал яркостных и цветовых температур.

4. Осуществить в 1959—1960 гг. международные круговые сличения температурных ламп в интервале температур — яркостных ($\lambda = 0,65$ мк) от 1063 до 1600° С и цветовых от 1063 до 1800° С. Изученные лампы для этой цели ВНИИМ и ХГИМИП могут выделить и направить в ту национальную лабораторию, которая будет указана Международным Бюро мер и весов.

5. В настоящее время дальнейшее приближение международной шкалы к термодинамической в области выше 1063° С лимитируется отсутствием надежных данных о числовом значении температуры затвер-

девания золота. Исходя из этих соображений, а также из необходимости уточнения температуры затвердевания цинка, целесообразно провести в ряде крупных метрологических национальных лабораторий в течение 1959 г. измерения с помощью газового термометра температур затвердевания цинка и золота. Результаты этих измерений должны быть представлены на рассмотрение XI Генеральной конференции по мерам и весам с целью установления новых уточненных значений этих реперных точек.

6. Своевременно подготовить расширение практической шкалы температур на область $90^{\circ} - 10^{\circ} \text{K}$. В нескольких странах, так же как в СССР, существуют шкалы для этой области температур, хранимые посредством платиновых термометров сопротивления. Международному соглашению об установлении практической шкалы между 90 и 10°K должно предшествовать сравнение существующих шкал.

Предлагается произвести сопоставление шкал путем кругового сличения платиновых термометров сопротивления, градуированных в градусах этих шкал.

Хорошо изученные термометры сопротивления для этой области температур ВНИИФТРИ может направить в ту национальную лабораторию, которая будет указана Международным Бюро мер и весов.

В. П. ПРОСТЯКОВ, Ф. З. АЛИЕВА, Б. Н. ОЛЕЙНИК

РАВНОДЕЛЕННЫЕ РТУТНО-СТЕКЛЯННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

В последние годы в практике исследовательских и промышленных лабораторий СССР нашли применение палочные ртутно-стеклянные термометры с укороченной шкалой.

Каждый набор из 20 таких термометров охватывает интервал температур 0—100° С.

Термометры изготовлены из стекла со следующим химическим составом в процентах:

SiO ₂ — 67,1	CaO — 7,0
Al ₂ O ₃ — 2,5	ZnO — 7,2
B ₂ O ₃ — 2,2	Na ₂ O — 14,0

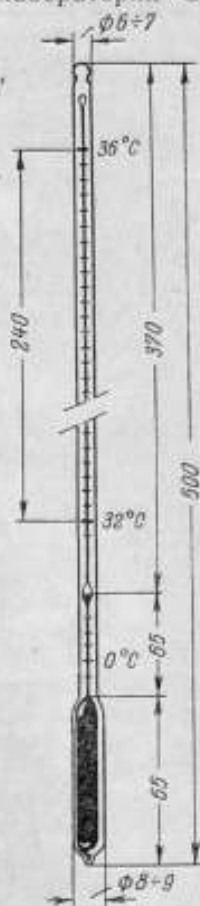


Рис. 1.

Эти термометры — равноделенные и не имеют эмалевой полосы. Термометры, предназначенные для измерения температур в интервале 0—60° С, имеют цену деления в 0,01° С и оцифрованы через 0,2° С, а для измерения в интервале 60—100° С имеют цену деления в 0,02° С и оцифрованы через 0,5° С. Каждый термометр имеет нулевую отметку шкалы.

Расстояние между соседними штрихами любого термометра составляет 0,6 мм, кроме термометров со шкалой от 0 до 4° С, у которых это расстояние равно 0,72 мм. Толщина штрихов шкалы равна 0,02—0,05 мм.

На рис. 1 указаны основные размеры термометров.

Интервал температуры 0—60° С перекрывается набором из 15 термометров, каждый из которых охватывает участок температурной шкалы в 4° С. Область температур 60—100° С перекрывается 5 термометрами, каждый из которых охватывает участок на шкале температур в 8° С.

При изготовлении обычных ртутно-стеклянных термометров градуировку производят по нескольким выбранным температурным отмет-

кам, а расстояние между двумя соседними отметками делят на равные части. В этом случае расстояние между соседними штрихами на разных участках шкалы термометра будет различно. Технология изготовления равноделенных термометров несколько отличается от обычной. Вначале на поверхность отоженных стеклянных капиллярных трубок наносят нужное количество штрихов на равном расстоянии один от другого и производят объемное калибрование каждой трубки. Затем, определив емкость канала капиллярной трубки, изготавливают основной резервуар термометра, предварительно рассчитав его объем.

Определение поправок на калибр производилось как простым, так и полным калиброванием [1]. Кривые поправок на калибр, определен-

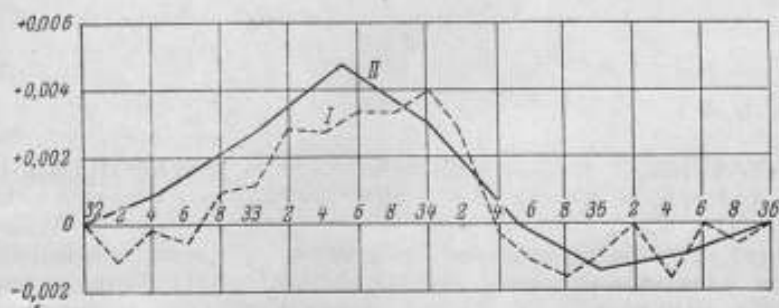


Рис. 2.

ные тем и другим методом, имеют одинаковый характер. Для примера на рис. 2 изображены поправки на калибр термометра № 278 с пределами шкалы 32—36° С. Как видно из графика, поправки, полученные при полном калибровании (кривая I), меняются по всей шкале плавно, без всяких изломов. Они отличаются от поправок, полученных при простом калибровании (кривая II), в отдельных точках не более чем на 0,002° С.

Для определения поправок каждого термометра относительно международной температурной шкалы достаточно определить их значение для двух крайних отметок шкалы термометра. Тогда, используя результаты калибрования, легко вычислить поправки для любой промежуточной отметки. Путем непосредственной поверки равноделенных термометров по платиновому термометру сопротивления через 1° С было показано, что такой способ определения поправок в промежуточных отметках шкалы приводит к погрешности, не превышающей погрешности непосредственной поверки, т. е. $\pm 0,002^\circ \text{C}$.

В результате изучения равноделенных термометров установлено, что:

- абсолютные величины поправок в отдельных отметках шкал не превышают $0,02^\circ \text{C}$;
- разность поправок термометров в двух соседних отметках, соответствующих целым значениям градусов, не превышает $0,02^\circ \text{C}$;
- депрессия нуля при нагреве на 100°C не больше $0,04^\circ \text{C}$;
- константы термической инерции различных термометров, измеренные в перемешиваемой воде, находятся в пределах 4—6 сек.; они определены методом регулярного теплового режима [2]; константы термической инерции платиновых термометров сопротивления типа Стрелкова [3], с которыми были проведены сличения равноделенных термометров, имели величину 7 сек.;

д) стекло равноделенных термометров было состарено таким образом, что повышение нулевой точки термометров за 5 лет оказалось меньше $0,015^\circ \text{C}$. В результате исследования 109 термометров было установлено, что их коэффициенты внутреннего давления находятся в пределах $0,00013 < \beta_i < 0,00017$ град/мм рт. ст.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов М. М., Термометрия и калориметрия, изд. МГУ, 1952.
2. Кондратьев Г. М., Регулярный тепловой режим, ГИТТЛ, Москва, 1954.
3. Бриллиантов Н. А., Ливьков В. И. и Стрелков П. Г., Труды МГИМИП, вып. 3, 1950.

Ф. Э. АЛЛЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗАТВЕРДЕВАНИЯ ЦИНКА ВЫСОКОЙ ЧИСТОТЫ

Требования науки и техники к точности измерения температур в интервале $0 \div 630^\circ\text{C}$ за последние годы значительно возросли. Удовлетворение этих требований, однако, не может быть обеспечено уже в процессе воспроизведения шкалы, вследствие наличия в составе первичных репер точки кипения серы. Точность воспроизведения этой точки $\pm (0,001 \div 0,002)^\circ\text{C}$, являющаяся сама по себе недостаточно высокой, достигается в результате сложных условий опыта, из которых наиболее обременительным является необходимость предварительного кипячения серы почти в течение суток. Такие условия трудно выполнимы в повседневной лабораторной практике, поэтому зачастую приходится проводить измерения в точке серы непосредственно после начала ее кипения. Тогда погрешность воспроизведения возрастает до $\pm (0,005 \div + 0,01)^\circ\text{C}$.

Повышение точности воспроизведения шкалы температур вблизи 400°C возможно, как это было указано в более ранних наших предложениях [1], если вместо температуры кипения серы применять темпера-

Таблица 1

Образцы цинка		Содержание примесей в %					Изотопический состав в %				
		Pb	Fe	Cl	Cu	Sn	64	66	67	68	70
СССР, месторо- ждение — Восточный Казахстан	№ 1	0,001	0,0005	0,0005	0,00005	—	49,4	27,8	3,8	18,3	0,6
	№ 2	0,0001	0,0002	0,00005	0,00003	—					
	№ 3	0,00002	0,00002	0,00001	0,000001	0,000002					
Польша, месторо- ждение — Силезия	№ 4	0,001	0,0001	0,00001	0,00002	—	48,7	27,9	4,0	18,8	0,6
	№ 5	0,00001	0,00001	0,00005	0,00001	—					
Канада	CP	0,0001	0,0004	0,00005	0,00005	0,00005	50,2	27,3	3,9	18,1	0,5
	SP	0,0002	—	0,00005	—	Следы					

туру затвердевания цинка. Целесообразность такой замены должна быть, очевидно, подтверждена экспериментами, проведенными в национальных лабораториях. Соответствующие экспериментальные исследования к настоящему времени проведены в Национальном научно-исследовательском Совете в Канаде и во ВНИИМ в СССР.

