

6
А-11
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

И. И. КИРЕНКОВ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
МЕТОДОВ ТОЧНЫХ
АБСОЛЮТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
И ЭТАЛОНОВ ВЫСОКИХ
ТЕМПЕРАТУР

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук

ЛЕНИНГРАД
1965

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

И. И. КИРЕНКОВ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
МЕТОДОВ ТОЧНЫХ
АБСОЛЮТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
И ЭТАЛОНОВ ВЫСОКИХ
ТЕМПЕРАТУР

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук

ЛЕНИНГРАД
1965

Техника высоких температур, применяемая в науке и промышленности с давних времен, в последнее время бурно развивается. При этом непрерывно расширяется диапазон высоких температур, подлежащих измерению, увеличивается многообразие методов и измерительных приборов, применяемых в пирометрии, и повышаются требования к точности измерения высоких температур.

Необходимость совершенствования температурных измерений ставит целый ряд задач перед метрологией, являющейся одним из главных, определяющих звеньев измерительной техники. Теоретическая и экспериментальная метрология создает научную базу для развития измерительной техники. Точные приборы дают возможность изучать физические закономерности, связанные с принципом действия любых приборов и с процессом измерения, выполнять испытания приборов и исследовать погрешности. Метрологические исследования обеспечивают создание эталонов и образцовых мер для градуировки всех измерительных приборов. Поэтому обеспечение единства, точности, научных основ и возможности технического совершенствования температурных измерений требует четкого определения и точного экспериментального осуществления температурной шкалы [1].

Между тем в течение длительного времени методы построения шкалы высоких температур не совершенствовались, точность эталонов высоких температур практически не повышалась и эталоны перестали удовлетворять требованиям современной пирометрии.

Всем тепловым измерениям вообще присущи большие экспериментальные трудности. Это в особенности относится к абсолютным измерениям. Исследования термодинамической температурной шкалы в области высоких температур с помо-

щью газовых термометров еще в 1912 году были во всех странах практически прекращены и не возобновлялись затем ввиду отсутствия научно-обоснованных путей повышения точности. Градуировка эталонов для измерения температур выше 1000°C повсеместно осуществлялась (и осуществляется) визуальным пирометрическим методом, возможности повышения точности которого также были практически исчерпаны. Было установлено, что поэтому градуировка и поверка яркостных пирометров и пирометров суммарной радиации осуществляется с недостаточной точностью, не позволяющей полностью реализовать инструментальную точность этих приборов. В еще большей степени это относится к цветовой и инфракрасной пирометрии. Эти новые, прогрессивные направления пирометрии излучения требуют от метрологических организаций постановки принципиально новых эталонных работ, обеспечивающих существенное повышение точности, а также требуют отказа от визуальных пирометрических методов построения температурной шкалы, ограничивающих точность эталонов и используемый спектральный диапазон.

Таким образом, в связи с современным развитием пирометрии возникла необходимость разработки новой методики и аппаратуры для построения шкалы высоких температур. Новые методы и аппаратура должны устранить образовавшееся в мировой практике отставание эталонов от практических требований, должны обеспечить повышение точности эталонов в несколько раз, а также обеспечить ясные перспективы ее дальнейшего повышения.

В реферируемой работе рассматриваются физические основы, методика, аппаратура и результаты разработки и применения новых эталонов высоких температур, построенных в связи с требованиями современной пирометрии.

I

Первая глава диссертации посвящена общим законам, перспективам и выбору путей построения и развития шкалы высоких температур в соответствии с уровнем развития и требованиями современной науки и техники.

Температура, как функция состояния вещества, непосредственно связана с его энергией и через эту энергию — со многими другими свойствами вещества, зависящими от его состояния. При этом во многих случаях, в первую очередь связанных с явлениями теплообмена или преобразования

тепловой энергии в другие формы, температура является главным параметром, непосредственно определяющим ход и характер процесса. Кроме того, для контроля состояния вещества при экспериментальных исследованиях или производственных процессах очень важно то обстоятельство, что температура является функцией состояния, метрологически наиболее изученной; точность ее измерения на современном уровне техники, как правило, выше, чем точность непосредственного измерения большинства других характеристик состояния вещества. Поэтому во многих случаях оказывается весьма полезным измерять температуру в дополнение или взамен прямого измерения целого ряда других характеристик вещества или тела, зависящих от его состояния и непосредственно интересующих экспериментатора или технолога.

К числу таких характеристик относятся, например: энергия вещества, его химическая активность, вязкость (жидкотекучесть), твердость, изменения условий химического или фазового равновесия, скорость полимеризации, тепловое расширение, изменения электрических свойств и многие другие. С этим связано значение и широта применения температурных измерений в современной науке и технике.

Теория температурной шкалы, главным образом — шкалы высоких температур, развита в работе с позиций общей метрологии, термодинамики, статистической физики и прикладной пирометрии.

Температурная метрология тесно связана с проблемой шкалы. Эта проблема возникает и в некоторых других областях метрологии, однако, она нигде не стоит так остро, как в области температурных измерений. В метрологической литературе, как правило, отсутствуют четкие определения причин возникновения проблемы шкалы в отдельных областях измерений и особенностей практической метрологии и измерительной техники, связанных с этой проблемой.

Проблема шкалы измеряемой величины в метрологическом смысле представляет собой вопрос о системе выбора численных значений, приписываемых этой измеряемой величине.

Проблема шкалы всегда связана с возможностью выбора численных значений измеряемой величины по произвольному закону. Где нет произвольности шкалы, там проблема шкалы вообще не возникает, и термин «шкала» не нужен, не должен применяться и обычно не применяется.

В работе показано, что шкала измеряемой величины — это система выбора численных значений, устанавливаемая

произвольным, но четко определенным способом для измерения величины, не поддающейся сложению при метрологическом эксперименте, если определение этой величины не позволяет однозначно установить для нее производную единицу.

Законы термодинамики не дают возможности установить какую-либо однозначную связь между температурой и энергией. Напротив, законы статистической физики в принципе допускают определение температуры через энергию и измерение температуры в энергетических единицах. Однако эти возможности ограничиваются рядом факторов, основными из которых являются квантовый характер энергетических взаимодействий и экспериментальные возможности современной метрологии.

Определение температуры как модуля равновесного распределения или как средней кинетической энергии газовых молекул, пригодное для весьма большого круга вопросов, неприменимо к широкой области физических явлений, связанных с температурами ниже 1°K . При этом точность современных измерений температуры по существующим температурным шкалам значительно выше точности тепловых энергетических измерений; перспектив изменения этой картины на обратную в ближайшее время, по-видимому, не предвидится.

По указанным соображениям переход на энергетические эталоны для измерения температур привел бы к увеличению разрыва приблизительно на 2—3 порядка (по сравнению с термодинамической шкалой) между исходными эталонами и практической температурной шкалой. Поэтому применение энергетических эталонов, в принципе, по-видимому, желательное, следует считать дальней перспективой развития температурной и энергетической метрологии.