Для проведения эксперимента ВНИИМ располагал образцами цинка различных месторождений: Канады, Польши и СССР.

Чистота образцов и их изотопический состав приводятся в табл. 1.

АППАРАТУРА И ПРИБОРЫ

Образец цинка, имеющий навеску в 1200 г, плавил в графитовом тигле с внутренним диаметром 40 мм и высотой 180 мм. Тигли изготовлены из графита, имеющего зольность 0,003%. Контрольная проверка чистоты цинка, произведенная методом спектрального анализа, показала, что металл в процессе проведения экспериментов не загрязняется.

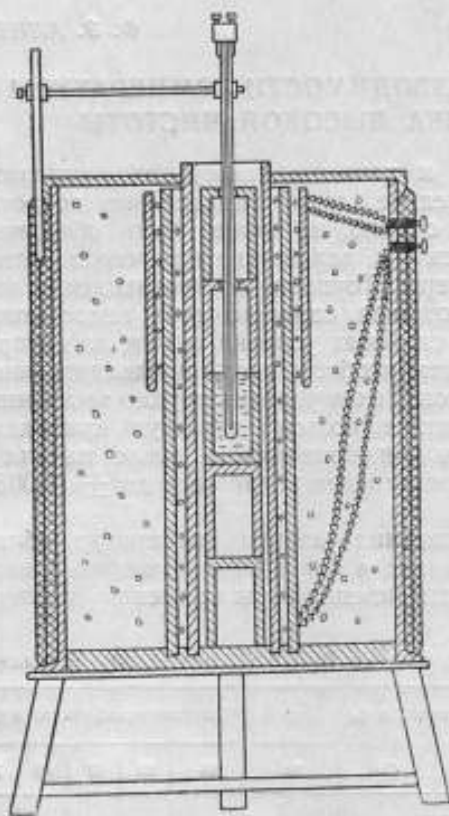


Рис. 1.

Для нагревания цинка применяли две печи различной конструкции: в одной для выравнивания температурного поля служил массивный медный блок, а во второй — на фарфоровую трубу в верхней трети печи была намотана поверх основной дополнительной нагревательная обмотка (рис. 1).

Исследование температурного поля печей, проведенное с помощью термометры, показало, что оно однородно в пределах $\pm 0,2^\circ\text{C}$ на участке большем, чем высота тигля (рис. 2 — для печи с медным блоком и рис. 3 — для печи с дополнительной обмоткой). Для практической работы печь без медного блока оказалась более удобна, вследствие своей малой инерционности.

Измерения производили с помощью термометров сопротивления типа Стрелкова. Сопротивление термометра определяли на низкоомном потенциометре, кото-

рый вместе с чувствительным гальванометром позволяет надежно измерить падение напряжения с семью значащими цифрами.

Падение напряжения на зажимах термометра сопротивления, погруженного в цинк, сравнивали с падением напряжения на зажимах образцовой меры сопротивления особого устройства. Эта образцовая мера, конструктивно выполненная в виде термометра сопротивления, хранится в весьма надежном термостате — тройной точке воды, благодаря чему значительно повышается стабильность меры. Выбор значения меры, с точностью $\pm 0,01\%$, равным сопротивлению платинового тер-

мометра при температуре затвердевания цинка позволяет в значительной степени снизить влияние погрешности потенциометра. В качестве материала для чувствительного элемента меры применяли проволоки

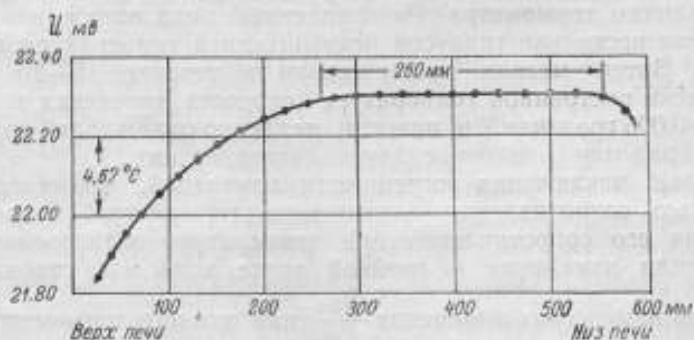


Рис. 2.

из золотохромового сплава и манганина. Оба материала дали удовлетворительные результаты.

Сосуд тройной точки воды (термостат) имеет следующие размеры: диаметр внутренней трубки — 60 мм, наружной — 200 мм; длина сосуда

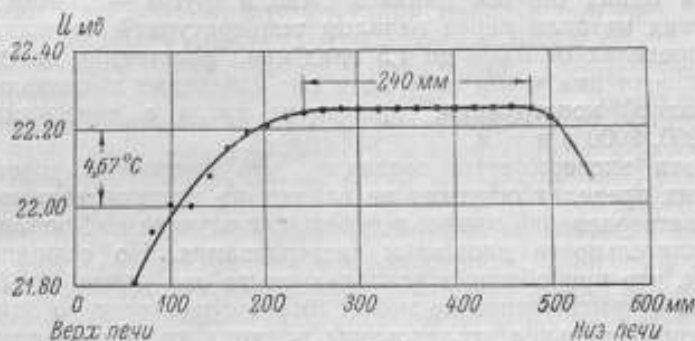


Рис. 3.

600 мм. Сосуд всегда находится в ванне со льдом, благодаря чему обеспечивается сохранность ледяной рубашки в течение продолжительного времени (около одного месяца).

ЭКСПЕРИМЕНТ

При определении температуры затвердевания тигель с цинком, помещенный в высокий кварцевый стакан, устанавливали в печь на участке с наиболее равномерной температурой. Тигель закрывали крышкой, поверх которой устанавливали несколько графитовых стаканчиков. Крышка и стаканчики по их оси имеют отверстия для ввода кварцевой пробирки, служащей для погружения термометра в расплавленный металл. Применение кварцевой пробирки вызывается необходимостью предохранить элемент термометра от повреждения в случае появления трещины на его защитном колпачке при погружении в жидкий металл. Размеры пробирки подбирали такими, чтобы зазор между внутренней поверхностью пробирки и защитным колпачком термометра был не более 1 мм. Пробирку опускали в металл коаксиально до

дна тигля, затем поднимали на 1—2 см, после чего закрепляли неподвижно. Поместив в пробирку термометр и присоединив его к измерительной установке, дальнейшую регулировку режима печи производили по показаниям термометра. Расплавленный цинк охлаждали до температуры, на несколько градусов превышающей температуру его затвердевания. Затем металл выдерживали в течение 15—20 мин. при практически постоянной температуре (скорость изменения температуры не более 0,005 град/мин.) и, наконец, медленно охлаждали (со скоростью 0,2—0,3 град/мин.) до температуры затвердевания.

С целью исключения погрешности измерений, вызываемой нестабильностью сопротивления платинового термометра, после каждого измерения его сопротивления при температуре затвердевания цинка производили измерения в тройной точке воды и о стабильности t_{Zn}

судили по изменению отношения $\frac{R_{Zn}}{R_{19}}$ для данного термометра.

При практическом осуществлении температуры затвердевания цинка, так же как и любой другой реперы, всегда могут иметь место некоторые вариации условий опыта. Для оценки влияния этих вариаций на стабильность температуры t_{Zn} мы производили измерения при условиях опыта, значительно отличающихся от условий, принятых для нормальной работы. Например, выдержка перед температурной площадкой в одних опытах длилась 1 час, в других — 15 мин.; скорость охлаждения металла перед началом температурной площадки колебалась в пределах от 0,005 до 1,5 град/мин.; расстояние нижнего конца термометра от дна тигля от 1 до 4 см; измерения производили в двух печах разной конструкции, применяли тигли с навесками металла в 800, 1200, 2000 г и т. д.

Все эти эксперименты показали, что изменения условий опыта в широких пределах ощутимо не влияют на воспроизводимость температуры затвердевания цинка; в отдельных случаях наблюдалось уменьшение длительности площадки затвердевания. Но если принять во внимание, что при обычных условиях опыта она равна 40—50 мин., то некоторое ее уменьшение не может иметь существенного значения.

Экспериментальное исследование влияния колебаний атмосферного давления на температуру затвердевания цинка показало, что это влияние практически отсутствует.

Было определено значение температуры затвердевания образца цинка № 3 с помощью четырех платиновых термометров сопротивления, градуированных в точках плавления льда (с применением тройной точки воды), кипения воды и серы. Полученное значение равно 419,504° С (табл. 2). Разброс численных значений температуры затвердевания цинка, приведенных в этой таблице, является следствием значительной погрешности градуировки термометров в точке кипения серы. Здесь будет уместно заметить, что при исследованиях, производившихся во ВНИИМ в 1951 г., в области 400 ÷ 1063° С было получено для t_{Zn} явно завышенное значение: 419,59° С. Это объясняется не только тем, что температура кипения серы при этих экспериментах была занижена, но и возможным наличием значительного количества железа и меди в использованном образце цинка, данные о чистоте которого, к сожалению, отсутствуют.

В Национальном научно-исследовательском Совете (Оттава) для температуры затвердевания образцов цинка, чистота которых идентична чистоте использованных в данной работе, получено значение t_{Zn} , практически совпадающее с нашим результатом и равное 419, 505° С.

Таблица 2

№ опыта	Температура затвердевания образца цинка № 3 (t_{Zn} в °C)			
	платиновые термометры сопротивления			
	№ 3	№ 51-9	№ 51-11	№ 51-13
1	419,501	419,506	419,499	419,506
2	419,506	419,506	419,509	419,511
3	—	419,507	419,508	419,510
4	—	419,508	419,500	419,506
5	—	419,508	419,499	419,507
6	—	419,502	419,498	419,508
7	—	419,504	419,499	419,505
8	—	419,502	419,500	—
9	—	—	419,499	—
Среднее значение			419,504	

Измерение температуры затвердевания цинка с помощью газового термометра во ВНИИМ намечено осуществить в 1959 г.

Для проведения исследований лаборатория располагала семью образцами цинка с различным содержанием примесей. Можно полагать, что чистота всех образцов достаточно удовлетворительна для создания реперной точки. Такое предположение было проверено экспериментально. Для каждого образца цинка одним и тем же термометром были измерены величины $\frac{R_{Zn}}{R_{TP}}$. В табл. 3 приведены средние значения этих отношений для каждого образца, полученные из 5—6 серий. Там же даны значения температур затвердевания всех исследованных образцов, вычисленные путем определения отклонений средних значений отношений $\frac{R_{Zn}}{R_{TP}}$ от значения отношения, измеренного тем же термометром на образце № 3. Температура затвердевания образцов № 1, 4 и SP практически совпадает с температурой образца № 3. Что касается несколько высокого значения температуры для образцов № 2 и CP — возможно оно получилось из-за влияния примесей железа. Правда, в образце № 1 железа еще больше, но его влияние может компенсироваться наличием в этом образце значительного количества свинца. Приближенный теоретический расчет по формуле Рауля — Ван-Гоффа показал, что если в образце цинка имеются примеси различных металлов в количествах,

Таблица 3

Номера или марки образцов	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	CP	SP
$\frac{R_{Zn}}{R_{TP}}$	2,566664	2,566667	2,566665	2,566663	2,566666	2,566668	2,566666
t_{Zn} в °C	419,5037	419,5046	419,504	419,5034	419,5043	419,5048	419,5043

указанных в табл. 4, то каждый из этих металлов меняет температуру затвердевания цинка на $0,0002^\circ\text{C}$. Однако суммарное действие всех перечисленных металлов может быть различным в зависимости от их процентного соотношения.

Таблица 4

Содержание примесей в образце цинка (к расчету по формуле Раули — Ван-Гоффа) в %				
Pb	Fe	Cd	Cu	Sn
0,00011	0,00003	0,00006	0,00004	0,00007

Наблюдения за воспроизводимостью температуры затвердевания цинка осуществлялись в течение 13 месяцев. Исследование каждого образца повторяли через два-три месяца. Результаты измерений по образцу № 3 приведены в табл. 5. Сопротивление термометра в процессе проведения эксперимента хотя и возрастало, но отношение $\frac{R_{Zn}}{R_{Tp}}$ оставалось постоянным со средним квадратичным отклонением, равным $\pm 2 \cdot 10^{-6}$, что соответствует среднему квадратичному отклонению температуры затвердевания цинка в $\pm 5 \cdot 10^{-4}^\circ\text{C}$. О воспроизводимости температуры кипения серы можно судить по данным табл. 6.¹

Таблица 5

Сопротивление платинового термометра № 51-13 при температуре затвердевания цинка (образец № 3)			
№ опыта	R_{Zn} в омх	R_{Tp} в омх	$\frac{R_{Zn}}{R_{Tp}}$
1	25,88119	10,08358	2,566667
2	25,88121	10,08359	2,566666
3	25,88124	10,08361	2,566664
4	25,88126	10,08362	2,566664
5	25,88124	10,08362	2,566662
6	25,88125	10,08360	2,566668
7	25,88124	10,08361	2,566664
8	25,88132	10,08364	2,566664
9	25,88173	10,08380	2,566664
10	25,88174	10,08382	2,566660
11	25,88176	10,08380	2,566667
12	25,88192	10,08387	2,566665
13	25,88191	10,08387	2,566664
14	25,88192	10,08387	2,566665
15	25,88192	10,08387	2,566665
16	25,88195	10,08388	2,566666
17	25,88192	10,08388	2,566663
Среднее			2,566665

¹ Измерения производились в начальной стадии кипения серы.

Сопротивление платиновых термометров при температуре кипения серы						
№ опыта	№ 51-7			№ 51-13		
	R_S в омах	R_{TP} в омах	$\frac{R_S}{R_{TP}}$	R_S в омах	R_{TP} в омах	$\frac{R_S}{R_{TP}}$
1	24,79014	9,33782	2,654810	26,76056	10,08396	2,653775
2	24,79005	9,33778	2,654822	26,75970	10,08388	2,653711
3	24,79120	9,33788	2,654907	26,76047	10,08379	2,653811
4	24,79100	9,33792	2,654874	26,76059	10,08378	2,653825
5	—	—	—	26,76022	10,08376	2,653794

Опыт показал, что равновесное состояние между жидкой серой и ее парами стабильно в пределах $\pm 0,005^\circ \text{C}$, а между жидкой и твердой фазами цинка — в пределах $\pm 0,0005^\circ \text{C}$.¹

Проведенная в метрологических лабораториях Канады и СССР работа позволяет сделать вывод о том, что международная шкала температур может быть воспроизведена с большей точностью, если вместо температуры кипения серы в качестве одной из первичных репер применять температуру затвердевания цинка. В связи с этим можно рекомендовать введение температуры затвердевания цинка в практику эталонных работ термометрических лабораторий уже теперь, приписав этой температуре временно значение $419,504$ или $419,505^\circ \text{C}$.

По нашему мнению настало время расширить интервал температур, в которых осуществляются международные сличения температурных шкал. Мы считаем целесообразным в ближайшие годы провести новый круг международных сличений термометров сопротивления, включив в их программу сличения при температуре затвердевания цинка.

Для дальнейшего приближения практической шкалы температур к термодинамической необходимо определение положения цинковой точки на термодинамической шкале. Мы считаем целесообразным проведение измерений температуры затвердевания цинка газовым термометром в разных национальных лабораториях, приурочив представление результатов измерений к XI Генеральной конференции по мерам и весам.

В проведении данной работы принимали участие Ю. Ф. Фальберг (экспериментальные и расчетные работы), К. Я. Брегман (получение чистого цинка), Н. П. Грудинкина (аттестация чистоты цинка), Г. Э. Карстенс — Институт физических проблем АН СССР (определение изотопического состава цинка).

ЛИТЕРАТУРА

1. Procès-verbaux des Séances, rapports et annexes, Session de 1952, Comité Consultatif de Thermométrie, série 2, tome XXIII-B, 1953.
2. McLaren E. H., Journal of Applied Physics, vol. 25, № 6, 1954, p. 808.
3. Preston-Thomas H., Temperature its measurements and control, vol. 2, 1955, p. 169.
4. McLaren E. H., Canadian Journal of Physics, vol. 1, 1957, p. 67—90.

¹ Измерения производились в начальной стадии кипения серы.

НОВЫЙ МЕТОД ГРАДУИРОВКИ ПИРОМЕТРОВ И НОВЫЙ ТОЧНЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ПИРОМЕТР

Градуировка любого оптического пирометра в области высоких температур, как известно, производится путем использования какой-либо редуцирующей системы, дающей возможность произвести уравнивание яркости черного тела температуры T с яркостью черного тела, имеющего более низкую температуру T_0 .¹

Уравнение, на основании которого производится экстраполяция, имеет вид

$$\int_0^{\infty} \lambda^{-5} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \tau'_\lambda v_\lambda \tau_\lambda d\lambda = \int_0^{\infty} \lambda^{-5} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T_0}} - 1 \right)^{-1} v_\lambda \tau_\lambda d\lambda, \quad (1)$$

где τ'_λ — коэффициент пропускания поглотителя для света длины волны λ ;

τ^λ — то же для красного светофильтра пирометра;

v_λ — видность глаза.

В качестве редуцирующих систем используются обычно поглощающие стекла, что приводит к значительному понижению точности воспроизведения температурной шкалы, так как погрешность измерения коэффициента пропускания поглощающего стекла очень велика.

Возможно, однако, показать, что зависимость между T и T_0 может быть определена экспериментально, без решения уравнения (1) и измерения величины τ'_λ [1].²

Заметим, что правую часть уравнения (1) можно упростить, подставив вместо двучлена $\left(e^{\frac{c_2}{\lambda T_0}} - 1 \right)^{-1}$ одночлен $e^{-\frac{c_2}{\lambda T_0}}$. Так как T_0 меньше 2000° K, то совершаемая при этом погрешность пренебрежимо мала.

Введем далее вспомогательную величину T_w , определяемую равенством

$$\int_0^{\infty} \lambda^{-5} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \tau'_\lambda v_\lambda \tau_\lambda d\lambda = \int_0^{\infty} \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T_w}} \tau'_\lambda v_\lambda \tau_\lambda d\lambda, \quad (2)$$

¹ Последнюю величину мы будем называть кажущейся яркостной температурой. Практически T_0 всегда выбирается меньшим 2000° K.