Такая же потеря точности неизбежна в случае перехода на энергетические единицы при сохранении существующих эталонов температуры. Для такого перехода следует, например, заменить величину T величиной kT или RT , выразив тем самым температуру в джоулях или в джоулях на моль. При этом связь между прежними и новыми единицами температуры определится численным значением постоянной Больцмана или универсальной газовой постоянной.

Точность определения постоянных k и R и сопоставление ее с точностью построения практической температурной шкалы показывает, что погрешность основной температурной точки — тройной точки воды — при измерении температуры в джоулях (или точнее — в джоулях на молекулу) или в джоу-

лях на моль возрастет на 2—3 порядка, причем возрастание погрешности будет ощутимо в широкой области температур — от гелиевых до температур порядка $1000\text{—}2000^\circ\text{C}$. Эти погрешности будут иметь значение во всех случаях, где результат измерения должен быть выражен в градусах термодинамической температурной шкалы [2].

Таким образом, требования обеспечения высокой точности температурных измерений предписывают сохранить в настоящее время для температуры независимую единицу измерения.

Вопросы единства температурной шкалы ранее нигде детально не рассматривались. Между тем, эти вопросы имеют большое значение для целеустремленности температурной метрологии, для правильной постановки исследований температурной шкалы.

В работе показано, что практическую температурную шкалу следует рассматривать как единую стройную систему, отдельные участки которой нельзя изменять независимо. Уточнению могут подвергаться не отдельные участки шкалы, а, в крайнем случае, отдельные области, причем все изменения должны быть согласованы между собой; должен быть обеспечен плавный переход от уточняемого участка к неизменяемому; должно быть обеспечено отсутствие изломов интерполяционных кривых и роста расхождений в промежутках между реперными точками. Так, например, хотя к 1959 г. в ряде стран (СССР, ФРГ, Япония) были выполнены новые, точные измерения термодинамической температуры затвердевания золота [2, 3] и результаты показали необходимость корректировки значения этой основной реперной точки шкалы высоких температур, эти результаты не дали возможности сформулировать какие-либо конкретные предложения: получился бы разрыв с остальными участками шкалы.

Поэтому, в связи с требованиями единства температурной шкалы, для обеспечения практической ценности результатов метрологических исследований необходимо ставить и развивать исследования температурной шкалы комплексно, широким фронтом, в большом температурном диапазоне. Термометрические исследования, направленные на уточнение точки золота, должны быть распространены и на область средних температур, которая имеет, кроме того, большое самостоятельное значение.

Постановка в широком плане метрологических исследований шкалы высоких температур потребовала детального изучения условий и путей постановки экспериментов, обеспечи-

вающих реальное повышение точности. Существует много способов экспериментального осуществления термодинамической температурной шкалы. Выбор их решают практические соображения: степень сложности эксперимента и, главным образом, достижимая точность.

По мере развития метрологии повышается точность экспериментального осуществления как Международной практической, так и термодинамической шкалы. Результаты исследования термодинамической температурной шкалы позволяют реализовать повышение точности температурных измерений двумя путями. Первый, наиболее оперативный путь — учет в практической метрологии и измерительной технике публикуемых в научной литературе данных о результатах исследований и их обсуждений. Второй, наиболее массовый путь — развитие и корректировка практической температурной шкалы, осуществляемые по международному соглашению. Достигнутый в последнее время в СССР уровень метрологии в области температурных измерений налагает на метрологические институты обязанность значительно повысить свою активность и инициативу в международной работе, в первую очередь — в корректировке положения о Международной практической температурной шкале [1, 3, 4, 6].

Расхождения практической температурной шкалы с термодинамической приводят к систематической погрешности измерений, одинаковой для термометров любых типов, но разной в разных областях температурной шкалы. Эта погрешность не имеет никакого значения в тех случаях, когда контролируемый режим установлен или уточнен эмпирически, что обычно имеет место при измерениях температуры в промышленности: в этом случае пригодна любая условная, но точно воспроизводимая температурная шкала. Иначе обстоит дело при измерениях температуры, связанных с физическими закономерностями, при исследовании температурной зависимости физических явлений; здесь результат измерения принципиально должен быть выражен в градусах термодинамической температурной шкалы, так как физические законы связаны только с термодинамической температурой.

В связи с единством температурной шкалы, было решено при создании новых эталонов высоких температур поставить исследования температурной шкалы в широком температурном диапазоне, начиная с 0°C . Таким образом исследования охватывали область не только высоких, но и средних температур. Были выбраны два метода построения температурной

шкалы: метод газовой термометрии — для температур от 0°C до 1063°C (межд.) и метод фотоэлектрической пирометрии — для температур выше 1063°C . Выбор этих методов определялся требованием обеспечения максимальной точности.

II

Во второй главе рассматриваются теория и пути развития газовой термометрии высоких температур.

Возобновление работ по газовой термометрии потребовало коренного пересмотра принципов и приемов газовой термометрии и создания или привлечения новых научных и технических средств, открываемых современным развитием точного приборостроения и экспериментальной метрологии.

Выполнение этой работы потребовало в первую очередь пересмотра, уточнения и развития теории газовой термометрии. Из уравнений газовой термометрии следовало устранить предположения, недопустимые при повышенных требованиях к точности; следовало развить эти уравнения таким образом, чтобы они детально учитывали реальные физические процессы, происходящие в газовом термометре.

Значение и роль уравнений газовой термометрии заключается в том, что они позволяют от эксперимента с реальным газовым термометром, где законы идеального газа соблюдаются далеко не полностью, перейти к термодинамической температуре, определяемой по свойствам цикла Карно. Теория газовой термометрии должна быть развита таким образом, чтобы из ее уравнений следовали конкретные количественные требования к газтермометрическому эксперименту и к аппаратуре, обеспечивающей существенное повышение точности по сравнению с достигнутой ранее.

Опираясь на развитую, усовершенствованную теорию газовой термометрии и на современную технику точного физического эксперимента, следовало найти пути разработки аппаратуры повышенной точности, реализующей общие принципы газовой термометрии и при этом позволяющей преодолеть затруднения, препятствовавшие развитию газовой термометрии высоких температур.

Для решения этой задачи были рассмотрены источники погрешностей измерения термодинамической температуры и определено их влияние на результат измерения, что позволило разработать требования к аппаратуре [5, 6].

Было установлено:

1. При низких температурах, например, при температуре кипения кислорода и ниже, а также при высоких температурах — вблизи точки золота, преобладающее значение имеют погрешности, зависящие от свойств термостатов, в которых работает резервуар газового термометра. Для получения новых по точности результатов газтермических измерений в указанных областях шкалы, необходимо, в первую очередь, разработать для этих температур термостаты нового типа, с улучшенной против прежнего стабильностью и однородностью температурного поля. Эти термостаты, естественно, должны иметь большие размеры рабочего пространства, рассчитанные на погружение в них резервуара газового термометра.