² См. авторское свидетельство В. Е. Финкельштейна № 104412, 1956 г.

Тогда уравнение (1) можно переписать в виде

$$\int_0^{\infty} \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T_w}} \tau_{\lambda} v_{\lambda} \tau_{\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T_0}} v_{\lambda} \tau_{\lambda} d\lambda. \quad (3)$$

Система уравнений (2) и (3) эквивалентна одному уравнению (1) и дает возможность найти зависимость между T и T_0 методом последовательных приближений в виде суммы

$$T = T_w + \Delta T, \quad (4)$$

где T_w есть решение уравнения (3), а $\Delta T = T - T_w$ — поправка, вычисляемая с помощью уравнения (2).

Как известно, решение уравнения (3) может быть записано в виде

$$\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_w} = A. \quad (5)$$

Назовем величину A , определяемую уравнениями (3) и (5), пирометрическим ослаблением поглотителя и будем рассматривать ее как функцию кажущейся температуры T_0 ¹. Этим формальным определением величины $A(T_0)$ мы будем пользоваться всегда — независимо от того, насколько велико в рассматриваемом случае расхождение между формулами Вина и Планка.

Пирометрическое ослабление поглотителя при измерении некоторой высокой температуры T_2 , которой соответствует кажущаяся яркостная температура $T_{0,2}$, определяется системой двух уравнений:

$$\int_0^{\infty} \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T_{w,2}}} \tau_{\lambda} v_{\lambda} \tau_{\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T_{0,2}}} v_{\lambda} \tau_{\lambda} d\lambda, \quad (6)$$

$$A(T_{0,2}) = \frac{1}{T_{0,2}} - \frac{1}{T_{w,2}}. \quad (7)$$

Наша задача заключается в определении величины $A(T_{0,2})$, т. е. в нахождении зависимости между $T_{0,2}$ и $T_{w,2}$.

Для обоснования метода экспериментального определения величины $A(T_{0,2})$ представим себе, что на окуляр пирометра надета дополнительная насадка с цветным стеклом, коэффициент пропускания которого для света длины волны λ равен

$$\tau_{\lambda} = \tau e^{-\frac{a c_2}{\lambda}} \quad (8)$$

(τ и a — некоторые положительные постоянные).

Найдем пирометрическое ослабление поглотителя пирометра с насадкой, соответствующее некоторой другой кажущейся яркостной температуре $T_{0,1}$ [мы будем его обозначать $A'(T_{0,1})$]. Оно равно

$$A'(T_{0,1}) = \frac{1}{T_{0,1}} - \frac{1}{T_{w,1}}, \quad (9)$$

где $T_{w,1}$ — новая вспомогательная величина, определяемая уравнением

$$\int_0^{\infty} \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T_{w,1}}} \tau_{\lambda} v_{\lambda} \tau_{\lambda} e^{-\frac{a c_2}{\lambda}} d\lambda = \int_0^{\infty} \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T_{0,1}}} v_{\lambda} \tau_{\lambda} e^{-\frac{a c_2}{\lambda}} d\lambda, \quad (10)$$

¹ T_w является функцией независимой переменной T_0 .

Если

$$\frac{1}{T_{0,2}} = \frac{1}{T_{0,1}} - \alpha, \quad (11)$$

то правые части уравнений (10) и (6) будут тождественны и можно приравнять левые части этих уравнений. Из этого вытекает, что

$$-\frac{1}{T_{w,2}} = -\frac{1}{T_{w,1}} + \alpha = -\frac{1}{T_{w,1}} + \left(\frac{1}{T_{0,1}} - \frac{1}{T_{0,2}}\right). \quad (12)$$

Подставляя $\frac{1}{T_{w,1}}$ из (12) в (9), получаем:

$$A'(T_{0,1}) = \frac{1}{T_{0,1}} - \frac{1}{T_{w,1}} = \frac{1}{T_{0,2}} - \frac{1}{T_{w,2}} = A(T_{0,2}). \quad (13)$$

Таким образом, искомое пирометрическое ослабление $A(T_{0,2})$, соответствующее кажущейся яркостной температуре $T_{0,2}$, равно пирометрическому ослаблению, которое получится для кажущейся яркостной температуры $T_{0,1}$, если на окуляр пирометра надеть насадку с цветным стеклом, удовлетворяющим условиям (8) и (11), т. е. условию

$$\tau_{\lambda}^0 = \varepsilon \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T_{0,2}} - \frac{1}{T_{0,1}}\right)}. \quad (14)$$

Это обстоятельство дает возможность заменить измерение величины $A(T_{0,2})$ измерением равной величины $A'(T_{0,1})$. Определение величины $A'(T_{0,1})$ не представляет труда благодаря тому, что кажущейся яркостной температуре $T_{0,1}$ соответствуют меньшие значения величин T и T_w , чем кажущейся яркостной температуре $T_{0,2}$, так как по условию $T_{0,1} < T_{0,2}$.

Так например, если величине $T_{0,2} = 1700^\circ \text{K}$ соответствует температура $T = 6300^\circ \text{K}$, то величине $T_{0,1} = 1200^\circ \text{K}$ соответствует (при использовании того же поглотителя) величина $T \approx 2500^\circ \text{K}$.

При температурах, меньших 3000°K , разностью $\Delta T = T - T_w$ можно пренебречь. Поэтому для определения величины $A'(T_{0,1})$ достаточно одновременно измерить величины T_1 и $T_{0,1}$, визируя черное тело (или температурную лампу), температура которого не превосходит $2200-2500^\circ \text{C}$.

Нужно иметь в виду, что зависимость между силой тока в пирометрической лампочке i и кажущейся яркостной температурой T_0 — т. е. температурой черного тела, на фоне которого (при выведенном поглотителе) исчезает нить, — изменяется при изменении красного светофильтра пирометра. Поэтому для каждого дополнительного светофильтра нужно заранее определить эту зависимость (при температуре $\approx T_{0,1}$).

Пропускание светофильтра окулярной насадки, как это видно из уравнения (14), с точностью до произвольной постоянной однозначно определяется кажущимися яркостными температурами $T_{0,1}$ и $T_{0,2}$. Поэтому один набор стеклянных светофильтров дает возможность производить изучение поглотителей любых пирометров.

Оптическая плотность D_{λ} светофильтра окулярной насадки для света длины волны λ , как легко видеть, должна удовлетворять уравнению

$$D_{\lambda} = a - \frac{b}{\lambda}, \quad (15)$$

где

$$a = -\lg \varepsilon \quad \text{и} \quad b = -c_2 \left(\frac{1}{T_{0,2}} - \frac{1}{T_{0,1}} \right) \lg e.$$

Условию (15) хорошо удовлетворяют светофильтры, получаемые склеиванием нескольких сине-зеленых стекол. Подробности, касающиеся

изготовления таких светофильтров, описаны нами в других статьях [1]. На рис. 1 показана зависимость D_λ от $\frac{1}{\lambda}$ у одного из исследованных нами светофильтров.

Изменяя толщины стекол, можно изготовить набор светофильтров, позволяющий, производя измерения при одном и том же $T_{0,1}$, получать значения A , соответствующие различным $T_{0,2}$.

Вывод равенства (13) является совершенно строгим, если используемое цветное стекло точно удовлетворяет уравнению (8). Однако на практике цветное стекло удовлетворяет этому условию только с некоторым приближением. В результате при измерении величины $A(T_{0,2})$ может возникнуть погрешность. Оценить величину этой погрешности можно следующим образом.

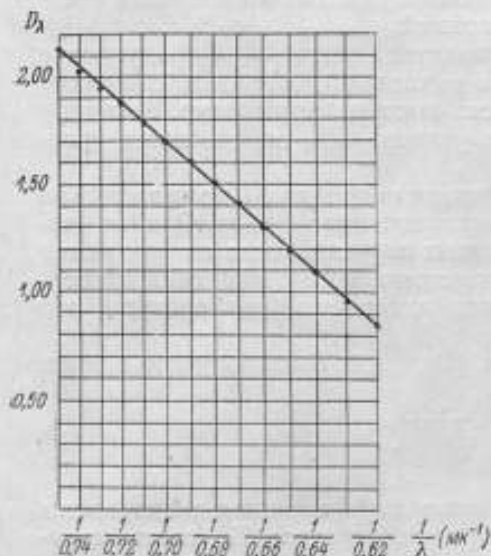


Рис. 1.

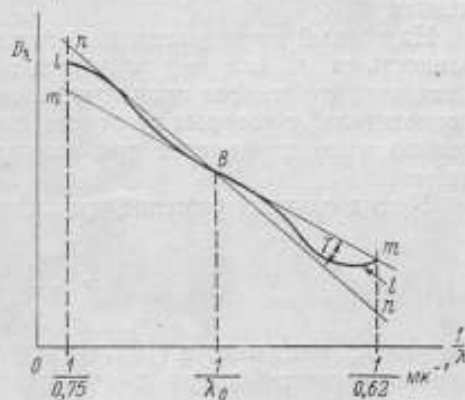


Рис. 2.

Нарисуем график, изображающий зависимость D_λ для сине-зеленого светофильтра окулярной насадки от $\frac{1}{\lambda}$ (кривая l на рис. 2). Через каждую точку кривой l (например, точку B) проведем такую пару прямых m и n , чтобы все точки кривой l оказались между ними, причем угол γ , образуемый пересечением прямых m и n , имеет минимальное значение.

Выберем из всей совокупности прямых n прямую, образующую минимальный угол с осью абсцисс, а из всей совокупности прямых m — прямую, образующую максимальный угол с осью абсцисс; первую прямую обозначим n' , вторую m' .

Выполнив соответствующие расчеты, можно показать, что величина пиометрического ослабления, получающаяся при использовании окулярной насадки со стеклом, характеризуемым кривой l , лежит между величинами, которые получались бы при использовании светофильтров, характеризуемых прямыми n' и m' . Другими словами, полученное пиометрическое ослабление заключено между близкими величинами $A(T_{0,m'})$ и $A(T_{0,n'})$, причем величины $T_{0,m'}$ и $T_{0,n'}$ определяются через $T_{0,1}$ и углы наклона прямых m' и n' .

Поэтому можно утверждать, что модуль погрешности определения величины $A(T_{0,2})$ во всяком случае меньше, чем модуль разности $A(T_{0,m'}) - A(T_{0,n'})$. Это дает возможность, оценив порядок величины

изменения A с температурой (в результате экспериментов с несколькими окулярными насадками) и величину разности ($T_{0,m} - T_{0,n}$), сразу же оценить порядок погрешности, возникающий при измерении $A(T_{0,2})$.

Указанный метод оценки погрешности особенно удобен в том случае, когда в результате измерений с различными цветными светофильтрами получается, что $A = \text{const}$ ¹. В этом случае можно утверждать, что погрешность определения величины пирометрического ослабления равна нулю.

Но даже в том случае, когда A не постоянно, погрешность метода очень мала, так как кривая, изображающая использованное нами цветное стекло (рис. 1), очень близка к прямой.

Последняя задача, которую приходится решать при градуировке оптического пирометра, заключается в вычислении поправки, связанной с неточностью формулы Вина в области высоких температур. Величина этой поправки $\Delta T = T - T_w$, как уже указывалось, определяется уравнением (2).

На первый взгляд кажется, что величина поправки ΔT должна сильно зависеть от τ , т. е. от пропускания поглощающего стекла. Однако оказывается, что во всех практически важных случаях, когда используются поглотители, у которых величина пирометрического ослабления относительно мало изменяется при измерении измеряемой температуры, это не так.

В этих случаях решение уравнения (2) может быть получено в виде:

$$e^{\frac{\epsilon_2}{\lambda_e T}} - 1 = e^{\frac{\epsilon_2}{\lambda_e T_w}}, \quad (16)$$

причем λ_e , входящее в (16), есть предельная эффективная длина волны красного светофильтра пирометра при температуре T_0 , соответствующей T .

Уравнение (16) отличается от хорошо известного уравнения, выведенного для монохроматического света, только тем, что при его выводе было уточнено, какое именно значение длины волны нужно использовать при вычислении ΔT , если светофильтр пирометра пропускает широкий спектральный интервал.

Изложенный метод был применен для градуировки нового точного визуального оптического пирометра типа ЭОП-51М. Этот прибор предназначен для метрологических работ по воспроизведению и передаче международной шкалы температур, градуировки температурных ламп, а также для точного измерения высоких температур при выполнении научно-исследовательских работ [2, 3, 4].

Прибор построен по классической схеме пирометра с исчезающей нитью. Общий вид прибора показан на рис. 3.

Объектив пирометра имеет светосилу 1:3 (его диаметр 80 мм); он снабжен асферической линзой, что дало возможность сильно уменьшить aberrации: диаметр aberrационного кружка для монохроматического света не превышает 0,01 мм.

Пирометр снабжен тремя пирометрическими лампочками с плоскими нитями. Замена одной пирометрической лампочки другой может быть произведена простым поворотом рукоятки, что обеспечивает возможность постоянного контроля стабильности градуировки пирометра.

¹ Такие поглощающие стекла использованы в пирометре ЭОП-15М, описанном ниже.

Эффективная длина волны красного светофильтра пирометра 0,665 мк. Перед красным светофильтром может быть помещена диафрагма с диаметром отверстия 2 мм. Эта диафрагма уменьшает интенсивность, но не изменяет спектральный состав светового потока, попадающего в глаз наблюдателя. Использование такой диафрагмы позволяет при измерениях подбирать наиболее удобную для глаза яркость.

Для расширения шкалы пирометр снабжен четырьмя стеклянными поглощающими светофильтрами. Кроме того, по своей конструкции он допускает изменение секторных дисков в качестве поглотителей.

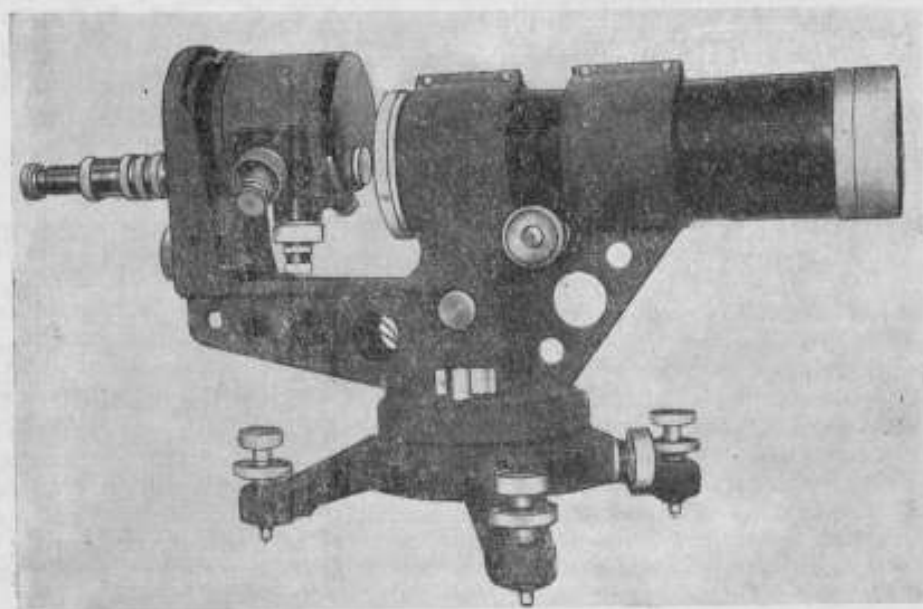


Рис. 3.

Набор стеклянных поглотителей (для измерения температур до 3000°C) установлен во вращающейся обойме, находящейся между объективом и пирометрической лампочкой.

Дополнительный поглотитель (П-6000), служащий для измерения температур в интервале 2500—6000°C, имеет диаметр 80 мм. Он надевается спереди на тубус объектива пирометра. Это вызвано тем, что при измерении высоких температур происходит значительное нагревание поглотителя, расположенного вблизи пирометрической лампочки, т. е. почти в фокусе светосильного объектива. Если же поглотитель надет на объектив пирометра, то он нагревается значительно меньше [3].

Температура в °С	Средняя квадратичная погрешность в %
1 400	0,1
2 000	0,2
6 000	1,0
10 000	1,5

При одновременном введении двух поглотителей — поглотителя П-6000 и соответствующего поглотителя, находящегося в общей обойме, — возникает возможность производить измерения в интервале 3000 — 10 000° С.

Средняя квадратичная погрешность пирометра типа ЭОП-51М характеризуется таблицей, приведенной на стр. 21.

ЛИТЕРАТУРА

1. Финкельштейн В. Е., «Измерительная техника», № 4, 1956.
2. Кандыба В. В., «Измерительная техника», № 1, 1956.
3. Финкельштейн В. Е., Шнигельман Е. С., Кандыба В. В., «Измерительная техника», № 5, 1956.
4. Кандыба В. В., «Заводская лаборатория», № 6, 1956.

*Л. А. БОЯРСКИЙ, А. Н. ГОРДОВ, Г. Л. НОСЕЛЬСОН, В. В. КАНДЫБА,
И. И. КИРЕНКОВ, В. А. КОВАЛЕВСКИЙ, Г. А. КРАХМАЛЬНИКОВА,
Э. А. ЛАПИНА, К. Г. ТАРАЯНЦ*

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ТОЧНЫХ РАБОТ В ОБЛАСТИ ОПТИЧЕСКОЙ ПИРОМЕТРИИ

Повышение требований, предъявляемых промышленностью к точности измерения высоких температур, приводит к необходимости повышения точности образцовых и эталонных оптических пирометров. В отличие от других областей метрологии, где точность образцовых приборов обычно в несколько раз превышает точность технических, в оптической пирометрии точность технического и эталонного приборов оказываются одного порядка. Это связано с тем, что чувствительность обоих приборов определяется в основном свойствами человеческого глаза.

Вопрос о повышении точности пирометрических измерений является особенно существенным при воспроизведении шкалы как яркостных, так и цветовых температур. Для этой же цели необходимо существенное повышение точности определений эффективной длины волны.

В связи с изложенным является весьма актуальным вопрос о создании спектрального пирометра, обеспечивающего более высокую по сравнению с существующими приборами точность измерения яркости и эффективной длины волны.

Поскольку способность человеческого глаза замечать различие яркостей ограничена порогом контрастной чувствительности, очевидно, что значительное повышение точности может быть достигнуто только в результате отказа от визуальных методов измерений и замены их объективными фотоэлектрическими.

Известно, что измерение яркости, а следовательно и яркостной температуры, непосредственно по величине тока фотоэлемента не может обеспечить высокой точности. Это связано с непостоянством чувствительности фотоэлементов и с наличием флуктуаций фототока, особенно ощутимых при измерении слабых световых потоков.