2. В широкой области средних температур, приблизительно от -100 до 800°C , где высокая стабильность и однородность температурного поля в термостате, даже при большом объеме его рабочего пространства, достигается легче, чем при низких или при высоких температурах, преобладающее значение получают инструментальные погрешности газового термометра. Для получения новых по точности результатов в этой широкой области температур необходима разработка нового газового термометра, способного обеспечить существенное снижение инструментальных погрешностей, для чего в его конструкции должны быть использованы новейшие достижения приборостроительной техники.

Метрологические требования к такому термометру, выведенные теоретически, привели к необходимости отказа от классической схемы газового термометра, повсеместно применявшейся ранее. Эти требования, практически невыполнимые при классической схеме газового термометра, вкратце сводятся к необходимости выполнить следующее:

- 1) существенно повысить точность измерения давления рабочего газа;
- 2) применять для резервуара материалы с малым тепловым расширением, легче поддающимся точному измерению;
- 3) термостатировать манометр;
- 4) повысить (или в некоторых случаях сохранить) точность определения инструментальных параметров газового термометра (объем резервуара, объем и температура вредного пространства, барометрический коэффициент и др.), что в известной мере противоречит первым трем требованиям;
- 5) исключить загрязнение рабочего газа парами ртути.

Анализ этих требований, основанный на общих соображениях приборостроительного и метрологического характера, приводит к новым, дополнительным требованиям:

6) исключить тепловое влияние на манометр газового термометра, измерительных термостатов (печей), в которые погружается резервуар при измерении высоких температур;

7) исключить (или резко уменьшить) влияние вибраций ртути в ртутном манометре;

8) отказаться от осветителей мениска ртути и других устройств, рассеивающих мощность, способную исказить температурное поле манометра;

9) исключить влияние капиллярной депрессии ртути, сделав диаметр ее мениска не менее 30 мм без увеличения объема вредного пространства;

10) полностью отказаться от оптических измерений уровня ртути сквозь неоптическое стекло;

11) обеспечить термостатирование вредного пространства (кроме минимальных его объемов в месте выхода из измерительного термостата);

12) обеспечить соединение измеряемых отдельно участков вредного пространства, не изменяя их объема.

Разработанный в соответствии с этими требованиями новый газовый термометр получил название «газовый термометр № 3 ВНИИМ» [7, 8, 9].

Для выполнения указанных выше требований было решено отказаться от классической схемы газового термометра, где резервуар с помощью капилляра непосредственно соединяется с манометром. Было признано целесообразным применить специальную разделительную камеру, отделяющую рабочий газ в резервуаре от газа, создающего давление на ртуть манометра, и позволяющую фиксировать равенство давлений обоих этих газов. Эта камера, таким образом, представляет собой нулевой дифференциальный манометр. Она термостатируется при постоянной температуре.

Применение разделительной камеры дает следующие основные преимущества:

1) делает измерения давления рабочего газа дистанционным и, тем самым, резко облегчает термостатирование манометра;

2) позволяет увеличить диаметр мениска ртути в манометре, не увеличивая объема вредного пространства;

3) облегчает подготовку измерений и чередование измерений с применением разных резервуаров при различных температурах;

4) исключает возможность загрязнения рабочего газа парами ртути;

5) существенно облегчает контроль показаний манометра.

Были разработаны разделительные камеры двух типов: с интерференционным и с емкостным отсчетом нулевого положения мембраны. Камеры обоих типов обеспечивают уравнивание двух давлений с точностью около $\pm 10^{-3}$ мм рт. ст. [5].

Давление газа является основной величиной, непосредственно измеряемой при определении термодинамической температуры. Поэтому наряду с погрешностями измерения теплового расширения резервуара и тепловыми погрешностями, зависящими от температурного поля термостата, в который погружается резервуар, погрешности измерения давления являются основными, решающими, определяющими точность измерения термодинамической температуры газовым термометром. Повышение точности газотермических измерений невозможно без создания манометра, обеспечивающего высокую точность измерения давления газа [6, 9, 10]. Метрологический анализ показывает, что для работы в области умеренно высоких температур (200—800°С) требуемая точность измерения давления составляет $1-3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.

С целью получения этой точности был разработан ртутный манометр, в котором фиксация уровня ртути осуществляется емкостным методом. Манометр рассчитан на работу в комплекте газового термометра при наличии разделительной камеры [9].

При измерении при стабильных температурах (тройной точки воды и затвердевания цинка) средняя квадратичная погрешность ряда измерений составила $\pm 2-3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. В эту погрешность, определенную из большого числа измерений, при широком варьировании условий эксперимента, вошли как погрешности манометра, так и случайные погрешности остальных устройств газового термометра, в том числе погрешности разделительной камеры и погрешности измерительных термостатов, создающих измеряемую температуру.

Таким образом, указанные выше требования к точности измерения давления ($\pm 1-3 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.) можно считать выполненными [9].

При постановке тепловых метрологических работ необходимо учитывать, кроме общих трудностей точного приборо-

строения, связанных с обеспечением максимальной точности, также и специфические экспериментальные трудности, присущие всем тепловым измерениям вообще [1]. Для обеспечения работы газового термометра в широком интервале температур потребовалась разработка целой серии измерительных термостатов различного устройства, основанных на разных принципах действия, каждый из которых должен был удовлетворять высоким требованиям.

III

В третьей главе описаны методика и результаты построения с помощью газового термометра термодинамической температурной шкалы в диапазоне от 0°С до 1063°С (межд.).

По соображениям единства температурной шкалы в первую очередь были выполнены измерения в точках золота, цинка, кадмия и олова [5, 10, 11, 12].

Всего было выполнено 14 серий измерения термодинамических температур. Кроме того, все источники погрешностей исследовались теоретически и экспериментально и величина каждой частной погрешности была установлена по результатам многократных измерений. Суммарная погрешность результата измерений была вычислена путем квадратичного сложения всех существенных погрешностей. Значения этих погрешностей приведены в табл. 1.

Таблица 1
Погрешности измерений с газовым термометром, град

Источник погрешности (или измеряемая величина)	Реперные точки			
	Zn	Au	Cd	Sn
Температура ртути в манометре	$\pm 0,004$	$\pm 0,01$	$\pm 0,004$	$\pm 0,003$
Вакуум в верхней головке	$\pm 0,003$	$\pm 0,01$	$\pm 0,002$	$\pm 0,02$
Температура вредного пространства	$\pm 0,004$	$\pm 0,03$	$\pm 0,005$	$\pm 0,004$
Тепловое расширение резервуара	$\pm 0,015$	$\pm 0,1$	$\pm 0,010$	$\pm 0,008$
Термоэлектрические измерения	—	$\pm 0,1$	—	—
Вирнальный коэффициент азота	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,005$	$\pm 0,004$
Нулевое положение манометра	$\pm 0,003$	$\pm 0,01$	$\pm 0,002$	$\pm 0,002$
Тепловое расширение шкалы	$\pm 0,005$	$\pm 0,01$	$\pm 0,001$	$\pm 0,001$
Неоднородность температурного поля термостата	$\pm 0,005$	$\pm 0,1$	$\pm 0,005$	$\pm 0,004$
Случайные погрешности (разброс)	$\pm 0,01$	$\pm 0,1$	$\pm 0,01$	$\pm 0,008$
Суммарная погрешность	$\pm 0,02$	$\pm 0,2$	$\pm 0,016$	$\pm 0,012$

В результате измерений получено:

$$t_{Zn} = 419,57 \pm 0,02^\circ \text{C} \text{ (терм.)}; \quad t_{Au} = 1064,2 \pm 0,2^\circ \text{C} \text{ (терм.)};$$

$$t_{Cd} = 321,11 \pm 0,02^\circ \text{C} \text{ (терм.)}; \quad t_{Sn} = 231,94 \pm 0,015^\circ \text{C} \text{ (терм.)}.$$

Анализ этих результатов указывает на реальную возможность и своевременность пересмотра положения о Международной практической температурной шкале на основании последних экспериментальных данных, полученных с газовыми термометрами.

До принятия окончательного решения об изменении практической шкалы температур, новые значения температур реперных точек, в комбинации с прежними методами интерполяции могут быть уже сейчас рекомендованы для тех случаев, когда результат измерения температуры необходимо выразить в градусах термодинамической температурной шкалы.

Таким образом, с помощью нового газового термометра проведены исследования термодинамической температурной шкалы в диапазоне от 0°C до точки золота включительно. Исследования поставлены и выполнены так, что их результаты позволили составить конкретные предложения по уточнению Международной практической температурной шкалы. Эти предложения, обеспечивающие уменьшение расхождений между двумя шкалами в 3—10 раз, были в 1962 году доложены советской делегацией на сессии Международного консультативного комитета по термометрии и приняты рабочей группой этого комитета за основу для пересмотра положения о международной практической температурной шкале.

Проведенные исследования позволили уточнить температуру равновесия между твердым и жидким золотом, являющуюся основной опорной точкой шкалы высоких температур. Установлено, что значение этой температуры равно $1064,4 \pm 0,2^\circ \text{C}$ (терм.) т. е. на 1,4 град. выше принятого в настоящее время в положении о Международной практической температурной шкале. При этом выполнение измерений в широком температурном диапазоне от тройной точки воды до точки золота обеспечило проверку надежности полученного значения этой точки, согласование его с прилегающими областями шкалы и позволяет откорректировать положение о температурной шкале с соблюдением принципа единства практической температурной шкалы.

Температура равновесия между твердым и жидким золотом является физической константой, используемой в качестве основной реперной точки шкалы высоких температур, и имеет существенное значение для всей этой шкалы.

IV

Четвертая глава посвящена теоретическим основам точной фотоэлектрической пирометрии.

Здесь показано, что вопрос об эффективной длине волны является основой теории оптической пирометрии. Эта теория позволяет, базируясь на законах излучения абсолютно черного тела, определять свойства пирометрической аппаратуры, рассчитывать различные пирометрические эксперименты и обрабатывать их результаты, учитывая свойства реальных раскаленных тел, оптические свойства аппаратуры, поглощение излучения в промежуточной среде и деталях и другие условия эксперимента.

Изложенный в этой главе материал представляет собой теоретическую и экспериментальную разработку проблемы эффективной длины волны; он охватывает все основные вопросы этой проблемы, возникшие в связи с современным развитием пирометрии, в первую очередь — в связи с распространением в пирометрии фотоэлектрического метода измерений. Решение этих вопросов обеспечило точную и надежную оценку влияния спектральных характеристик пирометрической аппаратуры как при построении температурной шкалы фотоэлектрическим методом, так и при исследовании и градуировке технических фотоэлектрических пирометров разных принципов действия, а также нашло применение при решении некоторых приборостроительных задач.

Основной задачей температурной метрологии является осуществление и эксплуатация эталонов температуры, воспроизводящих с предельной точностью Международную практическую температурную шкалу. В области высоких температур эта шкала строится в соответствии с законами излучения абсолютно черного тела. Одна из основных трудностей, с которой сталкивается оптическая пирометрия при осуществлении температурной шкалы, связана с необходимостью точно определить эффективную длину волны эталонного пирометра.

Повышение требований к точности при построении температурной шкалы фотоэлектрическим методом потребовало разработки нового метода определения эффективной длины волны [14], представляющего сочетание экспериментального метода с расчетным. Полученные уравнения позволяют рассчитывать эффективную длину волны фотоэлектрического спектропирометра с учетом спектральной характеристики из-

лучателя и оптической системы пирометра, селективности потерь света в оптической системе, индивидуальной спектральной характеристики фотоэлемента и неравномерности дисперсии монохроматора.

Описанный метод применялся в дальнейшей работе для расчета эффективной длины волны фотоэлектрической спектропирометрической установки СП-4К, при осуществлении температурной шкалы фотоэлектрическим методом в области спектра от 0,47 до 1 мк, и обеспечил высокую точность и надежность определения эффективной длины волны.

При градуировке и поверке технического яркостного пирометра по излучателю, не являющемуся черным телом, знание эффективной длины волны необходимо для учета спектральных характеристик излучателя. Это особенно важно для фотоэлектрических яркостных пирометров. У них эффективная длина волны может сильно отличаться от длины волны 0,65 мк, при которой обычно производится градуировка образцовых температурных ламп. При эксплуатации технических яркостных пирометров знание эффективной длины волны необходимо для расчета поправки на нечерноту излучения раскаленного тела, температура которого измеряется.

Разработан новый метод измерения эффективной длины волны технических яркостных пирометров, который можно назвать методом пересекающихся характеристик [13]. Суммарная погрешность составляет не более 0,01 мк, что вполне достаточно для градуировки, поверки и эксплуатации технического яркостного пирометра. Определение эффективных длин волн фотоэлектрических яркостных пирометров методом пересекающихся характеристик нашло широкое применение в метрологической и приборостроительной практике.

В случае цветового пирометра отсутствие данных об его спектральных характеристиках не приводит к потере точности только в тех случаях, когда раскаленные тела, с которыми пирометр работает, являются «серыми», т. е. когда их спектральная характеристика геометрически подобна характеристике абсолютно черного тела. Между тем это справедливо только в первом приближении, и то далеко не во всех случаях. Поэтому стремление к повышению точности цветовой пирометрии и расширению области ее применения приводит к распространению проблемы эффективной длины волны также и на цветовую пирометрию.