Один из возможных путей достижения высокой точности фотоэлектрических измерений заключается в создании специальных фотоэлементов с высокостабильными и линейными характеристиками. Работа с такого рода фотоэлементами проводилась, например, в Международном Бюро мер и весов.

Существует, однако, другой, по-видимому более перспективный, путь. Фотоэлемент может быть с успехом применен в качестве пульт-прибора для сравнения измеряемой яркости с эталонной. В этом случае

нестабильность характеристик фотоэлемента, а также и усилительного устройства существенной роли не играет. Возможность такого использования фотоэлемента дает так называемый модуляционный метод измерения. Этот метод положен в основу действия объективных спектральных пирометрических установок СПК-1 и СПК-2, созданных в ХГИМИП соответственно в 1954 и 1957 гг. для метрологических работ по градуировке эталонных и образцовых мер яркостной и цветовой температуры (температурных ламп) [1].

Принцип действия установок заключается в следующем.

Излучение обоих сравниваемых источников попадает на фотоэлемент поочередно с определенной частотой. При этом замещение одного светового потока другим осуществляется таким образом, что при равных яркостях источников суммарный световой поток, попадающий на фотоэлемент, остается постоянным во времени и фототок не содержит переменной составляющей.

При нарушении равенства яркостей возникает переменная составляющая фототока с частотой, равной частоте модуляции. Эта составляющая после усиления и детектирования вызывает отклонение стрелки нуль-прибора, указывающее на неравенство яркостей. Взаимодействие основных узлов установки показано на блок-схеме (рис. 1).

Излучение двух температурных ламп с помощью модулятора преобразуется таким образом, что выходящий из последнего световой поток содержит переменную составляющую с амплитудой, пропорциональной разности яркостей сравниваемых ламп. Монохроматор выделяет из модулированного светового потока спектральный интервал, достаточно узкий для определения эффективной длины волны с высокой точностью.

Попадая на катод фотоумножителя, модулированный световой поток создает фототок, величина переменной составляющей которого определяется разностью сравниваемых яркостей. Эта составляющая усиливается узкополосным усилителем, обеспечивающим предварительное ограничение полосы пропускаемых частот. Затем она подается на синхронный детектор, управляемый тем же генератором, который приводит в движение модулятор. Синхронный детектор в сочетании с фильтром нижних частот обеспечивает узкую полосу пропускания, что позволяет существенно повысить отношение сигнал — шум.

Знак напряжения на выходе синхронного детектора зависит от фазы переменной составляющей фототока. Благодаря этому стрелка нуль-прибора отклоняется в ту или иную сторону в зависимости от того, который

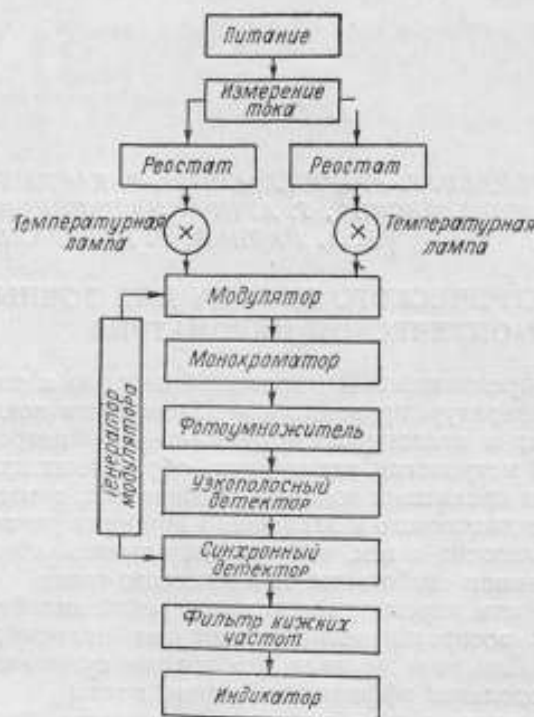


Рис. 1.

из сравниваемых источников ярче. Наблюдатель, работающий на установке, следит за нуль-прибором и регулирует токи ламп, добиваясь нулевого положения стрелки нуль-прибора, которое свидетельствует о равенстве яркостей.

Установка СПК-1 конструктивно оформлена в виде стола с тремя наклонными пультами (рис. 2). Все измерения на установке может выполнять один человек, сидящий у центрального пульта.

На левом пульте расположены два пятикюрбельных реостата, предназначенных для регулирования токов, питающих температурные лампы.

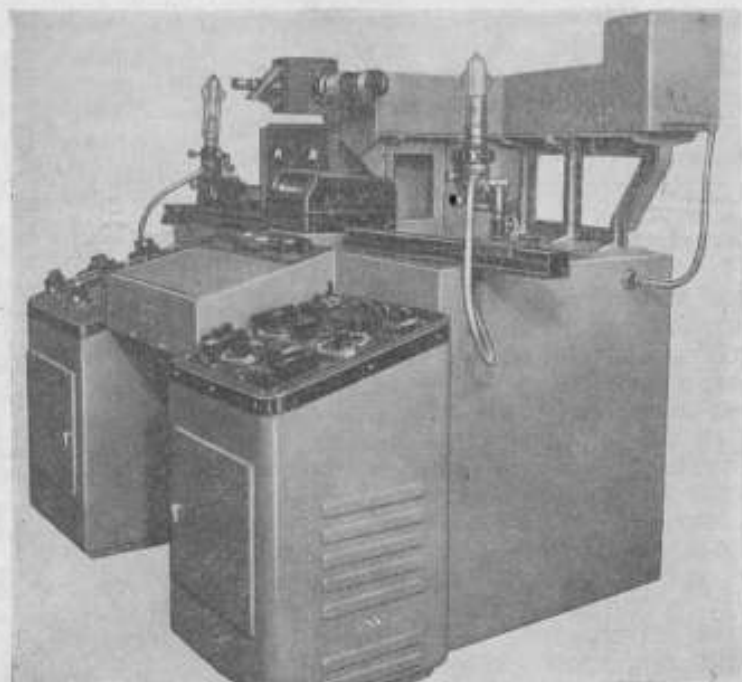


Рис. 2.

Специальная конструкция реостатов обеспечивает весьма плавное регулирование и стабильность токов с точностью до пятого десятичного знака.

На правом пульте помещен низкоомный пятидекадный потенциометр, применяемый для измерения силы тока в лампах. Сила тока в каждой лампе измеряется по падению напряжения на образцовых катушках сопротивления в $0,005 \text{ ом}$.

На центральном пульте расположены приборы и ручки управления электронной аппаратурой. На верхней панели стола смонтирована оптическая скамья с механизмами перемещения температурных ламп. Устройствами для крепления ламп обеспечиваются три вращательные и три поступательные степени свободы для каждой лампы.

Над оптической скамьей в центре расположена внешняя оптическая система с модулятором. Два объектива 1 образуют изображения лент обеих сравниваемых ламп 2 в плоскости входной щели 3 монохроматора (рис. 3, а). Часть светового потока, отраженная от полированных створок щели, попадая в объектив микроскопа 4, позволяет наблюдать за положениями изображений лент ламп на щели и осуществлять наводку на рабочий участок каждой ленты.

С целью исключения возможной неидентичности обоих каналов внешней оптики, предусмотрена возможность ее «перекладки» в процессе измерений. При перекладке внешняя оптическая система поворачивается на 180° вокруг горизонтальной оси, проходящей через центр входной щели монохроматора.

Перед щелью расположен модулятор, конструкция которого выбрана в соответствии с требованиями высокой точности измерений. Модулятор представляет собой небольшую призму ($2,5 \times 2 \times 0,5$), укрепленную на

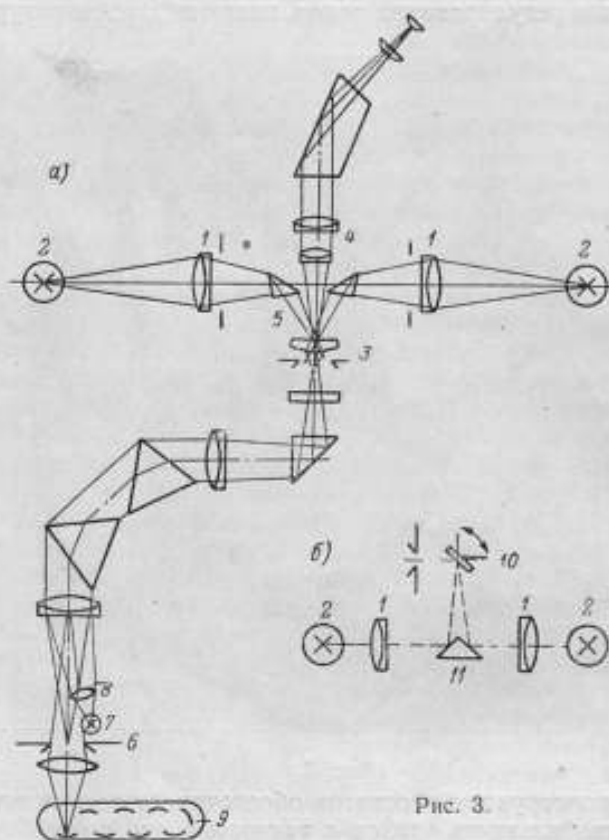


Рис. 3.

колеблющейся струне 5. В среднем положении призма направляет в коллиматорный объектив монохроматора половину каждого из сравниваемых световых потоков. При перемещении призмы доля одного из потоков увеличивается, а другого — уменьшается. Если яркости источников не равны, то это создает периодическое изменение суммарного светового потока. При равных яркостях суммарный поток остается постоянным по величине и по расположению в пространстве.