Принцип разработанного метода непосредственного измерения эффективных длин волн цветового пирометра состоит

в определении их значений из результатов измерений с помощью изучаемого пирометра цветовой температуры двух специально подобранных селективных источников излучения.

Для того, чтобы предложенную методику практически применить для исследования цветových пирометров, были разработаны селективные источники излучения, отвечающие ряду требований. В результате испытаний было установлено, что разработанные методика и аппаратура позволяют измерять эффективные длины волн цветových пирометров с погрешностью около $\pm 0,01$ мк.

Этот метод измерения эффективных длин волн цветových пирометров целесообразно применять во всех случаях, связанных с их эксплуатацией, особенно при экспериментально-исследовательских работах. Сюда относится, прежде всего, выбор спектральных областей для цветовой пирометрии применительно к разным объектам. Сюда же относятся расчеты и экспериментальные определения поправок для перехода от цветовой температуры к истинной. В настоящее время этот метод применяется во ВНИИМ, кроме того, при исследованиях и испытаниях опытных и серийных образцов цветových пирометров.

Предложенный же проф. Д. Я. Светом метод измерения эффективных длин волн целесообразно применять для расчетов градуировочной характеристики и пределов измерения цветового пирометра при его проектировании и предварительных испытаниях, т. е. для решения приборостроительных задач. Окончательную же градуировку пирометра следует производить по эталонам.

V

В пятой главе описана разработка точной фотоэлектрической и оптической аппаратуры для эталонных работ в области пирометрии.

Для построения температурной шкалы и для повышения точности эталонов высоких температур в соответствии с требованиями современной пирометрии оказалось необходимым тщательно изучить и обобщить особенности развития пирометрии излучения и тенденции развития пирометрического приборостроения и четко сформулировать задачи метрологий и требования к эталонам высоких температур на современном этапе. Фотоэлектрический метод построения шкалы и создания эталонов высоких температур нигде ранее не применялся;

поэтому были разработаны теоретические основы этого метода, выявлены и исследованы присущие ему основные проблемы и трудности, разработаны пути создания аппаратуры и методики исследования. В результате этих работ сформулированы конкретные требования к эталонной фотоэлектрической аппаратуре, методике измерений и обработке их результатов с учетом физических особенностей эксперимента и повышенных требований к точности. При этом максимально использован имеющийся опыт фотоэлектрических измерений.

Эти исследования позволили разработать новую эталонную фотоэлектрическую аппаратуру, предназначенную для метрологических работ в области высоких температур, и тщательно ее изучить.

Основные особенности и тенденция развития пирометрии излучения проанализированы автором в статьях [15, 16].

Общими тенденциями современного развития техники измерения высоких температур по излучению являются:

- повышение точности измерения;
- преобладание фотоэлектрических методов измерения;
- использование новых характеристик излучения, ранее бесполезных для пирометрии;
- расширение диапазона измеряемых температур;
- расширение используемого спектрального диапазона.

Такое направление пирометрии излучения налагает соответствующие обязанности на метрологию высоких температур, являющуюся составной частью пирометрии. Своевременное метрологическое обеспечение не только способствует скорейшему внедрению в практику новых приборов, но и позволяет ускорить саму разработку их, освобождая приборостроителей от проблемы градуировки новых приборов и существенно облегчая испытания опытных приборов, в том числе — на начальной стадии разработки. Так было, например, при метрологическом обеспечении цветовой пирометрии, когда метрологические средства и методы разрабатывались и совершенствовались одновременно с разработкой и совершенствованием цветных пирометров. При этом была обеспечена возможность градуировать и испытывать первые опытные образцы пирометров с помощью опытных образцовых температурных ламп, градуированных эталонным методом на цветные температуры [17].

Чрезвычайно широкое распространение высокотемпературной техники и пирометрии излучения требует, чтобы массовые градуировки, проверки и испытания приборов проводились

без применения моделей абсолютно черного тела. Эти модели в принципе позволяют при градуировке пирометров разных типов применять образцовые приборы какого-нибудь одного типа. Однако, работа с моделями абсолютно черного тела слишком сложна для повседневной технической практики и обеспечивает требуемую точность лишь при весьма тщательной постановке эксперимента.

Поэтому с точки зрения технической целесообразности необходимо упрощать градуировку, проверку и испытания пирометров излучения серийного производства, в частности, уже при их разработке. Средством такого упрощения является создание образцовых пирометров или образцовых излучателей, позволяющих градуировать технические приборы методом непосредственного сличения, без применения моделей черного тела.

Однако такое упрощение методики градуировки и проверки не приводит к потере точности только в том случае, если основные спектральные характеристики образцовых пирометров совпадают со спектральными характеристиками проверяемых пирометров, либо если градуировка образцовых излучателей выполнена в той же спектральной области и по тем же характеристикам излучения, которые используются в проверяемых пирометрах.

В работе приведен краткий обзор состояния точной фотоэлектрической пирометрии применительно к работам по построению температурной шкалы.

До последнего времени работы по построению шкалы высоких температур, так же как и другие точные пирометрические исследования, выполнялись с помощью визуального оптического пирометра. Вследствие этого точность измерений была ограничена и определялась свойствами человеческого глаза. Погрешность этих измерений велика и не обеспечивает передачи значений температурной шкалы с требуемой точностью. Естественно, что при этих условиях принцип повышения точности метрологических работ на основе привлечения новых научных и технических приемов, на основе использования новейших достижений точного приборостроения и экспериментальной метрологии потребовал перехода на фотоэлектрический метод при построении шкалы высоких температур.

Применение фотоэлектрического метода при осуществлении температурной шкалы обеспечивает следующие неоспоримые преимущества [2, 3]:

1) повышение чувствительности — исключение порога контрастной чувствительности глаза, лимитирующего точность визуальных измерений, что открывает широкие перспективы для прогрессирующего повышения точности;

2) исключение субъективных свойств наблюдателя;

3) исключение границ видимой части спектра;

4) возможность использования узких спектральных интервалов, что может обеспечить точное определение эффективной длины волны;

5) возможность существенного (в пределах уровня современной техники) повышения верхнего предела температурной шкалы.

Разработка фотоэлектрической аппаратуры и исследование фотоэлектрических методов построения температурной шкалы в настоящее время проводится в ряде стран: в СССР, Англии, Западной Германии, США, Австралии. Советский Союз первым начал эти работы. В Харьковском государственном институте мер и измерительных приборов (ХГИМИП) В. А. Ковалевский при участии Г. Л. Иоссельсона, разработал под руководством В. В. Кандыбы первый точный фотоэлектрический спектропирометр СПК-1; там же затем были построены фотоэлектрические установки СПК-2 и СПК-3.

При разработке фотоэлектрической аппаратуры для построения шкалы высоких температур мы применили нулевой модуляционный метод, в наибольшей мере разработанный в ХГИМИП.

Влияние рассеяния света оптическими деталями, даже при постановке измерений с применением относительного метода, исключается не полностью и часто приводит к ощутимой погрешности измерений. Это особенно сильно сказывается при построении шкалы высоких температур фотоэлектрическим методом, в связи с повышенными требованиями к точности. При этом влияние рассеянного света проявляется в разных оптических устройствах по-разному в зависимости от их назначения и от того, каким путем рассеянный свет может нарушить функционирование этих устройств. Влияние рассеянного света изучается также при решении ряда задач точной фотометрии. Однако специфичность нулевого модуляционного метода измерений, а также приемов построения температурной шкалы требует самостоятельного решения этого вопроса.

Автором показано [19], что при осуществлении темпера-

турной шкалы новым, фотоэлектрическим методом влияние рассеянного света проявляется в основном тремя путями:

1) рассеянный свет в монохроматоре спектропирометра затрудняет точное определение эффективной длины волны;

2) рассеянный свет во внешней оптической системе спектропирометра приводит к погрешности, зависящей от излучения нерабочих (периферийных) участков поверхности сравниваемых излучателей;

3) рассеянный свет в устройстве для экстраполяции значений температуры приводит к систематической погрешности удвоения яркостей.

Разработанные методы исследования рассеянного света, по-видимому, следует иметь в виду во всех случаях при конструировании и испытании фотоэлектрической аппаратуры для точных измерений высоких температур.

Проведенные исследования позволили разработать спектрометрическую установку СП-4К, предназначенную для основных метрологических работ в области высоких температур. В конструкции новой установки учтены требования, возникающие при решении задачи построения температурной шкалы эталонным методом с максимальной точностью. Эти требования и пути их выполнения выявлены в результате опыта работы по метрологическим исследованиям фотоэлектрического метода измерения.

Основные особенности конструкции установки СП-4К следующие [20, 21]:

1) действие установки основано на нулевом модуляционном методе, обеспечивающем возможность исключения влияния нестабильности и нелинейности фотоэлектрической аппаратуры на результат измерения;

2) в установке применен двойной монохроматор, что позволило радикально решить вопрос о точности определения эффективной длины волны;

3) в конструкции деталей внешней оптической системы приняты меры для существенного ослабления рассеянного света;

4) электрическая часть установки выделена в отдельный агрегат, включающий усилительно-детекторные устройства, источники питания схемы, реостаты для ламп и все измерительные приборы. Оптическая часть установки состоит из оптической скамьи, системы внешней оптики с модулятором, монохроматора, фотоячейки и устройства для удвоения яркостей;

5) установка оснащена устройством для удвоения яркостей, предназначенным для эксперимента по экстраполяции температурной шкалы.

Переход на новый метод осуществления температурной шкалы без потери точности требует тщательного исследования новой аппаратуры. Методика исследования параметров и погрешности оптико-механических и фотоэлектронных устройств, разработанная и примененная при осуществлении температурной шкалы фотоэлектрическим методом, как правило, опиралась на высокую чувствительность установки СП-4К.

Определения параметров установки показали, что порог ее чувствительности составляет 0,02—0,05 град в области спектра от 0,47 до 1 мк при полосе пропускания 0,01—0,03 мк, температуре излучателей 1064,4° С и постоянной времени измерительной схемы 5 сек. Влияние напряжения на ФЭУ, напряжения сети, силы тока через шлейф, температуры помещения и т. д., при правильной эксплуатации установки ничтожно. Спектральные характеристики установки СП-4К устойчивы и надежно определяются. В пределах чувствительности установки влияние рассеянного света отсутствует. Воспроизводимость результатов сличения температурных ламп с помощью установки СП-4К проверялась путем многократного повторения этого процесса в течение продолжительного времени.

Перечисленные исследования фотоэлектрической спектропирометрической установки СП-4К показали высокий метрологический уровень ее характеристик и подтвердили возможность применения ее для точных работ по осуществлению температурной шкалы фотоэлектрическим методом.

VI

В шестой главе описана методика и результаты построения температурной шкалы фотоэлектрическим методом.

Шкала высоких температур, осуществляемая по положению о Международной шкале оптическими методами, может совпадать с термодинамической шкалой в пределах максимально возможной точности, если при расчете экстраполируемой температуры для точки золота взять значение по термодинамической шкале и для постоянной получения S_2 взять также наиболее вероятное значение. Поэтому применение фотоэлектрического метода способствует уточнению как Меж-

дународной, так и термодинамической температурной шкалы [2].

При осуществлении температуры равновесия между твердым и жидким золотом с применением фотоэлектрического метода измерений нами использовались две модели черного тела:

1) так называемая «малая модель» — аналогичная той, которую применяли в лаборатории высоких температур ВНИИМ для осуществления эталонным методом реперной точки 1063° С (межд.) при визуальных измерениях;

2) «удлиненная модель», отличающаяся от первой тем, что диафрагма, отверстие которой визируется пирометром, вставляется внутрь полости черного тела. Это способствует уменьшению потерь за счет теплообмена между полостью черного тела и внутренними деталями печи [21, 23].

Осуществление золотой точки должно заключаться в такой фиксации яркости черного тела при этой температуре, которая позволяет передать эту яркость образцовым пирометрам при их градуировке и поверке. Кроме того, осуществление золотой точки должно обеспечить исходную информацию для постановки эксперимента по построению температурной шкалы выше этой точки. Для этого на установке СП-4К определяли силу тока температурных ламп при равенстве яркостей их лент и излучающей полости черного тела, находящейся при температуре равновесия между твердым и жидким золотом. Эта температура по изложенным выше результатам исследований с газовым термометром равна $1064,4 \pm 0,2^\circ \text{C}$ (терм.).

Измерения производили при 12 значениях эффективной длины волны в диапазоне от 0,47 до 1 мк. Всего было произведено 105 серий измерений (52 при плавлении и 53 при затвердевании золота). Из них наибольшее число — 40 серий измерений — было произведено при эффективной длине волны, равной 0,6563 мк, специально для оценки воспроизводимости градуировки ламп. Эта область спектра была выбрана, как наиболее распространенная в пирометрии. При этом был выполнен тщательный теоретический и экспериментальный анализ погрешностей осуществления золотой точки. Было установлено, что применение фотоэлектрического метода позволило существенно снизить основные систематические погрешности, связанные с теплообменом между излучающей полостью и прилегающими участками печи, величина которых (погрешностей) зависит от конструкции модели черного тела

и от теплового режима печи, — а знак — от направления фазового перехода.