Струна пересекает поле постоянного магнита и приводится в колебательное движение благодаря прохождению через нее переменного тока. Амплитуда колебаний призмы, укрепленной на струне, составляет 0,3 мм при частоте 860 гц. Струна включена в цепь обратной связи двухкаскадного усилителя и образует вместе с ним струнный генератор с самовозбуждением. Генератор снабжен автоматическим регулятором амплитуды струны.

В установке применен двухпризменный монохроматор с общей базой призм в 200 м. Выходная щель б монохроматора имеет переменную

ширину и может перемещаться по спектру в пределах от 0,45 до 1,0 мк.

Рядом с выходной щелью помещена лампочка обратного луча 7, с помощью линзы 8 посылающая световой пучок в обратном направлении через монохроматор и внешнюю оптическую систему. Лампочка обратного луча включается при юстировке оптической системы, а также при установке температурных ламп в правильное положение и значительно облегчает эти операции.

Вместе с выходной щелью перемещается фотоэмульсионная фотокамера с фотоумножителем 9 типов ФЭУ-17, ФЭУ-22 или ФЭУ-25. Фотоумножители можно менять при работе в различных областях спектра. Питание фотоумножителя осуществляется от высоковольтного выпрямителя, дающего от 200 до 2000 в автоматически стабилизированного напряжения.

Усиление фототока осуществляется узкополосным усилителем, имеющим резонансную частоту 860 гц, полосу пропускания 100 гц и коэффициент усиления 500. Полоса пропускания выбрана так, чтобы, с одной стороны, обеспечить ослабление высших гармоник фототока, нарушающих нормальную работу синхронного детектора, а с другой стороны, сохранить неизменной чувствительность при возможных колебаниях частоты модуляции.

Синхронный детектор собран по кольцевой схеме. Для обеспечения максимальной стабильности нулевого положения все диоды заперты включенными последовательно сухими элементами. После синхронного детектора выпрямленный сигнал поступает на RC-фильтр нижних частот. Переключение емкостей фильтра позволяет изменять полосу пропускания в пределах от 1 до 0,01 гц.

Конечным каскадом электронной схемы является усилитель постоянного тока, в анодную цепь которого включен стрелочный гальванометр (нуль-прибор), являющийся указателем равенства яркостей.

С целью уменьшения влияния цепи модулятора на входные цепи усилителя электронное устройство смонтировано на двух отдельных шасси с независимыми источниками питания.

Установка СПК-2 в основном подобна описанной выше установке СПК-1. Основные отличия заключаются в следующем. В установке СПК-2 применен модулятор новой конструкции (рис. 3, б) с колеблющимся зеркальцем 10, подобным зеркальцу магнитоэлектрического шлейфа, применяемого в осциллографах. Зеркальце посылает в щель монохроматора свет от обоих сравниваемых источников таким образом, что при покоем зеркальце каждый световой пучок заполняет половину коллиматорного объектива. При колебаниях зеркальца световые пучки поочередно сменяют друг друга.

Если яркости источников не равны, то это приводит к модуляции попадающего на фотокатод светового потока. Благодаря разделительной призме 11 (с внешним алюминиевым слоем), имеющей острое ребро, части объектива, освещенные разными источниками, непосредственно примыкают друг к другу, так что в случае равных яркостей лент ламп объектив оказывается равномерно освещенным при любом положении зеркальца.

Новый модулятор имеет ряд преимуществ перед модулятором установки СПК-1: он является более надежным в работе; не требует никакой настройки и регулировки; позволяет получить высокое качество изображений температурных ламп в плоскости входной щели монохроматора и большое поле зрения микроскопа, служащего для наводки, что обеспечивает высокую точность и хорошую воспроизводимость установки ламп в определенное положение относительно оптической оси.

В установке СПК-2 ширина входной щели монохроматора может изменяться от 0 до 2 мм. Точность отсчета 0,01 мм. Благодаря этому существенно облегчается градуировка монохроматора. Кроме того, регулируемая щель позволяет сузить выделяемый спектральный интервал и, в случае необходимости (например, при работе в длинноволновой части спектра), повысить точность определения эффективной длины волны.

Важнейшие метрологические характеристики обеих установок являются одинаковыми. Проведенные исследования показали, что порог

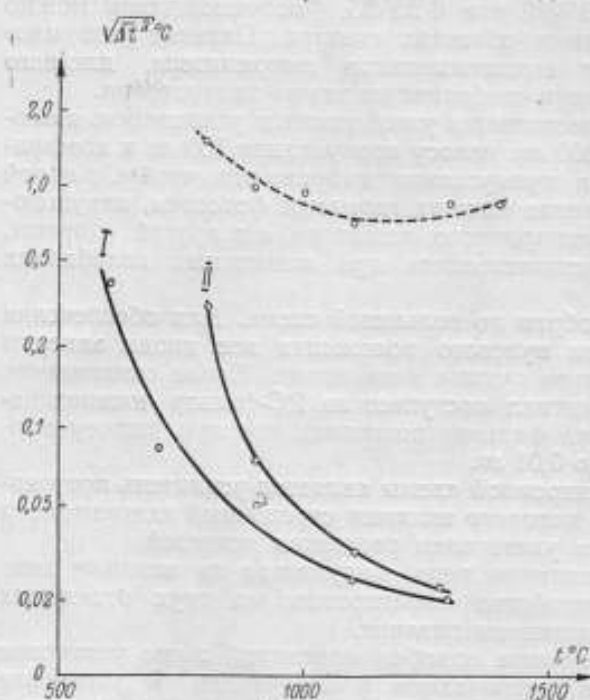


Рис. 4.

чувствительности установки определяется, главным образом, величиной флуктуаций фототока.

Порог чувствительности может быть охарактеризован величиной среднего квадрата отклонений отдельных отсчетов при уравнивании яркостей.

Эта величина измерялась путем многократного повторения процесса уравнивания яркостей двух ламп. Ток одной из ламп все время поддерживался постоянным. Ток второй лампы регулировался до получения фотометрического равновесия и измерялся. Затем величина этого тока изменялась произвольным образом, снова регулировалась и измерялась, и так много раз подряд. Среднее квадратичное отклонение полученного таким образом ряда измерений, выраженное в градусах, характеризует величину порога чувствительности при данных значениях температуры и длины волны.

Эта величина как функция длины волны (для $\lambda = 0,83$ мкм — кривая I и для $\lambda = 0,65$ мкм — кривая II) и как функция температуры представлена на рис. 4; здесь для сравнения пунктиром показана также кривая среднего квадрата расхождений отсчетов визуального оптического пирометра эталонного назначения ($\lambda = 0,66$ мкм). Из графика видно, что чувствительность фотоэлектрической установки значительно (на порядок) превосходит чувствительность визуального пирометра. Кроме того, как это следует из того же графика, установка позволяет осуществлять сравнение при значительно более низких яркостных температурах ламп, чем это возможно с помощью оптического пирометра.

Применением в установке двухпризменного монохроматора с высокой дисперсией обеспечивается определение эффективной длины волны с высокой точностью. Погрешность ее определения не превосходит 3—5 Å, в то время как для визуальных пирометров со светофильтрами эта величина оценивается обычно в 10—15 Å.

Установка СПК-1 была применена во ВНИИМ для градуировки температурных ламп, предназначенных как для хранения шкалы цветных температур, так и для поверки фотоэлектрических цветковых пирометров. Для этой цели с помощью визуального спектрального пирометра группа температурных ламп (состоящая из 3 ламп) была предварительно отградуирована в интервале яркостных температур от 1300 до 1600°С в лучах с длинами волн в 0,48, 0,52, 0,55, 0,60, 0,65, и 0,69 мк. Вторая группа температурных ламп была аналогичным путем градуирована в лучах тех же длин волн в интервале яркостных температур от 1600 до 2200°С.

Далее на установке СПК-1 лампы каждой группы сличались попарно между собой в лучах тех же длин волн и при яркостных температурах, близких к температурам градуировки ламп.

Обе лампы, сличаемые на цветковые температуры, устанавливались на оптической скамье СПК-1. Уравнивание яркостей производилось поочередно в лучах всех выбранных длин волн. Затем осуществлялась перекладка внешней оптической системы, и измерения в лучах всех длин волн повторялись. После этого сличаемые лампы на установке менялись местами и все измерения, с перекладкой внешней оптической системы, повторялись еще раз. Между измерениями в лучах различных длин волн никаких изменений наводки или фокусировки, а также чистки оптических поверхностей, не производилось, с тем, чтобы влияние наводки и установки ламп, изменения температуры помещения и ослабления света оптическими деталями сохраняло свою величину и знак при уравнивании яркостей в лучах всех выбранных длин волн. При такой методике погрешности значений цветовой температуры, вызванные неточностью установки ламп и неидентичностью обоих каналов внешней оптики, оказываются наименьшими.

По результатам круговых сличений температурных ламп каждой группы были уточнены данные их градуировки. Это позволило снизить значительные случайные погрешности градуировки ламп на визуальном спектральном пирометре.

По уточненным градуировочным данным вычислялись цветковые температуры T_c ламп по формуле

$$T_c = \frac{\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}}{\frac{1}{S_1 \lambda_1} - \frac{1}{S_2 \lambda_2}}, \quad (1)$$

причем для каждой градуировочной точки вычислялись три значения T_c (с последующим осреднением) соответственно для трех пар длин волн:

0,48 и 0,60 мк,

0,52 и 0,65 мк,

0,55 и 0,69 мк.

Таким способом были созданы две группы эталонных температурных ламп — хранителей шкалы цветковых температур: одна — для интервала 1400—1800°С и вторая — для интервала 1800—2500°С.

По двум группам эталонных температурных ламп, путем сличения на установке СПК-1, градуировались на цветковые температуры лампы, применявшиеся для поверки фотоэлектрических цветковых пирометров.

Применение установки СПК-1 позволяет получить высокую точность сличения ламп по цветковым температурам. Погрешность сличения температурных ламп на установке СПК-1 по цветковым температурам

T_c связана с погрешностью сличения по яркостным температурам S . Дифференцируя уравнение (1), получим:

$$\Delta T_c = \frac{T_c^2}{S^2} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \Delta S = k \Delta S. \quad (2)$$

Применяя для λ_1 и λ_2 одну из указанных выше пар значений, получим для $T_c = 1700^\circ \text{K}$ $k = 4,4$, а для $T_c = 2700^\circ \text{K}$ $k = 5,7$.

Можно указать следующие источники погрешности сличения ламп по цветовым температурам на установке СПК-1.

1. Порог чувствительности электрической схемы, зависящий от уровня помех, главным образом флуктуаций фототока, равный $0,05-0,01^\circ \text{C}$. Соответствующая погрешность сличения по цветовым температурам не превышает $0,5^\circ \text{C}$.

2. Влияние напряжения, подаваемого на ФЭУ, на уравнивание электронной схемы. Эта погрешность не превышает $0,1^\circ \text{C}$, что при пересчете на погрешность сличения по цветовым температурам составляет около $0,5^\circ \text{C}$.

3. Неполное исключение неидентичности обоих оптических каналов внешней оптики установки.

4. Неточность наводки оптической системы на выбранный участок ленты лампы, при наличии градиентов температуры ленты.

5. Нестабильность яркости лампы при постоянной силе тока.

Как указано выше, выбранная методика сличения обеспечила наименьшее влияние трех последних источников погрешностей.

Суммарная погрешность сличения температурных ламп по цветовым температурам определялась на основании экспериментального материала двумя путями:

- 1) по расхождению результатов сличения при перестановке ламп;
- 2) по суммарной погрешности сличения, представляющей собой невязку, обнаруживаемую после сличения трех ламп попарно при каждой температуре.

Рассчитанная таким образом средняя квадратичная погрешность сличения температурных ламп по цветовым температурам на установке СПК-1 составляет около $\pm 1^\circ \text{C}$ для интервала температур $1400 \div 1800^\circ \text{C}$ и около $\pm 2 \div 2,5^\circ \text{C}$ для интервала $1800 \div 2500^\circ \text{C}$.

Приведенные цифры указывают на существенное повышение точности градуировки температурных ламп на цветовые температуры, достигнутое благодаря применению фотозлектрического метода измерений.

С помощью установки СПК-1 было осуществлено также воспроизведение температурной шкалы выше 1063°C по закону Планка объективным методом. В соответствии с Положением о международной температурной шкале 1948 года, значение температуры в этой области должно определяться по уравнению

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\frac{c_2}{\lambda^2 T_1} - 1}{\frac{c_2}{\lambda^2 T_2} - 1} \quad (3)$$

Точность воспроизведения температурной шкалы обусловлена той точностью, с какой на применяемой аппаратуре может быть измерено отношение яркостей $\frac{E_1}{E_2}$, а также эффективная длина волны используемого излучения λ . Установка СПК-1 позволяет повысить точность измерения обеих этих величин по сравнению с визуальным методом благодаря высокой чувствительности аппаратуры.

При воспроизведении температурной шкалы обычным, визуальным, методом измерения отношения яркостей двух источников наиболее точно осуществляются применением секторных дисков. При фотоэлектрических измерениях по модуляционному принципу этот метод неприменим, так как он из-за малой инерционности фотоэлектрических приемников требует точного усреднения пульсирующего фототока.

Для воспроизведения температурной шкалы при фотоэлектрических измерениях нами принят метод удвоения яркостей¹. Перед одной из температурных ламп (вспомогательной), устанавливаемой на скамье фотоэлектрической установки, располагается специальное устройство, основными частями которого являются два полупрозрачных зеркала (рис. 5). Одно из зеркал разделяет излучение лампы на два пучка,

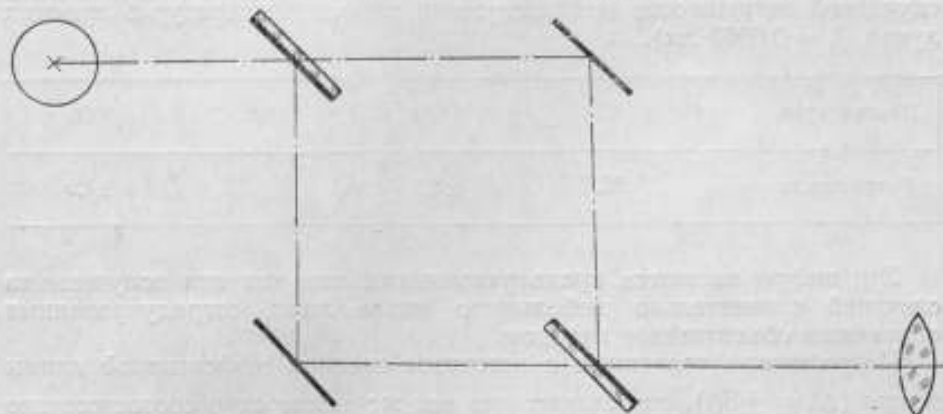


Рис. 5.

которые снова соединяются на втором полупрозрачном зеркале. С помощью оптических клиньев и заслонок можно регулировать яркости каждого из двух пучков, перекрывать полностью любую из них или пропускать оба пучка одновременно в один из объективов внешней оптической системы установки СПК-1.

Градуируемая лампа устанавливается на другой стороне фотоэлектрической установки. Этой лампе первоначально дается накал, соответствующий исходной температуре 1063°С. Настройка устройства с зеркалами и накал вспомогательной лампы подбираются таким образом, чтобы при пропускании каждого пучка света в отдельности от вспомогательной лампы фотоэлектрическая установка показывала равенство яркостей обеих ламп. Если затем открыть оба пучка света от вспомогательной лампы, то удвоится яркость ее изображения в плоскости входной щели монохроматора. Увеличивая силу тока в градуируемой лампе, вновь добиваются уравнивания яркостей изображений, после чего яркость лампы станет в два раза больше первоначальной. При таком эксперименте точность удвоения яркости градуируемой лампы определяется, главным образом, чувствительностью фотоэлектрической установки.

Удвоение яркости градуируемой лампы описываемым методом производится последовательно несколько раз, до достижения предельной температуры, до которой желательно градуировать лампу.

Температура ленты градуируемой лампы, возрастающая степенями при удвоении ее яркости, рассчитывается по приведенной выше формуле (3).

¹ См. авторское свидетельство В. А. Ковалевского № 104096, 1956 г.

Для воспроизведения температурной шкалы до температур более высоких, чем допустимая температура накала градуируемой лампы, применяются поглощающие стекла, так же как это делается в визуальных оптических пирометрах. В наших работах, с целью обеспечения высокой стабильности ламп, поглощающие стекла вводятся начиная с температуры 1600° С.

Сравнение яркостей нескольких ламп, градуированных указанным образом, выполняемое на фотоэлектрической установке при различных температурах, позволяет определить суммарную случайную погрешность воспроизведения и передачи температурной шкалы фотоэлектрическим методом.

Нами получены экспериментально следующие значения суммарной случайной погрешности при построении шкалы температур в красных лучах ($\lambda = 0,6563 \text{ мк}$).

Температура	°С	1400	1600	2000
Погрешность	°С	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 1,0$

Эти цифры являются предварительными, так как они получены из сличений сравнительно небольшого числа ламп, отградуированных описанным объективным методом.

Погрешности, связанные с неточным знанием эффективной длины волны ($\Delta\lambda = \pm 5 \text{ \AA}$), составляют для тех же температур соответственно $\pm 0,3$, $\pm 0,6$ и $\pm 1,2$ ° С.

Для сравнения укажем, что значение средней квадратичной погрешности воспроизведения международной шкалы температур с помощью визуальных эталонных пирометров по нашей оценке равно ± 4 ° С для 2000° С [2].

Как показали исследования, погрешность воспроизведения температурной шкалы на установке СПК-1 связана со следующими явлениями:

- 1) порогом нечувствительности фотоэлектрической части установки СПК-1 (влияние шумов);
- 2) неполным исключением неидентичности двух каналов внешней оптической системы (при сличении ламп);
- 3) нестабильностью яркости ленты лампы (влияние наклона, температуры помещения и др.);
- 4) неоднородностью температуры ленты лампы на рабочем участке;
- 5) неточным знанием эффективной длины волны.

Следует ожидать, что приведенные выше погрешности могут быть еще снижены при дальнейшем усовершенствовании аппаратуры и техники эксперимента. Однако и в таком виде точность воспроизведения температурной шкалы существенно повышена по сравнению с прежним, визуальным, методом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кандыба В. В., Ковалевский В. А., ДАН СССР, т. 108, № 4, 1956, стр. 633—635.
2. Гордов А. Н. Труды ВНИИМ, вып. 9 (69), 1950.

Цена 1 р.