Постановке работы по построению температурной шкалы фотоэлектрическим методом предшествовали систематические исследования методики, аппаратуры и погрешностей. Как указано выше, были разработаны теоретические вопросы, связанные с повышением точности температурной шкалы, в первую очередь — вопросы об эффективной длине волны при точных фотоэлектрических измерениях. Были исследованы погрешности, вносимые фотоэлектрической и оптической аппаратурой, и разработаны пути создания аппаратуры, обеспечивающей требуемую точность, что дало возможность построить эталонный фотоэлектрический пирометр СП-4К. Были разработаны методика и аппаратура для осуществления золотой точки при фотоэлектрических измерениях и зеркальное устройство для удвоения яркостей, предназначенное для экспериментальной экстраполяции значений температуры выше золотой точки по закону Планка. Эти исследования позволили поставить работу по построению шкалы высоких температур фотоэлектрическим методом в широком спектральном интервале.

При воспроизведении температурной шкалы обычным визуальным методом измерение отношения яркостей двух источников наиболее точно осуществляется уравниванием их яркостей при ослаблении излучения одного из источников путем его модуляции вращающимся секторным диском с известным углом раскрытия. В работе показано, что при нулевом методе фотоэлектрических измерений применять ослабление секторными дисками нецелесообразно. В связи с этим возникла необходимость изыскания нового метода экстраполяции значений температуры.

Разработанное зеркальное устройство для удвоения яркостей обеспечило возможность экспериментальной экстраполяции значений температуры при построении температурной шкалы с применением фотоэлектрического метода измерений [24].

Следует отметить, что через некоторое время после опубликования в печати работ [24] о принципе действия и применения устройства для удвоения яркостей, за рубежом переняли этот принцип и стали также применять его для решения близких задач при метрологических исследованиях. Впрочем, это относится почти ко всем метрологическим работам по фотоэлектрической пирометрии.

Последовательность операций при экспериментальной экстраполяции значений температуры составлена таким образом, чтобы обеспечить полное использование той точности, которая может быть получена при фотоэлектрических измерениях.

Экстраполяцию значений температурной шкалы производили от десяти удвоений яркости при эффективной длине волны 470 нм. до трех — при 1000 нм. Всего было произведено 22 серии экстраполяции шкалы температур.

Для сравнения результатов построения шкалы температур фотоэлектрическим и визуальным методами практиковались взаимные сличения эталонных ламп на спектропирометре СП-4К. Среднее квадратичное расхождение для интервала температур 1100—1700°С составляет $\pm 1,5$ град, что следует считать удовлетворительным и соответствующим точности визуального метода.

Для воспроизведения температурной шкалы до температур, превышающих допустимую температуру накала градуированной лампы, были применены поглощающие стекла, так же как в визуальных оптических пирометрах [22].

Большой экспериментальный материал, накопленный при градуировке эталонных ламп, обеспечил возможность детального анализа погрешностей построения температурной шкалы.

При всех тепловых измерениях, как и при многих других видах измерений, систематические погрешности, как правило, преобладают над случайными. Поэтому, с одной стороны оказывается бесполезным как тщательный математический анализ случайных погрешностей, так и накопление больших рядов измерений, необходимых для такого анализа. С другой стороны, изучение и степень исключения систематических погрешностей во многих случаях лимитируется случайными погрешностями. Поэтому мы сочли необоснованной оценку случайной погрешности теплового метрологического эксперимента по рассчитанным методами математической статистики погрешности результата. Более правильно, в этих условиях, по-видимому, вести эти расчеты на основе значения погрешности ряда измерений, характеризующей чувствительность метода и возможности изучения систематических погрешностей. По этим причинам в нашей работе, как правило, предельная погрешность результата измерений рассчитывалась на основе средней квадратичной погрешности ряда измерений, выявляемой по результатам каждого эксперимента.

В табл. 2 приведены значения суммарной предельной погрешности эталонов температурной шкалы. Там же для срав-

нения указаны предельные погрешности градуировки эталонов прежним, визуальным методом.

Таблица 2

Предельная погрешность эталонов температуры, град

Т° С (терм.)	Метод градуировки и температура			
	Визуальный		Фотоэлектрический	
	яркостная	цветовая	яркостная	цветовая
1064,4	0,65	—	0,3	—
1200	—	—	0,5	2,5
1400	1,7	5	0,6	3
1600	—	—	0,7	4
1800	3,1	—	1,4	5
2000	—	14	1,6	6
2300	6,3	—	2,1	8
2500	6,9	32	2,5	10
2800	—	40	3,0	12

При рассмотрении табл. 2 необходимо учитывать, что погрешность фотоэлектрического метода оценена в настоящей работе более жестко (по погрешностям ряда измерений), чем погрешность визуального метода (по погрешностям результата). С учетом этого обстоятельства из данных табл. 2 следует, что применение фотоэлектрического метода обеспечило повышение точности эталонов высоких температур в 3—5 раз. Такое повышение точности получило также прямое экспериментальное подтверждение.

Результаты работы по построению шкалы высоких температур фотоэлектрическим методом внедрены в метрологическую практику. Начиная с 1962 г., градуировка и поверка рабочих эталонов, принадлежащих институтам Госкомитета стандартов, мер и измерительных приборов СССР, а также во многих случаях образцовых температурных ламп, осуществляется во ВНИИМ фотоэлектрическим методом, сличением с новыми эталонами; это обеспечивает применение новых эталонов температурной шкалы на всей территории страны. Одновременно в случаях, требующих особой точности, градуировка рабочих приборов, как обычно, производится непосредственно по исходным эталонам. Такими точными прибо-

рами в настоящее время практически снабжены все научные, конструкторские и производственные организации, связанные с разработкой и изготовлением пирометров излучения.

Фотоэлектрический метод построения температурной шкалы и градуировки образцовых излучателей имеет особенно большое значение для метрологического обеспечения цветовой пирометрии.

Таким образом, новые эталоны высоких температур, воспроизводящие температурную шкалу с повышенной в 3—5 раз точностью, введены в строй и внедрены в практику метрологических и приборостроительных работ.

VII

В отличие от визуального метода, фотоэлектрический метод построения температурной шкалы выше 1064,4° С (терм.), благодаря низкому порогу чувствительности открывает широкие перспективы дальнейшего повышения точности. Выявлена возможность снижения погрешностей, связанных с нестабильностью ленточных температурных ламп. Кроме того, существуют ясные пути дальнейшего усовершенствования оптической аппаратуры — в направлениях, указанных в реферруемой работе в разделе «Пути развития точной фотоэлектрической аппаратуры». Наконец, весьма перспективны дальнейшие исследования методики эксперимента. Достигнутая точность открывает также пути существенного, качественно нового повышения точности эталонных и образцовых излучателей, градуируемых на цветовые температуры, а именно — выявлена возможность вводить различия в градуировочные данные в зависимости от используемых областей спектра. При визуальном методе градуировки такая возможность полностью отсутствовала из-за высокого уровня случайных погрешностей, связанных с порогом контрастной чувствительности глаза.

Область применения новых эталонов непрерывно расширяется, а сами эталоны и методика их градуировки, использования и развития непрерывно совершенствуются [25, 26]. В настоящее время фотоэлектрический метод, образцовая аппаратура и метрологические работы распространены также на инфракрасную пирометрию. Дальнейшие перспективы развития эталонов высоких температур, касающиеся как газовой термометрии, так и фотоэлектрической пирометрии, вкратце изложены в последней главе работы.

Наличие широких перспектив дальнейшего развития является характерной чертой новых эталонов высоких температур. Это объясняется тесной связью эталонов с новейшей техникой точного метрологического и приборостроительного эксперимента.

Заключение

Основным результатом работы является построение шкалы высоких температур в широком температурном и спектральном диапазонах, с применением, впервые в СССР, метода газовой термометрии, и — впервые в мире — метода фотоэлектрической пирометрии. При этом точность новых эталонов температурной шкалы повышена в 3—5 раз, а в некоторых случаях до 10 раз, по сравнению с точностью как прежних эталонов, так и с точностью эталонов, достигнутой за рубежом. Разработанные для этой цели методы и аппаратура обеспечивают дальнейшее повышение точности эталонов и расширение области их применения.

Ниже вкратце перечисляются отдельные теоретические и экспериментальные результаты работы, обеспечившие решение поставленной задачи.

1. В работе дано физическое обоснование определения понятия шкалы измеряемой величины, как системы выбора численных значений этой величины, устанавливаемой произвольным, но четко определенным способом в тех случаях, когда измеряемая величина не поддается сложению при метрологическом эксперименте и когда вместе с тем определение этой величины не обеспечивает однозначности при установлении для нее производной единицы.

2. В работе показано, что теория температурной шкалы, рассматриваемая с позиций общей метрологии, термодинамики, статистической физики и прикладной пирометрии, позволяет установить условия и пути решения основных метрологических задач в области осуществления термодинамической шкалы высоких температур в соответствии с практическими потребностями современной науки и техники.

Переход на энергетические единицы для измерения температуры, устраняющий проблему температурной шкалы, перспективен, но не своевременен, так как при современных средствах измерения энергии неизбежно приведет к потере точности на 2—3 порядка; из всех тепловых величин температура метрологически наиболее изучена и обеспечивает

высокую точность измерения теплового состояния тел только при сохранении независимой единицы для ее измерения. Для обеспечения практической ценности и самостоятельности метрологических работ необходимо, чтобы исследования температурной шкалы охватывали широкий температурный диапазон. Исследования температурной шкалы в узких интервалах или в отдельных точках не могут иметь самостоятельного практического значения. Несмотря на известную неопределенность понятия температуры при неравновесных процессах, для метрологического обеспечения исследований таких процессов необходима температурная шкала, основанная по-прежнему на законах теплового равновесия. Наиболее рациональными современными методами осуществления термодинамической шкалы высоких температур являются методы газовой термометрии и фотоэлектрической пирометрии, при условии коренного усовершенствования методики и аппаратуры на основе новейших достижений точного приборостроения и экспериментальной метрологии.

3. В работе показаны и обоснованы условия и направления развития газовой термометрии и пути реализации этих условий, обеспечивающие существенное повышение точности. Сформулированы и теоретически обоснованы конкретные требования к аппаратуре — газовому термометру и измерительным термостатам, исключающие возможность применения аппаратуры ранее применявшихся конструкций. Разработана новая схема газового термометра. Описаны выполненные расчетные, конструкторские и экспериментальные работы, в результате которых создана требуемая аппаратура, и приводятся результаты измерений, выполненных с новой аппаратурой. Определены термодинамические температуры ряда реперных точек, имеющих большое практическое значение для метрологии средних и высоких температур. На основе этих результатов составлены конкретные предложения о пересмотре положения о Международной практической температурной шкале, которые были представлены советской делегацией и приняты за основу Международным консультативным комитетом по термометрии.

4. В работе показано, что теория эффективной длины волны, являющаяся основой оптической пирометрии, в существующем виде недостаточно разработана и практически неприменима к фотоэлектрической пирометрии. Описан ряд экспериментальных методов определения эффективной длины волны на основе новой теории, охватывающих все основные

14. И. И. Киренков. Эффективная длина волны фотоэлектрического спектропиromетра. «Измерительная техника», 6, 1963.
15. И. И. Киренков. Метрологические особенности цветовой пиromетрии. «Измерительная техника», 4, 1959.
16. И. И. Киренков. Особенности развития пиromетрии излучения. «Измерительная техника», 4, 1964.
17. А. Н. Гордов, И. И. Киренков и Э. А. Лапина. Сличение ламп по цветовым температурам фотоэлектрическим методом. Труды ВНИИМ, вып. 35(95), 1958.
18. Л. А. Боярский, А. Н. Гордов, Г. Л. Иоссельсон, В. В. Кандыба, И. И. Киренков, В. А. Ковалевский, Г. А. Крахмальникова, Э. А. Лапина и К. Г. Тараянц. Применение фотоэлектрического метода для точных работ в области оптической пиromетрии. Сообщение Консультативному комитету по термометрии. Труды ВНИИМ, вып. 36(96), 1958.
19. И. И. Киренков. Влияние рассеянного света в оптических устройствах точной пиromетрии. Труды ВНИИМ, вып. 71(131), 1963.
20. И. И. Киренков и Г. А. Крахмальникова. Спектропиromетрическая установка ВНИИМ, «Измерительная техника», 5, 1962.
21. И. И. Киренков и Г. А. Крахмальникова. Фотоэлектрическая установка ВНИИМ для построения шкалы температур в широком спектральном интервале. Труды ВНИИМ, вып. 71(131), 1963.
22. И. И. Киренков и Г. А. Крахмальникова. Поглощающие фильтры для температурных измерений в широком спектральном интервале. Труды ВНИИМ, вып. 71(131), 1963.
23. И. И. Киренков и Г. А. Крахмальникова. Исследование фотоэлектрическим методом горизонтальной модели черного тела при температуре затвердевания золота. Труды ВНИИМ, вып. 51(111), 1961.
24. И. И. Киренков, В. А. Ковалевский и Г. А. Крахмальникова. Воспроизведение шкалы яркостных температур фотоэлектрическим методом. «Измерительная техника», 2, 1960.
25. И. И. Киренков и Э. А. Лапина. Расчет цветовой температуры по формуле Планка. Труды ВНИИМ, вып. 71(131), 1963.
26. И. И. Киренков. Методы осуществления температурной шкалы выше $10\,000^{\circ}\text{C}$. Труды ВНИИМ, вып. 63(123), 1962.

М-20517. 15-1-65 г. Заказ 41. Тираж 250. Бесплатно.

Типография № 2 Управления по печати Ленгорисполкома,
Ленинград, Фонтанка, 36